Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der
Technischen Universität München
Technik im Pflanzenbau

Mechanische Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen ohne Eingriff in das Bodengefüge

Peter Nawroth

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der
Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. (AE Keszthely) J. Schön
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr. M. Estler (i. R.)
	2. Univ.-Prof. Dr. L. Reiner
	3. Univ.-Prof. Dr. J. Meyer

Die Dissertation wurde am 19.11.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 18.12.2001 angenommen.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert.

© 2002 by Landtechnik Weihenstephan

ISSN-Nr. 0931-6264

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

Selbstverlag im Eigenvertrieb:
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München
Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung
Fachgebiet Technik im Pflanzenbau
Am Staudengarten 2
D-85350 Freising

Druck: HIERONYMUS Buchreproduktions GmbH, München

Vorwort

Ökologische und betriebswirtschaftliche Aspekte, aber auch neuere gesetzliche Regelungen und vor allem die aktuellen agrarpolitischen Rahmenbedingungen haben ein Umdenken im gesamten Bereich der Unkrautregulierung und ein zunehmendes Interesse an der Verwendung moderner, mechanisch-physikalischer Verfahren begründet. Dies gilt ganz allgemein, nicht nur für die nach streng ökologischen Grundsätzen wirtschaftenden Betriebe.

Ökologische Vorteile werden von einer Reduzierung des Aufwandes an chemischen Unkrautbekämpfungsmitteln (Herbiziden) erwartet. Erklärtes Ziel ist es, den Stoffeintrag in landwirtschaftlich genutzte Flächen drastisch zu reduzieren und auf das unbedingt erforderliche Maß zu beschränken. Dies stellt darüber hinaus eine der wichtigen Maßnahmen dar, dem befürchteten Stoffaustrag in angrenzende Umweltbereiche (z. B. Gewässer, tiefere Bodenschichten, Grundwasser) wirksam vorzubeugen. Dagegen sollen ökonomische Vorteile vor allem durch Kosteneinsparungen beim Einsatz von chemischen Pflanzenbehandlungsmaßnahmen erzielt werden. Die Unkrautregulierung stellt dabei einen besonders attraktiven Bereich dar, da ca. 60 % bis 80 % der insgesamt in der Landwirtschaft ausgebrachten chemischen Wirkstoffe allein auf Herbizide entfallen.

Wenn aber die mechanische Unkrautregulierung eine echte Alternative zu den bewährten und sicher wirkenden chemischen Behandlungsmaßnahmen darstellen soll, muß sie vergleichbare Wirkungen und Ergebnisse gewährleisten. Dies gilt nicht nur für den unkrautregulierenden Effekt, sondern auch in arbeitswirtschaftlicher und verfahrenstechnischer Hinsicht. Die Erfahrungen zeigen zwar, daß Einzelmaßnahmen und spezielle technische Lösungen oft nur unzureichend in der Lage sind, diese Zielsetzungen zu erfüllen und daher in das Gesamtkonzept einer flexiblen und anpassungsfähigen Strategie zur Unkrautregulierung eingebunden sein müssen.

Dennoch kommt der modernen Gerätetechnik eine zentrale Rolle zu, insbesondere solchen Lösungen, die in der Lage sind, die Schwächen und Nachteile der bisher vorwiegend angewandten mechanisch-physikalischen Verfahren zu vermeiden und die aktuellen Forderungen hinsichtlich Regulierungswirkung, Bodenschutz und Erosionsminderung zu erfüllen. Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte, neuentwickelte Gerät soll einen Beitrag zur Realisierung einer ökologisch relevanten, mechanischen Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen leisten.

Weihenstephan, im Juli 2001

Prof. Dr. habil. Manfred Estler

Danksagung

Nach Abschluß der vorliegenden Dissertation danke ich allen sehr herzlich, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. M. Estler für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr. L. Reiner und Herrn Univ.-Prof. Dr. J. Meyer möchte ich für die Übernahme der Koreferate sowie Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. (AE) H. Schön für den Prüfungsvorsitz danken.

Herrn Univ.-Prof. Dr. G. Forkmann vom Lehrstuhl für Zierpflanzenbau danke ich für die Bereitstellung von Versuchsflächen im Gewächshaus und im Frühbeetkasten auf der Versuchsstation Dürnast. Zudem möchte ich den Mitarbeitern der Versuchsstation Dürnast des Lehrstuhls für Zierpflanzenbau für die Unterstützung meinen herzlichen Dank aussprechen, insbesondere Herrn R. Dinkel, Herrn F. Steinbacher, Herrn H. Zenz, Frau B. Hofmann und Frau A. Keil. Besonders möchte ich mich auch bei Frau D. Engelhart für die Mithilfe bei der Versuchsdurchführung bedanken.

Dank sagen möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr. W. Feucht und Herrn Diplom-Gärtner H. Schimmelpfeng vom Lehrstuhl für Obstbau für die Bereitstellung einer Gewächshausfläche zur Durchführung der Prüfstandsversuche.

Herrn LD Dr. H. Fuchs danke ich dafür, daß ich die Keimfähigkeitsuntersuchungen von Unkrautsaatgut in den Einrichtungen der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau durchführen konnte.

Mein Dank gilt allen, die an der Planung und am Bau des Prüfstands und des Versuchsgerätes beteiligt waren. Besonders danke ich Herrn Dipl.-Ing. (FH) G. Rödel, Herrn H. Stadler und den Mitarbeitern der Werkstatt der Landtechnik Weihenstephan sowie dem Elektroingenieur Herrn Ing. J. Dallinger und Herrn F. Bauer. Für die Mithilfe bei den Drehmomentmessungen möchte ich Herrn Dr. H. Stanzel von der Abteilung Meßtechnik und für die Bereitstellung des Pflegeschleppers der Firma Fendt meinen Dank aussprechen.

Danken möchte ich Herrn H. Keller und Herrn M. Berchtold vom Zeichenbüro der Landtechnik Weihenstephan für die technischen Zeichnungen, die sie mit viel Liebe zum Detail erstellt haben.

Zudem gilt mein Dank den beteiligten Landwirten Herrn J. Frankl (Freising), Herrn A. Grandl (Marzling-Riegerau), Herrn M. Huber (Großenviecht) sowie Herrn Dr. K. Walter und Herrn A. Bloier vom Staatsgut Dürnast für die Bereitstellung der Versuchsflächen.

Für die finanzielle Unterstützung danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Ganz besonders danken möchte ich meiner Frau Alexandra für die aktive Mitarbeit und die mentale Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Weihenstephan, im Juli 2001 Peter Nawroth

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 5

Abbildungsverzeichnis 8

Tabellenverzeichnis 17

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole 20

1 Einleitung und Problemstellung 23

2 Stand des Wissens 28

2.1 Geräte- und Verfahrenstechnik der bisherigen Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung zwischen den Kulturpflanzenreihen 29
2.1.1 Gezogene Geräte 29
2.1.1.1 Reihenhackmaschine 30
2.1.1.2 Hackstriegel 32
2.1.2 Abrollende Geräte 34
2.1.2.1 Rollhacke 34
2.1.2.2 Bügelhacke 37
2.1.3 Angetriebene Geräte 39
2.1.3.1 Reihen(hack)fräse 40
2.1.3.2 Weihenstephaner Trennhacke 42

2.2 Grenzen und Auswirkungen des Einsatzes bisheriger Geräte unter verschiedenen Umweltbedingungen 45

2.3 Möglichkeiten zur Verminderung der Bodenerosion 47
2.3.1 Definition der Bodenerosion 47
2.3.2 Bodenbearbeitung und Bodenbedeckung 49

2.4 Technik der mechanischen Schädigung oberirdischer Pflanzenteile 51
2.4.1 Abschneiden 52
2.4.2 Abschlegeln 56
2.4.3 Entlauben 60

2.5 Erkenntnisse der Voruntersuchungen 62

3 Zielstellung 65

4 Prüfstandsversuche ... 68

4.1 Material und Methoden ... 68
4.1.1 Aufbau des Prüfstands ... 68
4.1.2 Testpflanzen ... 71
4.1.3 Versuchsplanung ... 77
4.1.4 Versuche zum Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben von CHEAL und ECHCR ... 78
4.1.4.1 Schädigungswerkzeuge ... 79
4.1.4.2 Versuchsanlage ... 81
4.1.4.3 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 85
4.1.5 Versuche zur Handentlaubung von CHEAL und ECHCR ... 89
4.1.5.1 Versuchsanlage ... 89
4.1.5.2 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 89
4.1.6 Versuche zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE, AMARE, SOLNI und STEME ... 90
4.1.6.1 Schädigungswerkzeuge ... 90
4.1.6.2 Versuchsanlage ... 91
4.1.6.3 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 91
4.1.7 Versuche mit verschiedenen Werkzeugtypen zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE ... 91
4.1.7.1 Schädigungswerkzeuge ... 92
4.1.7.2 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 93

4.2 Ergebnisse ... 94
4.2.1 Versuche zum Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben von CHEAL und ECHCR ... 94
4.2.1.1 Versuch mit CHEAL ... 95
4.2.1.2 Versuch mit ECHCR ... 107
4.2.2 Versuche zur Handentlaubung von CHEAL und ECHCR ... 120
4.2.2.1 Versuch mit CHEAL ... 120
4.2.2.2 Versuch mit ECHCR ... 120
4.2.3 Versuche zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE, AMARE, SOLNI und STEME ... 123
4.2.3.1 Versuch mit AGRRE ... 123
4.2.3.2 Versuch mit AMARE ... 127
4.2.3.3 Versuch mit SOLNI ... 131
4.2.3.4 Versuch mit STEME ... 135
4.2.4 Versuche mit verschiedenen Werkzeugtypen zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE ... 139

5 Feldversuche ... 142

5.1 Material und Methoden ... 142
5.1.1 Aufbau des Versuchsgerätes ... 142
5.1.2 Versuchsflächen ... 146
5.1.3 Versuchsplanung ... 149
5.1.4 Versuch mit 3-reihigem Reihen-Unkraut-Mulchgerät ... 150
5.1.4.1 Versuchsanlage ... 151
5.1.4.2 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 152
5.1.5 Ermittlung der Zerkleinerungswirkung an *Amaranthus retroflexus* L. ... 155
5.1.5.1 Schädigungswerkzeuge ... 156
5.1.5.2 Testpflanzen und Versuchsanlage ... 156
5.1.5.3 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 156
5.1.6 Bestimmung des Leistungsbedarfs ... 157
5.1.6.1 Versuchsaufbau ... 157
5.1.6.2 Versuchsdurchführung und -auswertung ... 158

5.2 Ergebnisse ... 160
5.2.1 Versuch mit 3-reihigem Reihen-Unkraut-Mulchgerät ... 160
5.2.1.1 Standort Dürnast ... 161
5.2.1.2 Standort Freising-Süd ... 169
5.2.1.3 Standort Eittingermoos ... 176
5.2.1.4 Standort Großenviecht ... 183
5.2.1.5 Alle Standorte - Mittelwert der Regulierungserfolge und Maiserträge ... 190
5.2.2 Zerkleinerungseffekt bei *Amaranthus retroflexus* L. ... 194
5.2.3 Leistungsbedarf ... 195

6 Diskussion und Schlußfolgerungen ... 198

6.1 Prüfstandsversuche ... 198

6.2 Feldversuche ... 201

7 Verfahrenstechnische Einordnung und Ausblick ... 215

8 Zusammenfassung ... 221

9 Summary ... 225

10 Literatur- und Quellenverzeichnis ... 228

Anhang ... 251

Lebenslauf

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Hackstriegel im Einsatz (Nahaufnahme) 23

Abb. 2: Erosionserscheinungen in einem konventionell bestellten Mais (Standort Großenviecht bei Freising (Bayern), Juni 1996) 24

Abb. 3: Schematische Darstellung einer Reihenhacke (Seitenansicht) 30

Abb. 4: Schematische Darstellung einer Rollhacke (Seitenansicht) 35

Abb. 5: Schematische Darstellung einer Reihenfräse (Seitenansicht) 41

Abb. 6: Schematische Darstellung der Weihenstephaner Trennhacke (Seitenansicht) 43

Abb. 7: Relative Veränderung des Bodenabtrags durch Regenwasser in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung und ihrer Entfernung zur Bodenoberfläche 50

Abb. 8: Arbeitsprinzipien der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge und ihre wuchshemmende Wirkung . 51

Abb. 9: Bauarten von Mähwerken und ihre Merkmale 54

Abb. 10: Bauarten von Schlegelmähwerken und ihre Merkmale 58

Abb. 11: Entlaubungsmaschine für den Schlepperanbau und ihre Merkmale 61

Abb. 12: Auswirkung ausgewählter Einflußfaktoren auf den Regulierungserfolg von Unkräutern (Ergebnisse der Multiplen-Classifications-Analyse), Voruntersuchungen in der Kultur Mais 1993 63

Abb. 13: Input-Output-Modell der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge 66

Abb. 14: Prüfstand - Gesamtübersicht mit Versuchsgerät 69

Abb. 15: Verwendete Unkrautarten der Prüfstandsversuche: CHEAL, SOLNI, AMARE, ECHCR, AGRRE und STEME (von links nach rechts) 74

Abb. 16: Frühbeetkasten mit Hagelschutz (Querschnitt) 75

Abb. 17: Verwendete Schädigungswerkzeuge 79

Abb. 18: Anordnung der Testpflanzen und des Versuchsgeräts (Seitenansicht) während der Behandlung mit dem Schneid- bzw. Schlegelrotor 86

Abb. 19: Anordnung der Testpflanzen und des Versuchsgeräts (Seitenansicht) während der Behandlung mit dem Entlaubungsrotor 86

Abb. 20: Verwendete Schädigungswerkzeuge zum Abschneiden und Abschlegeln von *Agropyron repens* (L.) Beauv. 92

Abb. 21: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung 97

Abb. 22: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung 97

Abb. 23: Anzahl der Blätter von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung 98

Abb. 24: Blattfläche von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung 98

Abb. 25: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung 99

Abb. 26: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung 100

Abb. 27: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung 101

Abb. 28: Anzahl der Blätter von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung 101

Abb. 29: Blattfläche von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung 102

Abb. 30: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung 102

Abb. 31: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung 104

Abb. 32: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung 104

Abb. 33: Anzahl der Blätter von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung 105

Abb. 34: Blattfläche von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung 105

Abb. 35: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung 106

Abb. 36: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 108

Abb. 37: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 109

Abb. 38: Anzahl der Blätter von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 109

Abb. 39: Blattfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 110

Abb. 40: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 110

Abb. 41: Anzahl der Triebe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 111

Abb. 42: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 112

Abb. 43: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 113

Abb. 44: Anzahl der Blätter von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 113

Abb. 45: Blattfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 114

Abb. 46: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 114

Abb. 47: Anzahl der Triebe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 115

Abb. 48: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 116

Abb. 49: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 117

Abb. 50: Anzahl der Blätter von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 117

Abb. 51: Blattfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 118

Abb. 52: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 118

Abb. 53: Anzahl der Triebe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 119

Abb. 54: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung) 121

Abb. 55: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung) 121

Abb. 56: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung) 122

Abb. 57: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung) 122

Abb. 58: Wuchshöhe von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 124

Abb. 59: Aufgewachsene Trockenmasse von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 124

Abb. 60: Wuchshöhe von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 125

Abb. 61: Aufgewachsene Trockenmasse von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 125

Abb. 62: Wuchshöhe von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 126

Abb. 63: Aufgewachsene Trockenmasse von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 126

Abb. 64: Wuchshöhe von *Amaranthus retroflexus* L., 0 Tage nach der Behandlung 128

Abb. 65: Aufgewachsene Trockenmasse von *Amaranthus retroflexus* L., 0 Tage nach der Behandlung 128

Abb. 66: Wuchshöhe von *Amaranthus retroflexus* L., 10 Tage nach der Behandlung 129

Abb. 67: Aufgewachsene Trockenmasse von *Amaranthus retroflexus* L., 10 Tage nach der Behandlung 129

Abb. 68: Wuchshöhe von *Amaranthus retroflexus* L., 20 Tage nach der Behandlung 130

Abb. 69: Aufgewachsene Trockenmasse von *Amaranthus retroflexus* L., 20 Tage nach der Behandlung 130

Abb. 70: Wuchshöhe von *Solanum nigrum* L., 0 Tage nach der Behandlung 132

Abb. 71: Aufgewachsene Trockenmasse von *Solanum nigrum* L., 0 Tage nach der Behandlung 132

Abb. 72: Wuchshöhe von *Solanum nigrum* L., 10 Tage nach der Behandlung 133

Abb. 73: Aufgewachsene Trockenmasse von *Solanum nigrum* L., 10 Tage nach der Behandlung 133

Abb. 74: Wuchshöhe von *Solanum nigrum* L., 20 Tage nach der Behandlung 134

Abb. 75: Aufgewachsene Trockenmasse von *Solanum nigrum* L., 20 Tage nach der Behandlung 134

Abb. 76: Wuchshöhe von *Stellaria media* (L.) Vill., 0 Tage nach der Behandlung 136

Abb. 77: Aufgewachsene Trockenmasse von *Stellaria media* (L.) Vill., 0 Tage nach der Behandlung 136

Abb. 78: Wuchshöhe von *Stellaria media* (L.) Vill., 10 Tage nach der Behandlung 137

Abb. 79: Aufgewachsene Trockenmasse von *Stellaria media* (L.) Vill., 10 Tage nach der Behandlung 137

Abb. 80: Wuchshöhe von *Stellaria media* (L.) Vill., 20 Tage nach der Behandlung 138

Abb. 81: Aufgewachsene Trockenmasse von *Stellaria media* (L.) Vill., 20 Tage nach der Behandlung 138

Abb. 82: Erreichte Abtrennhöhen mit verschiedenartigen Schneid- und Schlegelwerkzeugen bei *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 140

Abb. 83: Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM), 3-reihiges Versuchsgerät (Gesamtübersicht mit Detailansicht Schlegelrotor) 143

Abb. 84: Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM), 3-reihiges Versuchsgerät (Seitenansicht) 145

Abb. 85: Geographische Lage der Versuchsstandorte (Maßstab: 1 : 75000) .. 147

Abb. 86: Versuchsanlage der Feldversuche in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 151

Abb. 87: Ablauf der kombinierten Unkrautregulierung der Feldversuche in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 152

Abb. 88: Aufgespleister Stengel von *Chenopodium album* L.; optimales Ergebnis nach Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes (RWM) mit abschlegelnden Werkzeugen bei 20 mm Abtrennhöhe 161

Abb. 89: Standort Dürnast: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 162

Abb. 90: Standort Dürnast: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 164

Abb. 91: Standort Dürnast: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 165

Abb. 92: Standort Dürnast: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter 166

Abb. 93: Standort Dürnast: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) 168

Abb. 94: Standort Freising-Süd: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 170

Abb. 95: Standort Freising-Süd: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 171

Abb. 96: Standort Freising-Süd: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 172

Abb. 97: Standort Freising-Süd: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter 174

Abb. 98: Standort Freising-Süd: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) 175

Abb. 99: Standort Eittingermoos: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 177

Abb. 100: Standort Eittingermoos: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 178

Abb. 101: Standort Eittingermoos: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 179

Abb. 102: Standort Eittingermoos: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter 181

Abb. 103: Standort Eittingermoos: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) 182

Abb. 104: Standort Großenviecht: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 184

Abb. 105: Standort Großenviecht : Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 185

Abb. 106: Standort Großenviecht: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.) 186

Abb. 107: Standort Großenviecht: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter 188

Abb. 108: Standort Großenviecht: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) 189

Abb. 109: Regulierungserfolge nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) - Mittelwerte aller Standorte 191

Abb. 110: Kornerträge von Mais der 4 Versuchsstandorte (arithmetische Mittelwerte von 4 bzw. 3 Wiederholungen) 193

Abb. 111: Relativer Kornertrag von Mais (4 Standorte, je 4 bzw. 3 Wiederholungen) 193

Abb. 112: Zerkleinerungseffekt verschiedener Schneid- bzw. Schlegelrotoren an *Amaranthus retroflexus* L. ($\bar{x}_{\text{Wuchshöhe}} = 20$ cm) 195

Abb. 113: Drehmomentverlauf von einem Schlegelrotor unter verschiedenen Bedingungen: wassergebundener Feldweg, Winterweizenstoppelfeld mit Maulwurfshügel 196

Abb. 114: Konzept Reihensichelmulchgerät für den Schlepperfrontanbau - mechanischer Antrieb über Gelenkwelle 206

Abb. 115: Konzept Reihensichelmulchgerät für den Schlepperfrontanbau - hydraulischer Antrieb über Ölpumpe im Schlepperheck 206

Abbildungen im Anhang:

Abb. A1: Versuchsanlage der Prüfstandsversuche mit CHEAL und ECHCR 252

Abb. A2: Versuchsanlage der Handentlaubungsversuche mit CHEAL und ECHCR 253

Abb. A3: Versuchsanlage der Prüfstandsversuche mit AMARE, AGRRE, SOLNI und STEME 254

Abb. A4: Prüfstandsversuche: *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung, Varianten (von links nach rechts): K 20, S 20-5, C 20-5, F 20-5, S 20-2, C 20-2, F 20-2 255

Abb. A5: Trennbild von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., bei Einsatz des abschlegelnden Werkzeugs 255

Abb. A6: Prüfstandsversuche: *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung, Varianten (von links nach rechts): K 20, C 20-5, F 20-5, S 20-5, C 20-2, F 20-2, S 20-2 256

Abb. A7: Handentlaubung: *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung, Varianten (von links nach rechts): K 20, mS 20-2 256

Abb. A8: Entwicklungsstadien von Mais (*Zea mays* L.) 259

Abb. A9: Standort Dürnast (Mulchsaatfläche): Blick in den Zwischenreihenbereich vor der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM) 260

Abb. A10: Standort Dürnast (Mulchsaatfläche): Blick in den Zwischenreihenbereich nach der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM) 260

Abb. A11: Standort Freising-Süd: Blick in den Zwischenreihenbereich vor der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM) 261

Abb. A12: Standort Freising-Süd: Blick in den Zwischenreihenbereich nach der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM) 261

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Relativer Bodenabtrag bei verschiedenen Kulturpflanzen und Schwarzbrache 49

Tab. 2: Ausgewählte Unkraut- und Ungrasarten und ihre Wuchshöhen ... 71

Tab. 3: Ergebnisse der Keimfähigkeitsprüfungen von ausgewählten Unkrautarten 73

Tab. 4: ADF- und ADL-/Lignin- und Cellulose-Gehalt der Testpflanzen und Ackerunkräuter 76

Tab. 5: Trockenmasse von *Chenopodium album* L. nach 0, 10 und 20 Tagen nach der Behandlung bei 12 Pflanzen/Teilparzelle (Kern) .. 83

Tab. 6: Trockenmasse von *Chenopodium album* L. nach 0, 10 und 20 Tagen nach der Behandlung bei 24 Pflanzen/Teilparzelle (Kern + Rand) 83

Tab. 7: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung 99

Tab. 8: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung 103

Tab. 9: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung 106

Tab. 10: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung 111

Tab. 11: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung 115

Tab. 12: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung 119

Tab. 13: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung 127

Tab. 14: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Amaranthus retroflexus* L., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung 131

Tab. 15: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Solanum nigrum* L., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung 135

Tab. 16: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Stellaria media* (L.) Vill., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung 139

Tab. 17: Beschreibung der Versuchsstandorte 148

Tab. 18: Ober- und Untergrenzen des pflanzenverfügbaren Wassers in der Bodenschicht 0 cm bis 10 cm (Feuchte 10) für verschiedene Geräte zur Unkrautregulierung 216

Tab. 19: Kenndaten wichtiger Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen 219

Tabellen im Anhang:

Tab. A1: Wissenschaftlicher Name, deutscher Name und Code von Unkräutern und Ungräsern 251

Tab. A2: Anbaudaten der Versuchsflächen 257

Tab. A3: Wachstumsverlauf des Mais (*Zea mays* L.) der Versuchsflächen 1996 - Variante Herbizid - 258

Tab. A4: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Weihenstephan für die Monate Mai, Juni und Juli im Jahr 1996 262

Tab. A5: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Donaubecken und Alpenvorland für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr 263

Tab. A6: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Bodensee für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr 264

Tab. A7: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Oberrheingraben für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr 265

Tab. A8: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Franken/Nördliches Baden-Württemberg für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr 266

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

α	Irrtumswahrscheinlichkeit (Fehler 1. Art)
a	Jahr
A	langfristiger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag
AB	Arbeitsbreite
Abb.	Abbildung
ADF	acid detergent fiber
ADL	acid detergent lignin
AKh	Arbeitskraftstunde(n)
AH	Abtrennhöhe
β	Irrtumswahrscheinlichkeit (Fehler 2. Art)
BBCH	BBCH-Code für Entwicklungsstadium
bzw.	beziehungsweise
$\varkappa$	Zykloidenkennwert (Geschwindigkeitskennwert der Zykloidenbahn)
C	Schneidrotor (cutter disc), Abschneiden
C	Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
ca.	circa
cm	Zentimeter
δ	Mittelwertdifferenz
et al.	et alies
EC	Entwicklungsstadium (= BBCH-Code)
f	Drehfrequenz, Umlauffrequenz, Drehzahl
F	Schlegelrotor (flail disc), Abschlegeln
FG(R)	Freiheitsgrade (Rest) = (Anzahl der Prüfglieder - 1) · (n - 1)
FHS	Formulierungshilfsstoff
fK	feste Kosten
h	Stunde
ha	Hektar
incl.	inclusive
K	Bodenerodierbarkeitsfaktor
K	Kontrolle
kW	Kilowatt
L	Faktor für Hanglänge

LA	Lohnansatz eigene Arbeit
m	Meter
M_d	Drehmoment
ME	Mindesteinsatzumfang
min	Minute
mm	Millimeter
M_{max}	maximales Drehmoment
m_{Messer}	Masse der Messerklinge
mS	Handentlaubung (manual stripping)
n	Anzahl der Wiederholungen
NN	Normal Null
ω	Winkelgeschwindigkeit
π	Kreiszahl = 3,141 592 653 589 793 = Umfang : Durchmesser
P	Erosionsschutzfaktor
P_{max}	maximale(r) Leistung(sbedarf)
r	Korrelationskoeffizient
R	Randbepflanzung
R	Regen- und Oberflächenabflußfaktor
S	Entlaubungsrotor (stripper), Entlauben
S	Faktor für Hangneigung
s_R	Standardabweichung$_{Rest}$
t	Tonne
t	t-Tabellenwert
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
UKDG	Unkrautdeckungsgrad
üV	Verrechungssatz für überbetriebliche Maschinenverwendung
v	Vorfahrtsgeschwindigkeit
VA	Vorauflauf
vK	variable Kosten
VS	vor der Saat
vSK	variable Kosten des Schleppers
WH	Wiederholung
WS	Wuchsstadium
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert

„Unkräuter sind Pflanzen,

deren Vorteile noch nicht entdeckt worden sind."

EMERSON 1912 [48]

1 Einleitung und Problemstellung

Für eine umweltgerechte, standortangepaßte und nachhaltige Landbewirtschaftung ist die Unkrautregulierung und der Bodenschutz bei Reihenkulturen von großer Bedeutung (ZSCHEISCHLER et al. 1984, HEITEFUSS 1994) [214, 79]. Aus ökologischen Gründen ist eine Einsparung insbesondere an Herbiziden sinnvoll, da ihr Anteil an den eingesetzten chemischen Pflanzenschutzmitteln ca. 60 % bis 80 % beträgt (HURLE 1994, NACHTIGALL 1994) [89, 148]. Besonders in landwirtschaftlichen Reihenkulturen wie Zuckerrüben oder Mais ist der Einsatz von mechanischen Geräten zur Unkrautregulierung eine Alternative zur chemischen Unkrautbekämpfung, da hier 80 % bis 100 % der eingesetzten Pflanzenschutzmittel Herbizide sind (ZSCHALER et al. 1995) [213]. Die bisher verfügbaren Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung wie z. B. die Hackmaschine oder der Hackstriegel arbeiten mit ihren Werkzeugen im Boden und lösen somit das Unkraut aus dem Oberboden (Abbildung 1). Sie reißen entweder die Unkrautpflanze samt ihres Wurzelwerks aus dem Oberboden heraus und legen sie an der Bodenoberfläche zum Abtrocknen ab oder sie versuchen, die Unkräuter mit

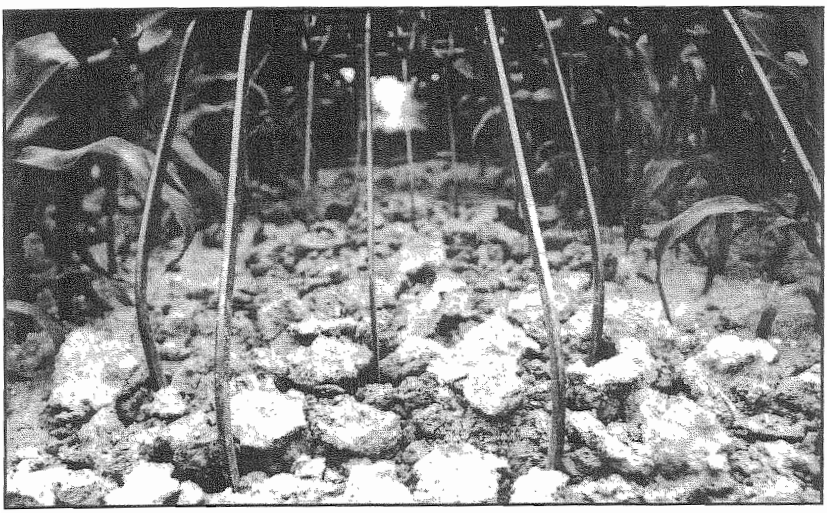


Abb. 1: Hackstriegel im Einsatz (Nahaufnahme)

lockerem Bodenmaterial zu verschütten, solange sie das Stadium des ersten Laubblattpaares noch nicht überschritten haben. Die Lockerung des Oberbodens im Zwischenreihenbereich von Reihenkulturen mit einem Reihenabstand, der 40 cm und mehr beträgt, hat jedoch zwei große Nachteile:

Zum einen wird dadurch ein neues Keimbett für Unkräuter geschaffen und deren erneutes Auflaufen begünstigt und gefördert (LOHUIS 1990) [134]. Zum anderen wird auf erosionsgefährdeten Standorten durch die Lockerung des Oberbodens der Erosion durch Wasser Vorschub geleistet, da die Maßnahmen zur Unkrautregulierung in der Zeit der häufigsten erosiven Niederschläge durchgeführt werden müssen (ROGLER und SCHWERTMANN 1981) [167]. Daher kann der Einsatz dieser Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich (z. B. Hackmaschine) in erosionsgefährdeten Hanglagen, vor allem bei schluffreichen Böden, zu erheblichen Erosionsschäden und Bodenabtrag führen (ESTLER 1990, ESTLER und KEES 1992, ESTLER 1995) [53, 56, 55] (Abbildung 2).

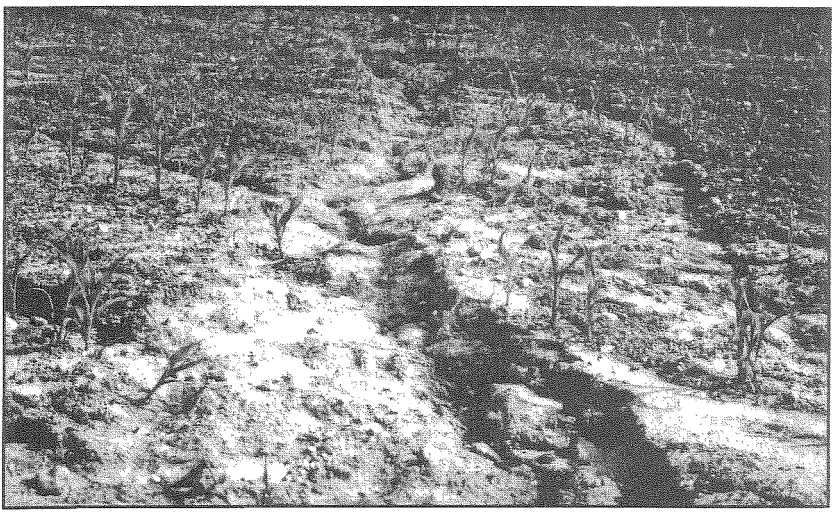


Abb. 2: Erosionserscheinungen in einem konventionell bestellten Mais (Standort Großenviecht bei Freising (Bayern), Juni 1996)

Die Bodenerosion führt nicht nur zu einem Verlust an wertvollem Oberboden samt den Pflanzennährstoffen, sondern auch zu einer Abschwämmung von chemischen Pflanzenschutzmitteln in den Vorfluter. Dies gilt insbesondere für Herbizide, die direkt auf den Boden aufgebracht werden. Der Eintrag von herbiziden Wirkstoffen und Pflanzennährstoffen wie Stickstoff und Phosphat in Gewässer kann neben einer Eutrophierung zu vielfältigen Störungen und Veränderungen dieses Ökosystems führen (WERNER und OLFS 1989, HAMM 1991 und 1993, FREDE und BACH 1993, HURLE, LANG und KIRCHHOFF 1993, DFG 1994) [206, 75, 76, 63, 92, 34]. Neben diffusen Einträgen von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer durch Abdrift (HIMEL et al.) [81], durch nasse oder trockene Deposition nach vorausgegangener Verdunstung von der Pflanzen- oder Bodenoberfläche (MAAS et al. 1988, NATIONS und HALLBERG 1992, IRMER et al. 1993) [136, 149, 94], durch kontaminiertes Dränagewasser (KLADIVKO et al. 1991) [103] oder durch eine Wirkstoffverlagerung mit dem Zwischenabfluß (LEONARD 1990) [132] wird als wichtigster Eintragspfad der Transport mit dem Oberflächenabfluß und Bodenabtrag bei erosiven Niederschlägen angesehen (FRANK et al. 1982, HURLE et al. 1993) [61, 92].

Nach § 1 des Gesetzes zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz) (Zweck) sind „Gefahren abzuwenden, die durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln oder durch andere Maßnahmen des Pflanzenschutzes, insbesondere für die Gesundheit von Mensch und Tier und für den Naturhaushalt, entstehen können" [67]. Der Naturhaushalt umfaßt die Bestandteile Boden, Wasser, Luft, Tier- und Pflanzenarten sowie das Wirkungsgefüge zwischen ihnen. Zudem ist in § 2a des Pflanzenschutzgesetzes (Durchführung des Pflanzenschutzes) die gute fachliche Praxis festgelegt, die die Beachtung der Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes und den Schutz des Grundwassers fordert und somit die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendige Maß beschränkt werden soll. Der Wirkstofftransport vom Applikationsort in benachbarte Ökosysteme ist zu vermeiden, insbesonders der Eintrag von chemischen Pflanzenschutzmitteln in das Grundwasser und in Oberflächengewässer. Der Verbleib der Wirksubstanzen in der Umwelt wird bestimmt durch Retention (z. B. Sorption an Bodenpartikel), Transformation (z. B. Abbau durch Mikroorganismen), Transport in andere Umweltkompartimente (z. B. Verflüchtigung) und

Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren (CHENG 1990) [30]. Die ökotoxikologische Bewertung der herbiziden Wirkstoffe im Hinblick auf Gewässerbiozönosen erfolgt im Rahmen der Zulassung der Pflanzenschutzmittel durch die Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft [20]. Die EG-Trinkwasserrichtlinie [166] und die Trinkwasserverordnung [195] geben eindeutige Grenzen der tolerierbaren Kontamination von Trinkwasser mit Pflanzenschutzmitteln vor: Für ein einzelnes Pflanzenschutzmittel beträgt der Grenzwert maximal 0,1 µg/l und die Summe aller Pflanzenschutzmittel darf maximal 0,5 µg/l erreichen. Für Oberflächengewässer, die nicht zur Trinkwassergewinnung herangezogen werden, sind noch keine gesetzlichen Regelungen festgelegt worden, jedoch wird die Diskussion geführt, die für Trinkwasser geltenden Grenzwerte zu übernehmen (IRMER et al. 1993) [94].

Das Gesetz zum Schutz des Bodens [66] verpflichtet in § 7 (Vorsorgepflicht) den Grundstückseigentümer sowie den Bewirtschafter, Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen z. B. durch Bodenerosion zu treffen. In § 17 des Bundesbodenschutzgesetzes ist die gute fachliche Praxis für die landwirtschaftliche Bodennutzung definiert. Demnach gilt der Grundsatz, daß „Bodenabträge durch standortangepaßte Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung, möglichst vermieden werden" [66]. Da die Bodenerosion durch Wasser von großer Bedeutung ist, wurde in § 8 der Bundes-Bodenschutzverordnung die „Gefahrenabwehr von schädlichen Bodenveränderungen auf Grund von Bodenerosion durch Wasser" geregelt [28].

Um den genannten Gesichtspunkten und den gesetzlichen Vorgaben für die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft gerecht zu werden, ist für erosionsgefährdete Hanglagen eine mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge anzustreben. Hierbei werden nur die oberirdischen Pflanzenteile der Unkräuter und Ungräser im Wuchs reguliert. Dieses neue Konzept der Unkrautregulierung bietet folgende Vorteile:

- Die natürliche Bodenstruktur und Bodenschichtung bleiben erhalten.

- Das Wurzelsystem und die oberirdischen Pflanzenteile der Unkräuter und Ungräser bleiben erhalten und tragen als „Pflanzenmulch" zur Stabilisierung der Bodenoberfläche bei („Konservierende Bodenbewirtschaftung").
- Verschlämmung und Verkrustung der Bodenoberfläche und Bodenerosion können vermindert werden.
- Der Einsatz kann zum optimalen Zeitpunkt für die Unkrautregulierung erfolgen, da die Werkzeuge nicht im Boden arbeiten und der Regulierungserfolg in geringerem Maße von der Bodenfeuchte abhängig ist.
- Der Einsatz an Herbiziden wird auf ein notwendiges Maß beschränkt und das Potential der Verlagerung herbizider Wirkstoffe in das Grundwasser und der Abdampfung in die Luft reduziert.
- Eine gezielte Regulierungswirkung auf mechanisch schwer bekämpfbare Wurzelunkräuter ist möglich.
- In der Jugendphase der Reihenkultur kann auswaschungsgefährdeter Stickstoff in Form von Unkräutern und Ungräsern fixiert werden.
- Die Bodenfauna und die bodennahe Fauna werden weitgehend geschont.
- Die Artenvielfalt im Agrarökosystem wird durch das zeitweilige Belassen der Unkräuter vergrößert.

Wenn durch dieses neue Konzept eine sichere Unkrautregulierung erreichbar ist, können Boden, Pflanze und Umwelt deutlich entlastet werden.

2 Stand des Wissens

Die Unkrautregulierung als Teilbereich des Pflanzenschutzes dient wie alle Maßnahmen des Pflanzenschutzes der Senkung von Ertragsverlusten, der Sicherung einer hohen Produktqualität und der Sicherung der Einnahmen aus der pflanzlichen Produktion bzw. der ausreichenden Versorgung mit qualitativ hochwertigem Futter. Im Rahmen einer Integrierten Pflanzenproduktion sind vor dem Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln - im Fall der Unkrautregulierung der Herbizideinsatz - alle anderen möglichen Maßnahmen auszuschöpfen. Dazu zählen zum einen die indirekten Maßnahmen wie die Fruchtfolge, die Anbautechnik und die Bodenbearbeitung (MEYER 1998) [143]. Zum anderen sind bei den direkten Maßnahmen neben den chemischen, biologische und physikalische Verfahren möglich. In der Praxis werden nur thermische und mechanische Verfahren im Rahmen der physikalischen Maßnahmen angewendet, da weitere physikalische Verfahren wie die Anwendung von Mikrowellen, Laserstrahlen oder Elektrizität (z. B. Hochspannung) [208, 155, 156, 115] aus sicherheitstechnischen Gründen und aufgrund eingeschränkter Anwendungsmöglichkeiten in der landwirtschaftlichen Praxis nicht verwendet werden (ESTLER 1991) [54]. Hierbei werden die mechanischen Verfahren gegenüber den thermischen Verfahren aus ökonomischen aber auch aus ökologischen Gründen bevorzugt angewendet (KLOOSTER 1983, NEMMING 1994) [106, 157]. BERTRAM 1994 [15] gibt aus wirtschaftlichen Gründen den mechanischen Verfahren bei einer Unkrautregulierung zwischen den Kulturpflanzenreihen den Vorzug.

Die mechanischen Verfahren der Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen gliedern sich in die Verfahren zur ganzflächigen Unkrautregulierung und zur Unkrautregulierung zwischen den Pflanzenreihen. Die ganzflächige mechanische Unkrautregulierung beschränkt sich im wesentlichen auf die Zeit vor der Saat (VS) und auf die Zeitspanne des Vorauflaufs (VA) (BAUMANN 1992) [13]. Meist kommt hier die Federzahnhackegge (Striegel) oder die Netzegge zum Einsatz. Bedingt durch den zeitlichen Verlauf des Unkrautaufwuchses liegt die Haupteinsatzzeit für die mechanische Unkrautregulierung nach dem Auflaufen (Nachauflauf, NA) der Kulturpflanzen. Dabei ist ein ganzflächiger Einsatz von

mechanischen Verfahren nicht mehr möglich, da ansonsten die Kulturpflanzen beschädigt werden. Deshalb werden die Unkräuter nur zwischen den Reihen reguliert. Ein Schutzstreifen von 25 cm bis 30 cm, in dem die Kulturpflanzenreihe steht, wird von diesen Geräten nicht bearbeitet. Nachfolgend werden die bisher verwendeten Geräte für den Zwischenreihenbereich vorgestellt und die Grenzen ihres Einsatzes unter verschiedenen Umweltbedingungen erläutert. Anschließend werden die Möglichkeiten zur Verminderung von Bodenerosion, die mögliche Technik der mechanischen Schädigung von oberirdischen Pflanzenteilen und Erkenntnisse von Voruntersuchungen zur mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge vorgestellt.

2.1 Geräte- und Verfahrenstechnik der bisherigen Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung zwischen den Kulturpflanzenreihen

Die Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich werden in unterschiedliche Gerätegruppen eingeteilt. ESTLER 1989 [52] unterscheidet zwischen gezogenen, abrollenden und über die Schlepperzapfwelle angetriebenen Geräten.

Zur mechanischen Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen werden zwischen den Kulturpflanzenreihen vor allem Reihenhackmaschinen, Hackstriegel, Rollhacken und Reihen(hack)fräsen eingesetzt. Eine Weiterentwicklung der mechanischen Geräte zur Unkrautregulierung ist die von WEBER 1997 [204] konzipierte „Weihenstephaner Trennhacke".

2.1.1 Gezogene Geräte

Zu den gezogenen Geräten der mechanischen Unkrautregulierung gehört die meist eingesetzte Reihenhackmaschine und der Hackstriegel, der vorwiegend in Flächenkulturen wie Getreide verwendet wird. Jedoch ist durch ein Entfernen oder Hochklappen der Federzinken auch ein Einsatz in Reihenkulturen möglich.

2.1.1.1 Reihenhackmaschine

Die Reihenhackmaschine, kurz Reihenhacke genannt, ist das im Reihenfruchtanbau bevorzugt eingesetzte Gerät zur mechanischen Unkrautregulierung, da sie für nahezu alle Standortbedingungen geeignet ist (KEES und ZELLNER 1994) [101]. Die Geräte bestehen aus einem Gerätetragrahmen mit einer Rahmenhöhe von 70 cm bis 75 cm, der meist als Universalklemmschiene ausgeformt ist, und parallelogrammgeführten Hackwerkzeugen (Abbildung 3). Einzelne Hersteller bieten auch eine Teleskopaufhängung der Hackwerkzeuge an. Die Tiefenführung der Werkzeuge erfolgt für jedes Parallelogramm über ein Stützrad und einen Spindeltrieb, so daß stufenlos die gewünschte Arbeitstiefe eingestellt werden kann. Zur Variation der Arbeitsbreite kann das einzelne Parallelogramm mit bis zu fünf Hackwerkzeugen bestückt werden. Zudem ist eine stufenlose seitliche Verstellung der Hackwerkzeuge an den Halterungen am Parallelogramm möglich. Die Reihenhacke kann somit für Reihenweiten von etwa 10 cm bis 75 cm verwendet werden.

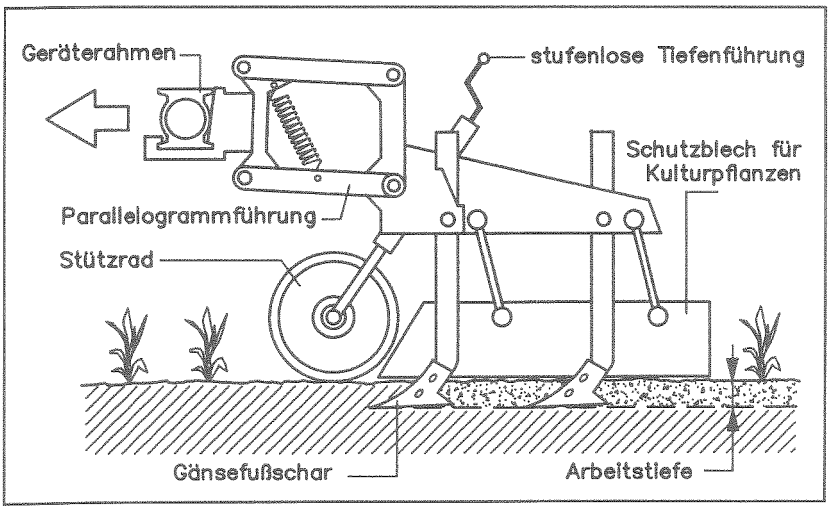


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Reihenhacke (Seitenansicht)

Als Hackwerkzeuge dienen entweder Gänsefußschare oder Winkelmesser oder schmale Lockerungsschare (ESTLER 1988) [51]. Diese sind in verschiedenen Breiten erhältlich, so daß unterschiedliche Arbeitsbreiten möglich sind. Bei gesteuerten Hackmaschinen, die im Heckanbau eine zweite Arbeitskraft als Steuermann benötigen, sind die Hackwerkzeuge an starren Halterungen befestigt. Selbstführende Hackmaschinen, die für die „1-Mann-Arbeit" ausgelegt sind, besitzen dagegen als Werkzeugträger S-förmige Federzinken oder halbgefederte Werkzeugträger. Als Werkzeuge werden meist Gänsefußschare eingesetzt (KÖLLER 1991, ESTLER und SEDLMEIER 1993) [110, 59], da sie leichter in verkrusteten Boden eindringen können und eine flache Bodenbearbeitung ohne Wurzelbeschädigung der Reihenfrüchte möglich ist.

Nach KOOLEN und KUIPERS 1983 [113] und SCHÜNKE 1993 [180] liegt die optimale Vorfahrtsgeschwindigkeit bei 6 km/h bis 8 km/h. Mit steigender Geschwindigkeit erhöht sich die Intensität der Bodenbearbeitung und der Zerkleinerungsgrad der herausgelösten Bodenaggregate. Die unkrautregulierende Wirkung beruht zum einen auf dem Verschütten von Unkräutern, da durch die keilförmige Ausformung der Gänsefußschare bei der Bearbeitung der obersten Bodenschicht Erde aufgeworfen wird, die kleine Unkräuter bedeckt. Zum anderen werden die Wurzeln von größeren Unkräutern abgeschnitten oder die Unkräuter nur unterschnitten, so daß die Bodenkapillaren durchtrennt sind und die Wasserversorgung unterbunden ist. Bei einer ausreichenden Überlappung der Arbeitsbreiten der Hackschare ist eine wirksame Bekämpfung von Wurzelunkräutern möglich (ESTLER und SEDLMEIER 1993) [59].

Durch die Anbringung von seitlichen Schutzblechen (Abbildung 3) oder Hohlschutzscheiben werden die jungen Pflanzen der Reihenfrüchte vor dem Verschütten geschützt. Bei einem Einsatz in größeren Kulturpflanzen kann durch ein Entfernen der seitlichen Schutzvorrichtungen und durch eine höhere Fahrgeschwindigkeit Bodenmaterial an die Kulturpflanzenreihe gehäufelt werden und dort Unkräuter verschüttet werden.

Gesteuerte Hackgeräte werden hauptsächlich in Reihenkulturen mit einem engeren Reihenabstand wie Zuckerrüben eingesetzt. In Weitreihenkulturen wie z. B. Mais kommt vorwiegend die selbstführende Hackmaschine zur Anwendung. Für eine exakte Führung entlang der Pflanzenreihen sind jeweils seitlich am Geräterahmen Scheibenseche, die ca. 10 cm in den Boden eingreifen, montiert. Damit ist auch ein sicherer Einsatz am Seitenhang bis 20 % Hangneigung ohne Beschädigung der Kulturpflanzen möglich (HOFFMANN 1991) [83].

Hackmaschinen für Reihenfrüchte sind mit einer effektiven Arbeitsbreite AB von 2,0 m bis 12,0 m verfügbar, so daß bei einer maximalen Arbeitsbreite von 12,0 m und einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 8 km/h eine theoretische Flächenleistung (ohne Wende- und Rüstzeiten) von 9,6 ha/h (0,8 ha/h·m AB) erreicht werden kann. Nach KTBL 2000 [126] liegt die tatsächlich erreichbare Flächenleistung mit einer effektiven Arbeitsbreite von 9,0 m bei 2,4 ha/h bis 3,3 ha/h je nach Schlaggröße (5 ha bis 20 ha). Die maximal erreichbare Flächenleistung bei einer Arbeitsbreite von 12,0 m liegt geschätzt bei ca. 3,8 ha/h (0,32 ha/h·m AB). Der Leistungsbedarf der Hackmaschinen beträgt etwa 9 kW/m AB bis 10 kW/m AB.

Der durchschnittliche Anschaffungspreis von Hackmaschinen nimmt mit zunehmender Arbeitsbreite durch die damit verbundenen höheren Anforderungen an die Gerätestabilität zu und liegt in der Höhe von etwa 1700,- DM/m AB bis 3400,- DM/m AB (NAWROTH 1998) [152].

2.1.1.2 Hackstriegel

Hackstriegel werden in Reihenkulturen meist zur ganzflächigen Unkrautregulierung vor der Saat und im Vorauflauf verwendet. Um den Einsatzbereich dieser Geräte zu erweitern, sind die Zinken der Zinkenfelder durch Öffnen eines Schnellverschlusses herausnehmbar oder hochklappbar, so daß der Bereich der Kulturpflanzenreihen bei der Bearbeitung ausgespart werden kann. Diese Möglichkeit bieten zwei Striegelhersteller an. Die Hackstriegel sind entweder mit runden Federzinken oder mit gefederten Flachstahlzinken, die im unteren Bereich in Fahrtrichtung gekröpft sind,

ausgerüstet. Der Auflagedruck kann entweder durch Zugfedern (Flachstahlzinken) oder durch Verdrehen der Befestigungswellen variiert werden.

Hinsichtlich der Bauart können zwei Typen unterschieden werden. Die eine Bauart ist der einer Hackmaschine ähnlich. An der Stützrad geführten Paralellogrammführung (Abbildung 3) ist anstatt der Gänsefußschare ein Zinkenfeld montiert. Die gesamte Arbeitsbreite wird über mehrere nebeneinander angeordnete Zinkenfelder abgedeckt. Die zweite Bauart hat die Zinkenfelder in einen robusten Rahmen eingebaut, der direkt mit dem 3-Punkt-Anbaubock verbunden ist. Die Tiefenregulierung erfolgt zentral für die gesamte Arbeitsbreite über die 3-Punkt-Hydraulik des Schleppers und Tasträder, die in der Schlepperspur angeordnet sind. Da die Rahmenhöhe maximal 50 cm beträgt, ist der Einsatz auf das frühe Jugendstadium der Kulturpflanze begrenzt. Zur Selbstführung und seitlichen Stabilisierung sind Hackstriegel mit zwei Scheibensechen zwischen den beiden hinteren Zinkenreihen ausgerüstet.

Bei beiden Bauarten können den Striegelfeldern Hackvorsätze mit z. B. Gänsefußscharen vorgeschaltet werden, die den Boden streifenförmig aufbrechen und die Unkräuter aus dem Oberboden herauslösen sollen. Die nachfolgenden Striegelzinken können dadurch besser in den Boden eindringen und die gelockerten Bodenaggregate zerkleinern. Bei der Passage durch das Zinkenfeld werden die Wurzeln großer Unkräuter enterdert und weitgehend an der Bodenoberfläche abgelegt. Unkräuter im Keimblattstadium werden durch die bewegte lose Erde verschüttet.

Hackstriegel werden mit einer Arbeitsbreite von 3,0 m bis 24,0 m angeboten. Nach SCHÜNKE 1993 [180] beträgt die optimale Einsatzgeschwindigkeit zur Unkrautregulierung 8 km/h bis 10 km/h. Bei einem Einsatz in wachsenden Reihenfrüchten können Hackstriegel jedoch je nach Bodenzustand nur mit einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 6 km/h bis 9 km/h (KÖLLER 1991, NAWROTH 1998) [110, 152] gefahren werden, damit keine Pflanzenverluste entstehen. Die theoretische Flächenleistung (ohne Wende- und Rüstzeiten) bei einer maximalen Arbeitsbreite von 24,0 m liegt bei 21,6 ha/h (0,9 ha/h·m AB). Die tatsächlich erreichbare Flächenleistung mit einer effektiven Arbeitsbreite von 24,0 m beträgt nach KTBL 2000

[126] 12 ha/h (0,50 ha/h·m AB) bei einer Schlaggröße von 2 ha bis 13 ha/h (0,54 ha/h·m AB) bei einer Schlaggröße von 20 ha. In Reihenkulturen sind jedoch nur Flächenleistungen von 0,25 ha/ h·m AB bis 0,35 ha/ h·m AB möglich. Für die Hackstriegel ist der Leistungsbedarf abhängig von dem Einsatz eines Hackvorsatzes. Ohne Hackvorsatz sind zur Arbeitserledigung etwa 6 kW/m AB bis 8 kW/m AB nötig, dagegen mit einer Vorschaltung von Hackwerkzeugen werden wie bei der Hackmaschine 10 kW/m AB gebraucht. Der durchschnittliche Anschaffungspreis liegt im Bereich von 1300,- DM/m AB bis 2500,- DM/m AB. Je größer die Gesamtarbeitsbreite ist, desto höher liegt der Preis pro Meter Arbeitsbreite, da die größeren Hebelkräfte nur über eine verstärkte Konstruktion aufgefangen werden können.

2.1.2 Abrollende Geräte

Die abrollenden Geräte werden wie die gezogenen Geräte vom Schlepper gezogen. Die Arbeitswerkzeuge sind gegenüber den gezogenen Geräten nicht starr oder gefedert sondern abrollend. In landwirtschaftlichen Reihenkulturen werden vor allem Rollhacken eingesetzt. Die Neuentwicklung Bügelhacke mit ihren abrollenden Jätekörben ist bisher nur in gärtnerischen Kulturen wie Möhren erprobt worden (PETZOLD 1999) [162]. Ein Einsatz in landwirtschaftlichen Reihenkulturen ist denkbar, da das Gerät ohne Probleme mit Arbeitsbreiten größer 3 m gefertigt werden kann.

2.1.2.1 Rollhacke

Rollhacken - auch Sternhackgeräte genannt - werden in der Praxis aufgrund der einfachen und robusten Bauweise, der geringen Verstopfungsanfälligkeit, der Möglichkeit des Anhäufelns und der hohen möglichen Vorfahrtsgeschwindigkeit eingesetzt (KÖLLER 1991) [110]. Sie bestehen wie die Reihenhackmaschine aus einem Geräterahmen mit einer Rahmenhöhe bis 70 cm, mit angeflanschten Parallelogrammen, an denen die Hackwerkzeuge befestigt sind (Abbildung 4). Anstatt der

Lockerungsschare sind an den zentralen Befestigungsholmen Hackeinheiten mit je zwei Hackstern- oder Hackscheibenaggregaten angebracht. Das jeweilige Aggregat besitzt meist vier Hacksterne oder Hackscheiben, die entweder auf einer Welle montiert sind oder jeweils einzeln drehbar aufgehängt sind. Die separate Aufhängung der Hacksterne ist wartungsfreundlicher, da ein Auswechseln defekter Hacksterne schneller erfolgen kann.

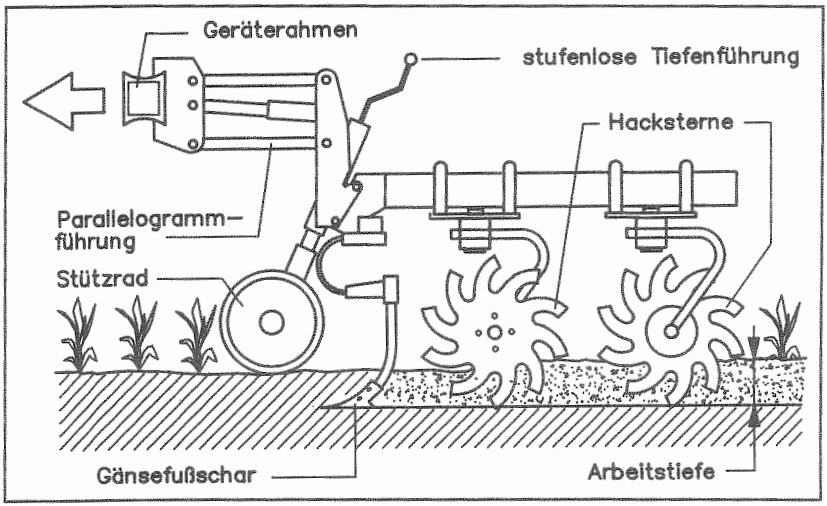


Abb. 4: Schematische Darstellung einer Rollhacke (Seitenansicht)

Die Hackstern- bzw. Hackscheibenaggregate sind wie bei einer Scheibenegge mit V-förmig angeordneten Scheibeneggenelementen schräg zur Fahrtrichtung angeordnet. Über ein arretierbares Drehgelenk am zentralen Holm ist der Anstellwinkel für jedes einzelne Aggregat veränderbar. Da der Befestigungsholm als Rohr ausgebildet ist, kann zudem das einzelne Aggregat in seinem Neigungswinkel quer zur Fahrtrichtung eingestellt werden, in dem die Klemmvorrichtung für das einzelne Aggregat am Holm gelöst und in einer neuen Position arretiert wird.

Die Rollhacke kann durch ein seitliches Verschieben der Hacksternaggregate an verschiedene Zwischenreihenabstände angepaßt werden, da die Halterungsschienen der einzelnen Hacksterne unterhalb des Drehpunktes für den Anstellwinkel mit einem Langloch versehen sind. Zudem können die einzelnen Hackeinheiten auf dem Trägerrahmen verschoben werden, so daß die Rollhacke der jeweiligen Reihenweite der Kultur und unterschiedlichen Sicherheitsabständen individuell angepaßt werden kann. Die Gesamtarbeitsbreite wird wie bei der Hackmaschine durch die Anzahl der nebeneinander angeordneten Hackeinheiten bestimmt.

Durch Veränderung des Anstellwinkels und des Neigungswinkels der Hacksternaggregate, auch Hackgruppen genannt, kann entweder der Boden von der Pflanzenreihe weg bewegt oder zur Pflanzenreihe hingehäufelt werden. Durch das Anhäufeln ist auch im Bereich der Kulturpflanzenreihe eine teilweise Unkrautunterdrückung möglich. Dort werden wie im Zwischenbereich die Unkräuter vorwiegend durch ein Bedecken mit Erde bekämpft. Jedoch ist bei kleinen Kulturpflanzen ein ausreichender Sicherheitsabstand von mindestens 15 cm einzuhalten (SCHÜNKE 1993) [180].

Die Arbeitstiefe der Hacksterne bzw. Hackscheiben kann durch Veränderung des Auflagedrucks variiert werden. Der Auflagedruck kann durch eine Erhöhung der Federspannung einer Feder, die in jeder Parallelogrammführung eingebaut ist, für jede einzelne Hackeinheit individuell erhöht werden, so daß auch im Bereich der Schlepperspuren eine befriedigende Arbeit geleistet werden kann. Die passende Einstellung für die jeweiligen Verhältnisse ist sehr arbeitsaufwendig und kompliziert (WALTER 1995) [197], da viele einzelne Schrauben gelöst und wieder angezogen werden müssen. Trotz der Verstellmöglichkeit des Auflagedruckes kann bedingt durch das Prinzip des Bodenantriebs nur eine begrenzte Arbeitstiefe erreicht werden (HOFFMANN 1991) [83]. Nach LOHUIS 1990 [134] und KEES und ZELLNER 1994 [101] sind deshalb Sternhackgeräte vor allem für leichtere, lockere Böden ohne Verkrustung geeignet, da sie auf schweren und harten Böden nicht tief genug in den Oberboden eindringen.

Zum Aufbrechen von stark verkrusteten Böden können den Hacksternen breitschneidende Gänsefußschare vorgeschaltet werden (Abbildung 4). Dadurch wird der

oberste Bodenhorizont aufgelockert und die nachfolgenden Hacksterne können besser in den Boden eingreifen. Dies führt zu einer Verbesserung der Arbeitsqualität unter diesen Bedingungen. Zudem schneidet das Gänsefußschar Wurzelunkräuter ab, die bei einem alleinigen Einsatz von Hacksternen nicht bekämpft werden würden (HOFFMANN 1991) [83].

Für eine optimale Unkrautregulierung sind nach SCHÜNKE 1993 [180] mindestens 8 km/h nötig. KÖLLER 1991 [110] und ESTLER und SEDLMEIER 1993 [59] nennen Arbeitsgeschwindigkeiten von 8 km/h bis 12 km/h je nach Bodenzustand. KEES und ZELLNER 1994 [101] geben die maximale Einsatzgeschwindigkeit mit 10 km/h an. Rollhacken werden für den Heck- und Zwischenachsanbau mit einer Arbeitsbreite von 3,0 m bis 6,0 m angeboten. Eine Ausstattung mit zwei seitlich laufenden Scheibensechen zur Stabilisierung des Gerätes ist Standard. Damit ist eine „1-Mann-Arbeit" ohne einen zusätzlichen Steuermann möglich. Theoretisch kann bei einer Arbeitsbreite von 6,0 m eine Flächenleistung von 4,8 ha/h (6,0 ha/h) bzw. 0,8 ha/h·m AB (1,0 ha/h·m AB) erreicht werden, wenn die Vorfahrtsgeschwindigkeit 8 km/h (10 km/h) beträgt. Nach KTBL 2000 [126] liegt jedoch die maximale tatsächliche Flächenleistung mit Berücksichtigung der Wende- und Nebenzeiten bei einer Feldstücksgröße von 20 ha und einer Arbeitsbreite von 6,0 m bei 4,1 ha/h (0,68 ha/h·m AB). Als Leistungsbedarf sind für die Rollhacke etwa 12 kW/m AB bis 17 kW/m AB anzusetzen.

Die Anschaffungskosten einer Rollhacke betragen je nach Arbeitsbreite 2600,- DM/m AB bis 3800,- DM/m AB (NAWROTH 1998) [152]. Mit zunehmender Arbeitsbreite steigt der Preis je Meter Arbeitsbreite an.

2.1.2.2 Bügelhacke

Die Bügelhacke besitzt zwei nacheinander geschaltete bodenangetriebene Stabwälzeggen, die über einen Kettenantrieb miteinander verbunden sind. Sie entspricht dem Prinzip von Drahtkrümelwalzen als Nachläufer bei Saatbettkombinationen (LANG 1996) [129]. Die Jätekörbe sind mit je acht U-förmigen Bügeln aus Rundstahl mit

einem Durchmesser von etwa 8 mm bestückt. An den Antriebswellen der Jätekörbe sind Zahnräder von unterschiedlicher Größe montiert. Die Verbindung der Zahnräder mit einer Kette bewirkt ein Übersetzungsverhältnis. Die Übersetzung ist so gewählt, daß sich der hintere Korb schneller als der vordere dreht. Auf diese Weise sollen Unkräuter im Jugendstadium wirksam durch Entwurzeln und Verschütten reguliert und verkrustete Bodenoberflächen aufgebrochen werden. Gegenüber der Hackmaschine erfolgt bei der Bügelhacke die Bodenbewegung nur in Fahrtrichtung rückwärts und nicht zur Seite. Dadurch besteht für kleine Kulturpflanzen nicht die Gefahr des Verschüttens. Somit kann der Sicherheitsabstand zu den Kulturpflanzenreihen auf das Maß reduziert werden, das keine Wurzelverletzungen befürchten läßt. In der Praxis beträgt der Sicherheitsabstand je nach Kultur und deren Entwicklungsstadium 10 cm bis 20 cm. Die Arbeitstiefe kann im Bereich von 1 cm bis 4 cm Tiefe über den hydraulischen Schlepperkraftheber und die Länge des Oberlenkers eingestellt werden.

Die Bodenanpassung erfolgt durch die Aufteilung der Arbeitsbreite in mehrere Teile, die jeweils über ein zentrales Drehgelenk mit dem Haupttragrahmen verbunden sind. Am Schlepper kann die Bügelhacke in allen drei Anbauräumen (Front, Zwischenachs und Heck) angebaut werden. Die Bügelhacke ist mit Arbeitsbreiten von 1,5 m bis 6,0 m erhältlich. Konstruktionsbedingt können Bügelhacken erst ab Reihenweiten von 25 cm verwendet werden.

Die Einsatzgeschwindigkeiten der Bügelhacke liegen bei 6 km/h bis 9 km/h. Bei einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 9 km/h und einer Arbeitsbreite von 6,0 m kann eine maximale theoretische Flächenleistung von 5,4 ha/h (0,9 ha/h·m AB) erzielt werden. Die Flächenleistung mit Berücksichtigung der Rüst- und Wendezeiten liegt wie bei der Rollhacke bei etwa 3,0 ha/h (0,5 ha/h·m AB). Der spezifische Leistungsbedarf beträgt etwa 6 kW/m AB bis 8 kW/m AB. Für die Investition einer Bügelhacke sind ungefähr 2000,- DM/m AB zu veranschlagen.

2.1.3 Angetriebene Geräte

Bei den angetriebenen Geräten werden horizontal und vertikal rotierende Geräte unterschieden. Vertreter der horizontal rotierenden Geräte sind umgebaute Kreisel- oder Rüttel- bzw. Pendeleggen mit über den Pflanzenreihen entfernten Zinken und horizontal rotierende Reihenhackbürsten. Aufgrund der sehr geringen Bau- bzw. Rahmenhöhe von maximal 25 cm bis 30 cm (ESTLER 1988, HOFFMANN 1991) [51, 83] und einem unzureichenden Unkrautregulierungeffekt haben sich die umgebauten Zapfwelleneggen in der Praxis nicht bewährt (WALTER 1995) [197]. Die horizontal rotierenden Reihenhackbürsten haben sich aufgrund der aufwendigen Konstruktion, des hohen Anschaffungspreises, einer geringen Bodenschonung und einer infolge der begrenzten Vorfahrtsgeschwindigkeit von 4 km/h bis 5 km/h geringen Schlagkraft in der Praxis nicht durchsetzen können. Deshalb sind sie am Markt nicht mehr erhältlich. Bei Trockenheit führte der Einsatz dieser Reihenhackbürsten zu einer sehr großen Staubentwicklung. Wenn der Oberboden zu feucht war, wurde er durch die rotierende Bewegung der Polypropylen- oder Metallbürsten zugeschmiert, so daß der Gasaustausch behindert wurde (ESTLER und SEDLMEIER 1993) [59]. Der Einsatz von rotierenden Federzinken anstatt von Bürstentellern konnte die Probleme nur geringfügig verbessern.

Zu den vertikal rotierenden Geräten gehört die Reihen(hack)fräse, die vertikal rotierende Reihenhackbürste und die Neuentwicklung „Weihenstephaner Trennhacke". Die vertikal rotierende Reihenhackbürste ist nur mit einer maximalen Arbeitsbreite von 2,70 m erhältlich. Da nach WEBER 1992 [200] und WEBER 1994 [201, 202] der sichere Bekämpfungserfolg dieses Reihenhackbürstentyps von der erreichten Arbeitstiefe und der damit verbundenen optimalen Vorfahrtsgeschwindigkeit von 2,5 km/h abhängig ist, können nur geringe Flächenleistungen erzielt werden. Die theoretische Flächenleistung der vertikal rotierenden Reihenhackbürste erreicht somit nur Werte von etwa 0,7 ha/h bis maximal 1,0 ha/h. Aufgrund der genannten Leistungsdaten ist dieses Gerät nur für den Einsatz in intensiven Gartenbaukulturen gedacht (SEDLMEIER 1992) [185]. Vorteilhaft ist jedoch, daß durch die Verwendung von Reihenschutztunneln der unbearbeitete Sicherheitsstreifen je nach Kultur auf 4 cm bis 5 cm begrenzt werden kann (KRESS 1987, ASCARD 1993) [114, 4].

Aufgrund der genannten Gründe wird in landwirtschaftlichen Reihenkulturen als angetriebenes Gerät fast nur die Reihen(hack)fräse verwendet. Ein Einsatz der „Weihenstephaner Trennhacke" ist in landwirtschaftlichen Reihenkulturen ebenfalls denkbar, da mit zunehmender Einsatzgeschwindigkeit keine geringere Unkrautregulierungswirkung festgestellt werden konnte (WEBER 1997) [204]. Deshalb werden diese beiden Geräte nachfolgend näher erläutert.

2.1.3.1 Reihen(hack)fräse

Die Reihenhackfräse, meist nur Reihenfräse genannt, besteht aus nebeneinander angeordneten Fräselementen, die mit gekröpften Fräsmessern bestückt sind (Abbildung 5). Die einzelnen Fräselemente sind pendelnd an einem Geräterahmen, der eine Rahmenhöhe von etwa 60 cm aufweist, befestigt. Die Tiefenregulierung erfolgt über die Veränderung der Spannung einer Schraubenfeder und fungiert zudem als Steinsicherung. Auf verhärteten, trockenen Böden ist trotzdem zu beobachten, daß die gewünschte Arbeitstiefe nicht immer eingehalten wird (ESTLER 1988) [51].

Der mechanische Antrieb erfolgt von der Schlepperzapfwelle über ein Winkelgetriebe zentral auf eine Antriebswelle, die die einzelnen Fräsaggregate antreibt. Das einzelne Fräsaggregat wird mit einer Kette angetrieben (Abbildung 5). In Abhängigkeit der Arbeitsbreite des einzelnen Fräsaggregates, die von 15 cm bis 100 cm reichen kann, sind auf der Fräswelle zwei oder mehrere Halterungen mit je vier Fräsmessern angebracht. Somit kann durch das Hinzufügen oder Entfernen von einzelnen Frässegmenten die Breite des Fräsaggregates variiert werden und an unterschiedliche Reihenabstände und Entwicklungsstadien der Kultur angepaßt werden (ESTLER und SEDLMEIER 1993) [59].

Die Umfangsgeschwindigkeit der Fräsmesser beträgt meist 4 m/s bis 6 m/s. Bei einzelnen Herstellern ist die Umfangsgeschwindigkeit der Hackmesser stufenlos verstellbar und kann damit an unterschiedliche Bodenzustände angepaßt werden. Für die Intensität der Bearbeitung ist die Bissenlänge entscheidend. Die Bissenlänge ist das Verhältnis von Vorfahrtsgeschwindigkeit zu der Drehzahl der Rotorwelle

und der Anzahl an Hackmessern. Je kleiner der Wert der Bissenlänge ist, desto intensiver wird der Boden bearbeitet. Durch die hohe Geschwindigkeit an der Werkzeugspitze, die nach KOOLEN und KUIPERS 1983 [113] bis 8 m/s erreichen kann, ist eine intensive Bodenbearbeitung gewährleistet. Jedoch kann die Bodenbearbeitung besonders auf leichteren Böden so intensiv sein, daß die Bodenaggregate sehr klein zerschlagen werden und es dadurch zu einer Verschlämmung der Bodenoberfläche und zu Bodenerosion kommen kann (LOHUIS 1990, HOFFMANN 1991, ESTLER und SEDLMEIER 1993) [134, 83, 59].

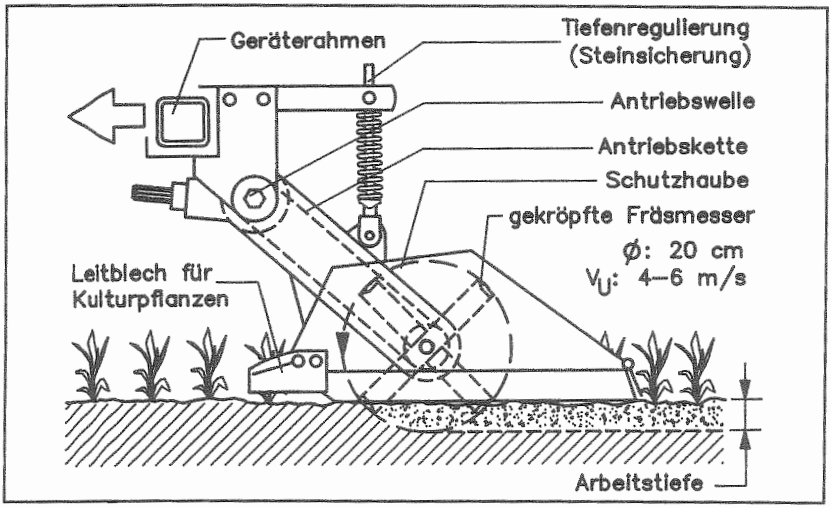


Abb. 5: Schematische Darstellung einer Reihenfräse (Seitenansicht)

Die rotierenden Fräsmesser schneiden den Oberboden mitsamt den Unkräutern ab und werfen das Bodenmaterial gegen die Schutzhaube, die als Prallblech fungiert. Nach GEYER et al. 1991 [68] werden die Unkräuter kaum zerschnitten. Die Regulierung erfolgt durch ein Vergraben und einer Bedeckung mit dem zerkleinerten Boden. Oberflächlich abgelegte Unkrautpflanzen, deren Wurzeln Bodenkontakt besitzen, können ihr Wachstum meist fortsetzen. Zudem bewirkt der Einsatz einer Reihenfräse eine Zerteilung der Rhizome von Wurzelunkräutern in viele einzelne

Stücke, so daß langfristig Wurzelunkräuter vermehrt und auf weitere Anbauflächen verschleppt werden (DIERAUER und STÖPPLER-ZIMMER 1994) [40].

Für den Einsatz in landwirtschaftlichen Reihenkulturen benötigen Reihenfräsen eine Antriebsleistung von etwa 12 kW/m AB. Die Hersteller bieten Geräte mit Arbeitsbreiten von 3,0 m bis 4,5 m an. Der Anschaffungspreis ist bedingt durch die aufwendige Konstruktion mit 5000,- DM/m AB bis 6600,- DM/m AB sehr hoch (LOHUIS 1990, NAWROTH 1998) [134, 152].

ESTLER 1988 [51], LOHUIS 1990 [134] und SCHÜNKE 1993 [180] geben die optimale Vorfahrtsgeschwindigkeit mit 3 km/h bis 5 km/h an. Wenn eine Arbeitsbreite von 4,5 m und eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h unterstellt wird, beträgt die maximale theoretische Flächenleistung (ohne Wende- und Rüstzeiten) 2,2 ha/h (0,49 ha/h·m AB). In der Praxis kann bei einer Arbeitsbreite von 4,5 m eine Flächenleistung von etwa 1,5 ha/h (0,33 ha/h·m AB) erreicht werden. Deshalb nimmt der Einsatz in landwirtschaftlichen Kulturen nur einen begrenzten Umfang ein, da die Arbeitsleistung gering und zudem der Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit des Steinbesatzes meist hoch ist (SEDLMEIER 1992) [185].

2.1.3.2 Weihenstephaner Trennhacke

Das Konzept der Weihenstephaner Trennhacke besteht in einer Kombination von gezogenen Hackwerkzeugen und einem hydraulisch angetriebenen Rotorstriegel (Abbildung 6). An einer Profilschiene sind vor der Rotorwelle des Rotorstriegels breite Gänsefußschare montiert, die den Boden aufbrechen und die Unkräuter in einer notwendigen Arbeitstiefe von etwa 3 cm unterschneiden. Der Abstand von der Unterkante der Gänsefußschare zum unteren Scheitelpunkt des Rotationsstriegels beträgt etwa 3 cm. Der Rotor mit einem Durchmesser von 50 cm wird von einem Gerotor-Motor angetrieben, dessen Drehzahl stufenlos in einem Regelbereich von 80 l/min bis 100 l/min verändert und somit die Intensität der Bearbeitung beeinflußt werden kann (WEBER 1996, WEBER 1997) [203, 204].

In den von den Hackscharen aufgeworfenen Boden mitsamt den herausgelösten Unkräutern greifen die rotierenden Federzinken mit 6 mm Durchmesser ein und trennen Erde und Unkräuter. Mit variierbaren Umfangsgeschwindigkeiten von etwa 3,5 m/s bis 13 m/s an der Spitze der rotierenden Federzinken entfernen die rotierenden Federstahlzinken den Erdanhang der Unkrautwurzeln und legen die gesäuberten Unkrautpflanzen an der Bodenoberfläche zum Vertrocknen ab. Ein Wiederanwachsen der Unkräuter konnte in Versuchen nicht beobachtet werden (WEBER 1997) [204].

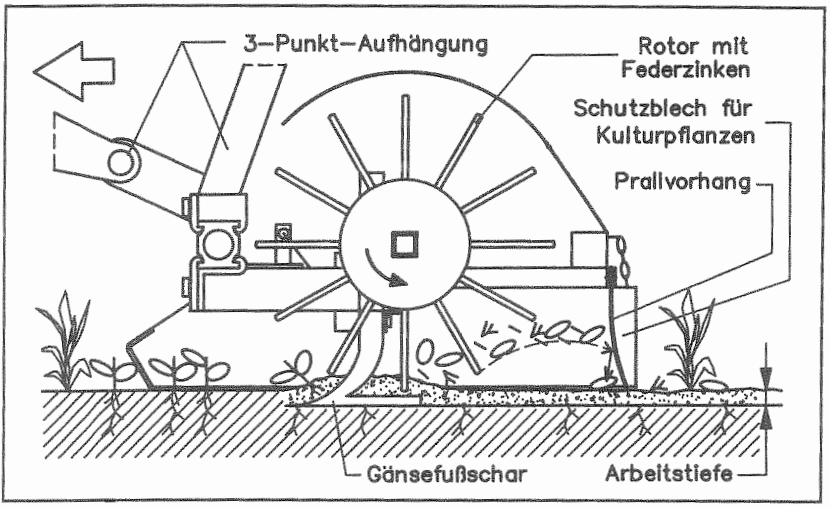


Abb. 6: Schematische Darstellung der Weihenstephaner Trennhacke (Seitenansicht)

Die Geschwindigkeit der hydraulisch angetriebenen Trennvorrichtung läßt sich unabhängig von der Motordrehzahl und der Vorfahrtsgeschwindigkeit den Arbeitsbedingungen anpassen. Damit ist eine sichere Enterdung der Unkrautwurzeln auch unter feuchten Einsatzbedingungen gewährleistet. Gegenüber den bereits vorgestellten Geräten zur mechanischen Unkrautregulierung können mit der Verwendung der Trennhacke die witterungsbedingten Einsatzgrenzen ausgeweitet werden, da durch die zweistufige Arbeitsweise der Trennhacke eine weitgehende Entkopplung

von Arbeitsgeschwindigkeit, Bodenbedingungen, Unkrautgröße und Kulturzustand im Hinblick auf den Regulierungserfolg erreicht wurde. Die Entwicklung der Weihenstephaner Trennhacke macht eine bodenstrukturschonende Arbeitsweise und einen optimalen Bekämpfungserfolg möglich (WEBER 1996, WEBER 1997, MEYER und WEBER 1998) [203, 204, 145].

Wie bei vertikal rotierenden Reihenhackbürsten übernehmen Schutztunnels den Schutz der Kulturpflanzen vor aufgeworfener Erde. Der Einsatz in landwirtschaftlichen Reihenkulturen wird durch die geringe Durchgangshöhe bedingt durch die horizontal durchgehende Welle des Striegelrotors auf die frühe Jugendphase bis zu einer Wuchshöhe von etwa 20 cm begrenzt. Die Trennhacke wurde bisher mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 4 km/h bis 5 km/h getestet. Nach Aussagen des Entwicklers sind Vorfahrtsgeschwindigkeiten bis 9 km/h möglich (NAWROTH 1998) [152].

Die Weihenstephaner Trennhacke ist momentan nur in Arbeitsbreiten von 1,5 m und 2,0 m verfügbar, da sie für den Bereich der gärtnerischen Beetkulturen konzipiert worden ist. Arbeitsbreiten bis 4,5 m sind technisch realisierbar. Die maximal theoretische Flächenleistung ohne Wende- und Rüstzeiten bei einer Arbeitsbreite von 4,5 m und einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 5 km/h (9 km/h) beträgt 2,3 ha/h (4,1 ha/h) bzw. 0,51 ha/h·m AB (0,9 ha/h·m AB). Bei einer Arbeitsbreite von 3 m sind theoretische Flächenleistungen von 1,5 ha/h bis 2,7 ha/h möglich. Angaben über die tatsächlich erreichbare Flächenleistung liegen nicht vor. Sie wird bei etwa der Hälfte der theoretisch möglichen Flächenleistung liegen und 0,25 ha/h·m AB bis 0,30 ha/h·m AB betragen. Der Anschaffungspreis der Trennhacke liegt bei etwa 3300,- DM/m AB bis 3500,- DM/m AB. Für den Leistungsbedarf sind Werte von ca. 10 kW/m AB, ähnlich wie für die Hackmaschine, anzusetzen.

2.2 Grenzen und Auswirkungen des Einsatzes bisheriger Geräte unter verschiedenen Umweltbedingungen

Die in Kapitel 2.1 vorgestellten Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung erreichen eine ausreichende Wirkung gegen Unkräuter meist nur bei kleinen Unkräutern in der Keimblattphase (HOFFMANN 1991) [83]. Sie reißen entweder die Unkrautpflanze samt ihres Wurzelwerks aus dem Oberboden heraus und legen sie an der Bodenoberfläche zum Abtrocknen ab oder sie versuchen, die Unkräuter mit lockerem Bodenmaterial zu verschütten, solange das Stadium des ersten Laubblattpaares noch nicht überschritten ist. Größere Unkräuter können nur bei Einsatz der Reihen(hack)fräse und der Neuentwicklung „Weihenstephaner Trennhacke" wirksam bekämpft werden. Neben der durch die geringe optimale Vorfahrtsgeschwindigkeit von maximal 5 km/h begrenzten Flächenleistung ist der Einsatz der Reihenfräse hinsichtlich der veränderten Bodenstruktur kritisch zu betrachten. Die Bodenaggregate werden durch das Arbeitsprinzip der Fräse meist zu sehr zerkleinert, so daß bei nachfolgenden Niederschlägen die Verschlämmungsgefahr wesentlich erhöht ist. Zudem ist bei feuchten Bodenbedingungen oder nachfolgendem Regen der Erfolg der Unkrautregulierungsmaßnahme gering, da die Wurzeln der Unkräuter nicht vollständig enterdet werden und die Unkräuter wieder anwachsen. Im Vergleich zu den anderen Geräten erreicht nur die Neuentwicklung „Weihenstephaner Trennhacke" eine sichere Wirkung unter feuchteren Bedingungen. Sie arbeitet bodenschonender und erhöht den Anteil kleiner Bodenpartikel in geringerem Umfang (WEBER 1997) [204].

Bei massiver Verunkrautung oder größeren Unkräutern besteht die Gefahr, daß die Werkzeuge der meist eingesetzten Hackmaschine verstopfen. Zudem werden die großen Unkräuter nicht ausreichend verschüttet und wachsen wieder an.

Alle Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung arbeiten mit ihren Werkzeugen im Oberboden. Bei zu tiefer Einstellung der Werkzeuge und zu schmalem Schutzstreifen werden die Wurzeln der Kulturpflanzen geschädigt. Deshalb ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zur Kulturpflanzenreihe notwendig, damit Wurzelverletzungen, die Wachstumsdepressionen zur Folge haben, vermieden werden.

ESTLER 1985 [50] und HEPTING 1991 [80] geben für die Kultur Mais genaue Werte für den Abstand zur Pflanzenreihe und für die maximale Arbeitstiefe je nach Entwicklungsstadium des Maises an. Dadurch verbleibt ein unbearbeiteter Schutzstreifen von meistens 30 cm, der entweder chemisch, thermisch oder durch Handarbeit von den Unkräutern befreit werden muß, da in der Kulturpflanzenreihe die Konkurrenzwirkung der Unkräuter am höchsten ist (HURLE und KEMMER 1988, ESTLER et al. 1992, KUHLMANN 1992) [91, 58, 123].

Die mechanische Unkrautregulierung hat den Zusatzeffekt, daß der Boden gelockert und somit der Gasaustausch im Oberboden verbessert wird, insbesonders dann, wenn die Bodenoberfläche verschlämmt ist. Zudem erwärmt sich der Oberboden besser und die Stickstoffmineralisierung wird gefördert. In Trockengebieten oder in Gebieten mit einer ausgeprägten Sommertrockenheit dient der Einsatz der Hackmaschine nicht nur der Unkrautbekämpfung, sondern auch der Brechung der Kapillaren im Boden. Dies führt zu einer wesentlichen Reduzierung der Verdunstung und hält wertvolles Bodenwasser für die Kulturpflanze verfügbar. Wenn das vorwiegende Ziel des Einsatzes der Hackmaschine die Bodenlockerung ist, dann sollten schmälere Schare montiert werden. Im Gegensatz dazu wird die unkrautregulierende Wirkung durch breite Schare verbessert. Die Bodenbearbeitung sollte relativ grob erfolgen, da nachfolgend eine geringere Verschlämmung und Verkrustung befürchtet werden muß. Deshalb wird der Einsatz S-förmiger Federzinken als Werkzeughalter empfohlen.

Diese Doppelwirkung hinsichtlich Unkrautbekämpfung und Bodenlockerung ist bei verschlämmter und verkrusteter Bodenoberfläche zwar vorteilhaft, jedoch wird in Hanglagen durch die Lockerung des Oberbodens im Zwischenreihenbereich der Bodenerosion durch Wasser Vorschub geleistet, da die Arbeiten zur Unkrautregulierung in der Zeitspanne der meisten erosiven Regen durchgeführt werden müssen (ESTLER und SEDLMEIER 1993, ROGLER und SCHWERTMANN 1981, ESTLER UND NAWROTH 1995) [59, 167, 57]. Daher kann der Einsatz der genannten Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung (z. B. Hackmaschine) vor allem bei schluffreichen Böden, zu erheblichen Erosionsschäden und Bodenabtrag führen (ESTLER 1990, ESTLER und KEES 1992, ESTLER 1995) [53, 56, 55]. Die

Folge ist häufig eine Rinnen- und Rillenerosion, die besonders in den Schlepperfahrspuren zu beobachten ist. Da in der Praxis aufgrund der Vorschriften der Straßenverkehrszulassungsordnung [191] und geringer Anschaffungskosten meist Geräte mit einer Arbeitsbreite von 3 m zum Einsatz kommen, werden im Feld gegenüber dem Einsatz einer Pflanzenschutzspritze wesentlich mehr Fahrspuren angelegt. Durch die Abhängigkeit der optimalen Vorfahrtsgeschwindigkeit von der Bodenfeuchte ist bedingt durch die geringe Arbeitsbreite meist nur eine geringe Schlagkraft möglich.

Die Lockerung des Oberbodens hat zudem den Nachteil, daß wie bei jeder anderen Art der flachen Bodenbearbeitung Unkrautsamen in Keimstimmung gebracht werden und durch die Zerschlagung von Bodenaggregaten Feinerde für ein neues Keimbett geschaffen wird. Dies fördert und begünstigt ein erneutes Auflaufen von Unkräutern und Ungräsern (LOHUIS 1990) [134].

2.3 Möglichkeiten zur Verminderung der Bodenerosion

Bei der Betrachtung der Bodenerosion werden die zwei Arten des Abtrags von Bodenmaterial durch Wind oder durch Wasser unterschieden. Unter den klimatischen Verhältnissen Mitteleuropas und insbesondere Bayerns ist die Bodenerosion durch Wasser die flächen- und mengenmäßig wichtigste Art. Die Bodenerosion durch Wind spielt eine untergeordnete Rolle. Deshalb wird nachfolgend nur das Phänomen der Bodenerosion durch Wasser, dessen Einflußfaktoren sowie die möglichen Maßnahmen zur Reduzierung des Bodenabtrags durch Wasser erläutert.

2.3.1 Definition der Bodenerosion

Die Bodenerosion beschreibt den Vorgang des Herauslösens von Bodenteilchen aus dem Oberboden durch das Auftreffen von Wassertropfen (Splash-Wirkung der Regentropfen) und durch den Oberflächenabfluß und deren Transport entlang der Bodenoberfläche meist in Richtung eines Vorfluters.

Die Einflußfaktoren auf die Bodenerosion durch Wasser sind in der sogenannten Allgemeinen Bodenabtragsgleichung ABAG (Universal Soil Loss Equation, USLE) von WISCHMEYER und SMITH 1978 [209] und SCHWERTMANN et al. 1987 [183] beschrieben worden:

$$\text{Bodenabtrag } A\ (t/ha \cdot a) = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \qquad (1)$$

mit:

A: langfristiger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag
R: Regen- und Oberflächenabflußfaktor
K: Bodenerodierbarkeitsfaktor
L: Faktor für Hanglänge
S: Faktor für Hangneigung
C: Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
P: Erosionsschutzfaktor

Da die Faktoren R, K, L und S nicht oder nur mit erheblichem Aufwand beeinflußbar sind, muß eine bodenschonende Landbewirtschaftung den Hauptaugenmerk auf den Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor (Faktor C) und den Erosionsschutzfaktor (Faktor P) legen. Im P-Faktor werden ganzjährig wirksame Schutzmaßnahmen wie der Queranbau, der Streifenanbau oder eine Terrassierung berücksichtigt. Hierbei wird meist nur der Queranbau praktiziert. Der Streifenanbau oder die Terrassierung werden aus ökonomischen Gründen nur in sehr geringem Umfang durchgeführt. Deshalb muß im Hinblick auf eine Minderung des Bodenabtrags auf ein tolerierbares Maß der Bodenbearbeitung und -bedeckung die größte Aufmerksamkeit geschenkt werden, da sonst vor allem die Bodenfunktion der Wasserspeicherfähigkeit und die Bodenfruchtbarkeit der betroffenen Flächen beeinträchtigt werden. Nach BRUNOTTE et al. 1999 [26] ist insbesondere der Bodenbedeckungsgrad der Schlüssel für die gute fachliche Praxis, um das Problem der Bodenerosion zu verringern.

2.3.2 Bodenbearbeitung und Bodenbedeckung

Zweifelsohne fördert in Hanglagen jegliche Bodenbearbeitung den Bodenabtrag. Eine hangparallele, flache Bodenbearbeitung kann das Ausmaß deutlich reduzieren. In der Zeit der besonders erosiven Niederschläge, die in Bayern vorwiegend in den Monaten Mai bis Anfang August vorkommen (ROGLER und SCHWERTMANN 1981) [167], sollte deshalb eine Bodenbearbeitung in Hanglagen wie sie durch den Einsatz von Geräten zur mechanischen Unkrautregulierung erfolgt, unterbleiben. In dieser Zeitspanne ist der Boden bei Weitreihenfrüchten wie Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L. *ssp. vulgaris var. altissima* Doell) oder Mais (*Zea mays* L.) aufgrund der langsamen Jugendentwicklung in nur geringem Maße bedeckt und somit der Witterung ausgesetzt. Daher beträgt der theoretische relative Bodenabtrag im Gegensatz zu Getreide (Tabelle 1) bei Zuckerrüben die dreifache und bei Mais die fünffache Höhe. Die Reihenkultur Hopfen mit Reihenabständen bis zu 3,20 m zeigt auf, daß mit zunehmendem Reihenabstand die Gefahr des Bodenabtrags bis zu 100 % ansteigen kann. Aufgrund dieser hohen potentiellen Erosionsgefährdung ist bei einem Anbau dieser Früchte in Hanglagen eine Bodenbedeckung durch eine Mulchauflage unbedingt erforderlich.

Tab. 1: Relativer Bodenabtrag bei verschiedenen Kulturpflanzen und Schwarzbrache (DIEZ nach SCHWERTMANN 1982) [43]

	Fruchtart				
	Getreide	**Zucker-rüben**	**Mais**	**Hopfen**	Schwarz-brache
Relativer Boden-abtrag %	8 - 11	**29**	**51**	**90 - 100**	100

Abbildung 7 zeigt, daß mit zunehmendem Bedeckungsgrad der relative Bodenabtrag bei einer Mulchbedeckung überproportional abnimmt. Bedeckungsgrade von 50 % bis 60 % reduzieren den relativen Bodenabtrag bereits auf 33 % bis 25 % im Vergleich zur Schwarzbrache (100 %). Mit zunehmender Höhe der Bodenbedeckung

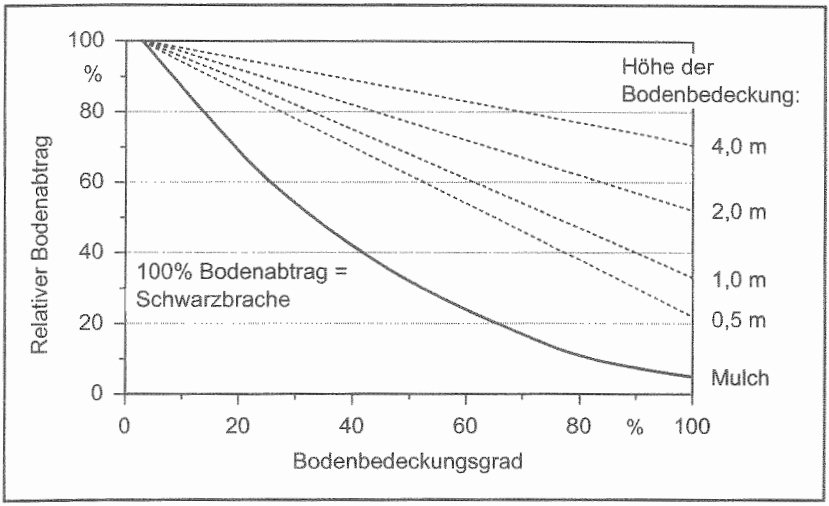


Abb. 7: Relative Veränderung des Bodenabtrags durch Regenwasser in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung und ihrer Entfernung zur Bodenoberfläche (SCHACHTSCHABEL et al. 1998) [169]

nimmt die Schutzwirkung der Vegetation ab, da die abtropfenden Wassertropfen während des Falls erneut kinetische Energie aufnehmen und der Durchmesser der von der Kulturpflanze abtropfenden Tropfen gegenüber den oben auf die Kulturpflanze auftreffenden im Durchschnitt größer ist. Deshalb kann die Erosivität der Regentropfen unter dem vermeintlich schützenden Blätterdach der Kulturpflanze höher sein als über dem Blätterdach. Dies erklärt auch die Unterschiede hinsichtlich des relativen Bodenabtrags zwischen den beiden landwirtschaftlichen Reihenkulturen Zuckerrüben und Mais (Tabelle 1), da der Mais im Gegensatz zur Zuckerrübe Wuchshöhen von über 3 m erreichen kann. Der beste Schutz der Bodenoberfläche besteht deshalb aus einer Mulchschicht, die direkt auf der Bodenoberfläche aufliegt.

2.4 Technik der mechanischen Schädigung oberirdischer Pflanzenteile

Aus der Vielzahl der Möglichkeiten einer mechanischen Schädigung des Sprosses von Unkräutern und Ungräsern sind aufgrund der Forderung nach einer hohen Schlagkraft nur Techniken, die einen Maschineneinsatz ermöglichen, sinnvoll. Die nachfolgend beschriebenen Schädigungstechniken können auch bei hohen Vorfahrtsgeschwindigkeiten eingesetzt werden und lassen in Kombination mit einer entsprechenden Arbeitsbreite eine hohe Flächenleistung erwarten. Für verschiedene Wuchshemmungen bieten sich deshalb die drei Arbeitsprinzipien Abschneiden (nur freier Schnitt), Abschlegeln oder Entlauben an, da sie im Praxiseinsatz weitgehend fremdkörperunempfindlich sind (Abbildung 8). Neben den drei Arbeitsprinzipien zeigt Abbildung 8 auf, welche Wirkung das jeweilige Arbeitsprinzip auf den Sproß ausübt und in welcher Weise der Wuchs gehemmt wird (ESTLER und NAWROTH 1995) [57].

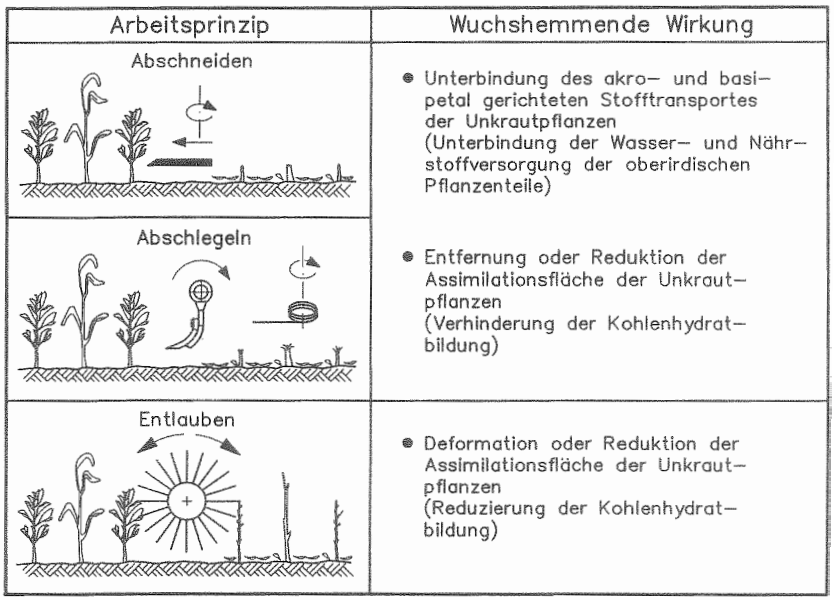


Abb. 8: Arbeitsprinzipien der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge und ihre wuchshemmende Wirkung

Eine weitere theoretische Möglichkeit ist das Quetschen von Pflanzen bzw. Pflanzenteilen. Für eine ausreichende Flächenleistung ist jedoch eine entsprechende Vorfahrtsgeschwindigkeit nötig. Die damit verbundene Bewegung des Werkzeugs führt bei gleichzeitigem Quetschen zu einem Herausziehen bzw. Ausreißen der Unkrautpflanze mit ihren Wurzeln, so daß nicht nur die oberirdischen Pflanzenteile geschädigt werden. Zudem wird dadurch die Prämisse „ohne Eingriff in das Bodengefüge" verletzt, da mit dem Herausreißen eine Veränderung der obersten Bodenschicht erfolgt. Dieses Arbeitsprinzip hätte zusätzlich den Nachteil einer wesentlich höheren Empfindlichkeit gegenüber Fremdkörpern.

Nachfolgend werden die drei möglichen Arbeitsprinzipien Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben näher erläutert und die jeweiligen verschiedenen gerätetechnischen Ausführungen mit ihren charakteristischen Merkmalen vorgestellt.

2.4.1 Abschneiden

Beim Abschneiden, dem Schnitt mit einer scharfen Schneide, werden zwei Formen unterschieden (STROPPEL 1953, KANAFOJSKI 1961, REZNIK 1975, PERSSON 1987) [192, 99, 165, 161]. Eine Form ist der Schnitt mit einer Gegenschneide, der durch den exakten Scherenschnitt bekannt ist. Landwirtschaftliche Geräte wie das Fingerschneidwerk oder das Doppelmesserschneidwerk beruhen auf dieser Form des Schneidens. Sie zeichnen sich durch einen sehr exakten sauberen Schnitt aus (KÖNINGER 1953) [112]. Jedoch besteht aufgrund des Scherenschnittprinzips eine zum Teil erhebliche Verstopfungsgefahr und eine große Empfindlichkeit gegenüber Fremdkörpern wie zum Beispiel Steinen. Die zweite Form ist der freie Schnitt ohne Gegenschneide. Für einen exakten Schnitt wird hier die Massenträgheit und Biegesteifigkeit des Pflanzenmaterials ausgenutzt, die bei einer hohen Messergeschwindigkeit zum Tragen kommt. Zudem spielen Verankerungskräfte der Pflanzen im Boden für die Abstützung der Schnittkräfte eine Rolle (STROPPEL 1953, KANAFOJSKI 1961, DOBLER 1972 und 1973, WIENEKE 1972, PERSSON 1987) [192, 99, 44, 45, 207, 161]. Diese zweite Schnittart ist verstopfungsunempfindlich und somit für eine schlagkräftige Arbeit geeignet.

Deshalb werden nur gerätetechnische Lösungen, die nach diesem Prinzip arbeiten, vorgestellt.

Landwirtschaftliche Rotationsmähwerke wie das Trommel- oder Scheibenmähwerk arbeiten nach diesem Prinzip. In Abbildung 9 sind beide Maschinen dargestellt und ihre verfahrenstechnischen Kenngrößen und Merkmale genannt. Das Trommelmähwerk hat sich in der Praxis als robustes Mähwerk mit Obenantrieb bewährt. Die Schnitthöheneinstellung des Gerätes erfolgt über Gleitteller, die dem Boden aufliegen. Mit einem zentralen Spindeltrieb kann die Schnitthöhe für alle Messerkreisel verändert werden. Der Scheibenmäher weist im Vergleich zum Trommelmähwerk einen Untenantrieb der Mähmesser auf und zeichnet sich durch einen geringeren Leistungsbedarf, eine leichtere Bauweise und eine gleichmäßiger verteilte Gutablage aus (SCHÖN 1998) [176]. Bedingt durch den Untenantrieb ist die Empfindlichkeit gegenüber Fremdkörpern wie Steinen größer (WIENEKE 1972) [207]. Die Einstellung der Schnitthöhe erfolgt über den Oberlenker und über Gleitkufen sowie bei gezogenen Geräten über Tasträder. Bei beiden Mähwerken kann die Schnitthöhe von 3 cm bis 8 cm variiert werden.

Trommelmähwerke werden im Front- bzw. Heckanbau als auch in einer gezogenen Ausführung mit einer Arbeitsbreite von 1,4 m bis 3,7 m angeboten. Dagegen sind bei den Scheibenmähwerken in der gezogenen Ausführung Arbeitsbreiten bis 5,0 m auf dem Markt. In der Kombination von Front- und gezogenem Heckmähwerk sind Gesamtsarbeitsbreiten von 7,5 m möglich. Selbstfahrer mit einem Frontmähwerk und zwei seitlichen Mähwerken erreichen Arbeitsbreiten von 9,1 m. Sowohl das Trommelmähwerk wie auch das Scheibenmähwerk können bei einer guten Arbeitsqualität mit Geschwindigkeiten bis zu 12 km/h gefahren werden, so daß bei einer Arbeitsbreite von 3,0 m (9,1 m) die theoretische Flächenleistung (ohne Rüst- und Wendezeiten) 3,6 ha/h (10,9 ha/h) bzw. 1,2 ha/h·m AB (1,2 ha/h·m AB) erzielt werden kann. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beträgt nach MATTHIES 1970 [139] und SCHEUFLER 1984 [172] 16 km/h. Demnach können maximale theoretische Flächenleistungen bei 3,0 m (9,1 m) Arbeitsbreite von 4,8 ha/h (14,6 ha/h) bzw. 1,6 ha/h·m AB (1,6 ha/h·m AB) erreicht werden. Nach

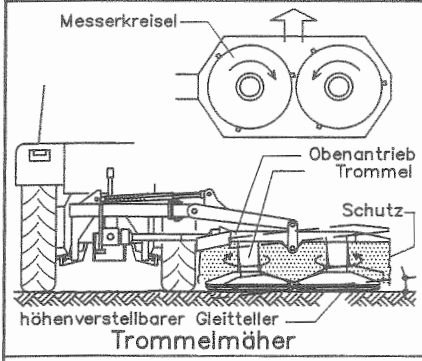
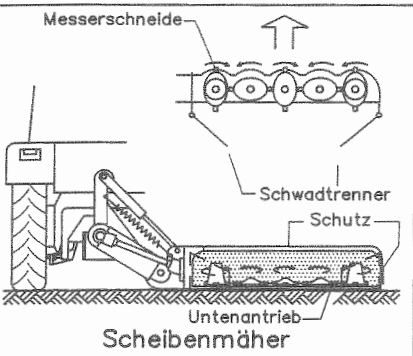
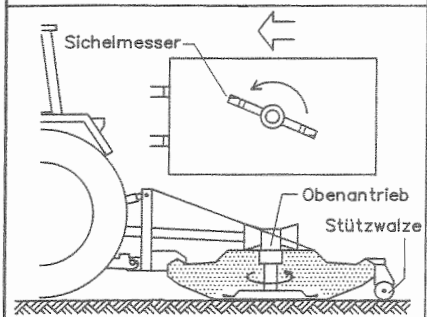
Gerät	Merkmale
 Trommelmäher	• Umfangsgeschwindigkeit der Messer: 60–85 m/s • Leistungsbedarf: 15 kW/mAB • Arbeitsgeschwindigkeit: 8–12 km/h • sehr geringe Störanfälligkeit
 Scheibenmäher	• Umfangsgeschwindigkeit der Messer: 60–85 m/s • Leistungsbedarf: 12 kW/mAB • Arbeitsgeschwindigkeit: 8–12 km/h • sehr geringe Störanfälligkeit
 Sichelmäher	• Umfangsgeschwindigkeit der Messer: 40–100 m/s • Leistungsbedarf: bis 15 kW/mAB • Arbeitsgeschwindigkeit: 4–12 km/h • einfache Bauweise, steinempfindlich

Abb. 9: Bauarten von Mähwerken und ihre Merkmale [119, 120, 121, 122, 139, 172, 207]

KTBL 2000 [126] und SCHÖN 1998 [176] ist in der Praxis eine Flächenleistung von 1,5 ha/h bis 2,5 ha/h (0,50 ha/h·m AB bis 0,83 ha/h·m AB) bei einer Arbeitsbreite von 3,0 m je nach Einsatzbedingungen und Parzellengröße realisierbar. MATTHIES 1970 [139] und KÜHLBORN und STEINKAMPF 1970 [122] sowie SCHÖN 1986 [175] geben als Leistungsbedarf für Trommelmähwerke 15 kW/m AB und für Scheibenmähwerke 12 kW/m AB an.

Die Investitionskosten betragen für Trommel- und Scheibenmähwerke im Front- oder Heckanbau ca. 2200,- DM/m AB bis 4900,- DM/m AB und für die gezogenen Versionen ca. 5700,- DM/m AB bis 7900,- DM/m AB (SCHÖN 1998) [176]. Der Preis pro Meter Arbeitsbreite nimmt mit zunehmender Arbeitsbreite zu, da sich die Aufwendungen für eine stabilere Konstruktion mit zunehmender Arbeitsbreite auch aus Sicherheitsgründen erhöhen.

Eine weitere technische Möglichkeit des Abschneidens stellt der Sichelmäher dar (Abbildung 9). Die Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Sichelmessers, das meist aus einem Stück gefertigt und an beiden Enden mit Wurfschaufeln bestückt ist, liegt meist bei 80 m/s bis 100 m/s (SCHEUFLER 1984, SCHÖN 1998) [172, 176]. Durch diese hohe Geschwindigkeit und die Sogwirkung der Wurfschaufeln, die in Verbindung mit dem Gerätegehäuse bei der Rotation des Sichelmessers entsteht, können auch Grashalme exakt abgeschnitten werden. Deshalb wird diese einfache Mähwerksbauart bei Rasenmähern verwendet. Auch für die Pflege von Weiden und Stillegungsflächen werden Geräte dieser Bauart eingesetzt. Der Leistungsbedarf erreicht mit 15 kW/m AB die gleiche Höhe wie bei den Trommelmähwerken. Hohe mögliche Vorfahrtsgeschwindigkeiten bis 12 km/h ermöglichen eine hohe Flächenleistung. Das starre Sichelmesser und dessen Schneide ist gegenüber Fremdkörpern wie Steinen sehr empfindlich (SCHEUFLER 1984) [172]. Für die Pflege von Stillegungsflächen werden spezielle Mulchmesser angeboten, die robuster ausgeführt sind und aus zwei Teilen bestehen. Die Messer sind zur Überlastsicherung entweder gelenkig angebracht oder mit Scherschrauben befestigt. Der Sichelmäher wird so zum Sichelmulcher, der genauso wie der horizontal rotierende Schlegelmäher (siehe Kapitel 2.4.2) arbeitet. Der Übergang zum horizontal rotierenden Schlegelmäher ist somit fließend.

Die geringe Bauhöhe und die bei großem Rotordurchmesser geringe Bodenanpassung beschränken nach KROMER und RELOE 1989 [116] den Einsatz in der Brachlandpflege und der Pflege von Stillegungsflächen. Zudem kann mit dem Sichelmäher eine sehr gleichmäßige Mähgutverteilung nicht erreicht werden, da er konstruktiv bedingt zur Schwadbildung neigt (VON OHEIMB 1989) [159]. Zusatzeinrichtungen wie Rechen für Schnittholzzerkleinerung und Schwadblech vergrößern das Einsatzspektrum. Die Schnitthöhe, die von 2 cm bis 10 cm variiert werden kann, wird entweder über eine höhenverstellbare Stützwalze oder mit Hilfe von Stützrädern oder Kufen eingestellt. Der Sichelmessermäher kann nach SCHEUFLER 1984 [172] im Geschwindigkeitsbereich von 4 km/h bis maximal 12 km/h betrieben werden. SCHÖN 1998 [176] gibt eine Arbeitsgeschwindigkeit von 6 km/h bis 8 km/h an.

Auf dem Markt sind Sichelmäher von 1,5 m bis 4,0 m Arbeitsbreite erhältlich. Bei einer maximalen Vorfahrtsgeschwindigkeit von 12 km/h ist eine maximale theoretische Flächenleistung von 4,8 ha/h (3,6 ha/h) bzw. 1,2 ha/h·m AB (1,2 ha/h·m AB) mit einer Arbeitsbreite von 4,0 m (3,0 m) möglich. Die tatsächliche Flächenleistung nach KTBL 2000 [126] beträgt für den 3 m - Sichelmäher etwa 1,1 ha/h und für das 4 m - Gerät 1,3 ha/h bis 1,5 ha/h.

Die Anschaffungskosten für einen Sichelmäher reichen von ca. 6300,- DM/m AB bis 2900,- DM/m AB (KTBL 2000) [126]. Mit zunehmender Arbeitsbreite sinken die Kosten pro Meter Arbeitsbreite, da hier keine weiteren Kreisel-Einheiten benötigt werden, sondern nur der Kreiseldurchmesser (bis 1,80 m) erhöht und das Gehäuse entsprechend angepaßt wird.

2.4.2 Abschlegeln

Der Begriff „Abschlegeln" bedeutet, das ein Schnitt mit einer stumpfen Schneide durchgeführt wird. Durch den Einsatz einer stumpfen Schneide sind in der Regel höhere Schnittkräfte für das Durchtrennen erforderlich (PERSSON 1987) [161]. Die Schnittflächen nach erfolgtem Abschlegeln sind im Gegensatz zu einem Schnitt mit

einer scharfen Schneide nicht glatt, sondern das Schnittgut besitzt ausgefranste Schnittflächen. Dadurch ist die Oberfläche der Schnittfläche größer als bei einem glatten Schnitt mit einer scharfen Schneide.

In der landwirtschaftlichen Praxis existieren zwei Bauarten von Schlegelmähern (Abbildung 10), die meist in der Landschaftspflege (KROMER und RELOE 1989, SCHÖN 1998) [116, 176] und in der Pflege stillgelegter Flächen (BRUNOTTE und BILLER 1994) [25] eingesetzt werden. Die Unterscheidung der zwei Bauarten erfolgt nach der Richtung der Rotation der Schlegelwerkzeuge. Die vertikal rotierenden Schlegelmäher (Abbildung 10), auch Schlegelhäcksler oder Schlegelmulcher genannt, werden in der Weidepflege, in der Landschaftspflege und für das Mulchen von Stillegungsflächen benutzt. Vereinzelt werden Schlegelmäher auch zur Futterernte von Feldfutter (z. B. Kleegras) verwendet. Hierbei besteht jedoch die Gefahr einer erheblichen Futterverschmutzung und damit einer Qualitätsverschlechterung des Futters. Für den jeweiligen Einsatzzweck gibt es eine Vielzahl verschiedener Schlegelformen (Ypsilon-, Ypsilon/Mitten-, Delta-, Plattenschlegel, etc.), so daß das jeweils gewünschte Arbeitsergebnis hinsichtlich Zerkleinerungswirkung beeinflusst werden kann (BILLER und BRUNOTTE 1995) [16, 17]. Die Schlegelmasse sollte für eine gute Schnittqualität mindestens 150 g/cm Schnittbreite betragen (KROMER und RELOE 1991) [116]. Vertikal rotierende Schlegelmähwerke sind absolut fremdkörperunempfindlich, da die einzelnen Schlegel beweglich (pendelnd) an der Rotorwelle befestigt sind. Die horizontal eingebaute Rotorwelle wird über ein an der Geräteseite montiertes Getriebe oder mittels Keilriemen angetrieben, die wiederum über ein Winkelgetriebe von einer Gelenkwelle über die Schlepperzapfwelle angetrieben werden. Deshalb ist die Arbeitsbreite geringer als die Maschinenbreite. Die Schnitthöhe kann über die nachlaufende Stützwalze im Bereich von 2 cm bis 15 cm eingestellt werden.

Das abgeschlegelte Mähgut wird klein gehäckselt und über die gesamte Arbeitsbreite breitflächig abgelegt. Bedingt durch die Konstruktion hat der vertikal rotierende Schlegelmäher einen relativ hohen Leistungsbedarf bis zu 22 kW/m AB (SCHÖN 1998) [176]. Zudem ist nach BILLER und BRUNOTTE 1995 [17] der

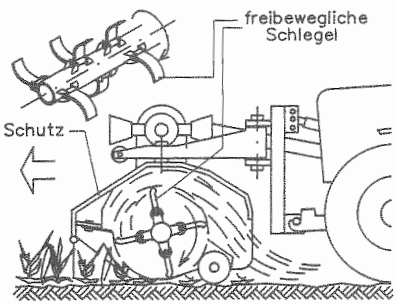
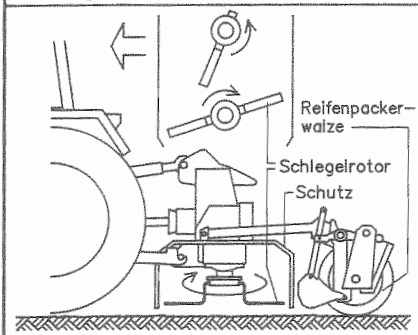
Gerät	Merkmale
 Schlegelmäher vertikal rotierend	• Umfangsgeschwindigkeit der Schlegel: 30–60 m/s • Leistungsbedarf: 5–22 kW/mAB • Arbeitsgeschwindigkeit: 4–10 km/h • fremdkörperunempfindlich
 Schlegelmäher horizontal rotierend	• Umfangsgeschwindigkeit der Schlegel: 24–35 m/s • Leistungsbedarf: 5–10 kW/mAB • Arbeitsgeschwindigkeit: 4–10 km/h • flache Bauweise • fremdkörperunempfindlich • Neigung zur Schwadbildung

Abb. 10: Bauarten von Schlegelmähwerken und ihre Merkmale [95, 116, 147]

Leistungsbedarf abhängig von der verwendeten Schlegelform (Ypsilon, Delta- oder Plattenschlegel). Dabei besitzt der Ypsilon-Schlegel den geringsten und die schwere Bauform des Delta-Schlegels den höchsten Zapfwellenleistungsbedarf im Leerlauf und bei der Häckselarbeit. Der Zapfwellenleistungsbedarf steigt mit zunehmender Fahrtgeschwindigkeit an (BILLER und BRUNOTTE 1995, 1997) [17, 18]. Die mögliche Vorfahrtsgeschwindigkeit der Schlegelhäcksler beträgt je nach Masse des Aufwuchses 4 km/h bis 10 km/h (MATTHIES 1970, SCHEUFLER 1984) [139, 172]. SCHÖN 1998 [176] nennt Einsatzgeschwindigkeiten sogar bis 15 km/h. Meist

werden Schlegelmulcher in der Praxis zur Erzielung einer ausreichend guten Arbeitsqualität mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bis 8 km/h betrieben.

Schlegelhäcksler bzw. Schlegelmulcher werden mit einer Arbeitsbreite von 1,5 m bis 6,4 m zu einem Preis von 4400,- DM/m AB bis 6400,- DM/m AB als Front-, Heck- oder seitliche Auslegergeräte angeboten. Mit zunehmender Arbeitsbreite steigen die Investitionskosten an, denn der sicherheitstechnische Konstruktionsaufwand und der Aufwand für die exakte Auswuchtung des Schlegelrotors nimmt mit der Breite des Rotors zu. Der Einsatz von Frontgeräten besitzt den Vorteil, daß eine gleichmäßige Stoppelhöhe auch im Bereich der Schlepperfahrspuren erreicht wird (BILLER und BRUNOTTE 1997) [18]. Bei einer Arbeitsbreite von 3,0 m (6,4 m) ist bei 15 km/h eine theoretische Flächenleistung (ohne Wende- und Rüstzeiten) von 4,5 ha/h (9,6 ha/h) bzw. 1,5 ha/h·m AB (1,5 ha/h·m AB) erzielbar. Die nach KTBL 2000 [126] im Feldeinsatz in Abhängigkeit von der Parzellengröße möglichen Flächenleistungen liegen mit 3,0 m Arbeitsbreite bei etwa 1,0 ha/h (0,33 ha/h·m AB) und mit 6,4 m Arbeitsbreite bei etwa 2,5 ha/h (0,39 ha/h·m AB).

Die zweite Bauart ist der horizontal rotierende Schlegelmäher (Abbildung 10). Diese von der Kreiselegge bzw. vom Kreiselgrubber abgeleitete Bauart besitzt statt der Zinken rechtwinklige Schlegel, auch Winkelmesser genannt. Die exakte Höheneinstellung erfolgt über den Nachläufer, der als Packerwalze ausgebildet ist und die gesamte Arbeitsbreite abdeckt. Der horizontal rotierende Schlegelmäher neigt wie die Kreiselegge aufgrund des Arbeitsprinzips zur Schwadbildung. Das abgeschlegelte Mähgut wird bedingt durch die horizontale Drehrichtung der Schlegel somit nicht gleichmäßig über die gesamte Arbeitsbreite verteilt. Das Schnittgut wird im Vergleich zum vertikal rotierenden Schlegelmäher nicht kurz gehäckselt, sondern bleibt weitgehend in der gesamten Länge erhalten. Der Zapfwellenleistungsbedarf dieses Schlegelmähertyps ist nahezu unabhängig von der Vorfahrtsgeschwindigkeit (BILLER und BRUNOTTE 1995) [17]. Die Bauhöhe ist im Vergleich zum Sichelmäher bzw. Sichelmulcher höher. Damit sind die Einsatzmöglichkeiten in der Brachland- und Stillegungspflege bei großer Masse des Aufwuchses besser.

Der Kreiselgrubber mit Mähausrüstung ist auf dem Markt mit Arbeitsbreiten von 3,5 m bis 5,0 m für den Heckanbau erhältlich. Die theoretischen Flächenleistungen betragen bei 8 km/h Arbeitsgeschwindigkeit für die angebotenen Arbeitsbreiten 2,8 ha/h bis 4 ha/h bzw. 0,8 ha/h·m AB. Unter praktischen Einsatzverhältnissen werden beim Mulchen Flächenleistungen, wie oben für den vertikal rotierenden Schlegelmäher angegeben, erreicht. Bedingt durch die niedrige Umfangsgeschwindigkeit der Winkelmesser (Abbildung 10) und den Anbau im Heck des Schleppers sind die erzielbaren Stoppellängen im Bereich der Fahrspuren im Hinblick einer gleichmäßigen Mulcharbeit insbesondere bei Fahrtgeschwindigkeiten um 10 km/h nicht zufriedenstellend (BILLER und BRUNOTTE 1995) [17]. Dies kann im Gegensatz zu dem vertikal rotierenden Schlegelmäher zu Problemen bei einer nachfolgenden Bodenbearbeitung führen. Der Preis für den Kreiselgrubber mit Winkelmessern mit der Reifenpackerwalze als Nachläufer ist mit ca. 8800,- DM/m AB bis 9000,- DM/m AB sehr hoch.

2.4.3 Entlauben

Das technische Entlauben von Pflanzen wird im Baumschulbereich des Gartenbaus praktiziert. Hier werden Rosenstöcke zur besseren Überwinterung und Lagerung meist an stationären Geräten entlaubt. Die Rosenstöcke, die zuvor gerodet wurden, werden diesen Maschinen von Hand zugeführt.

Um die kostenintensive und unfallträchtige Handarbeit einzusparen, sind in der Praxis jedoch auch einfache Entlaubungsgeräte für den Schlepperanbau verfügbar (Abbildung 11). Diese können an die Dreipunkthydraulik im Schlepperheck montiert werden. Der zentrale Antrieb erfolgt über eine von der Zapfwelle angetriebene Gelenkwelle auf eine zentral angeordnete zweirillige Riemenscheibe. Von dieser zentralen Riemenscheibe werden über Keilriemen und Umlenkrollen zwei parallel zur Pflanzenreihe ausgerichtete Entlaubungsrotoren angetrieben. Diese sind meist mit Kunststoff- oder Lederriemen bestückt. Der jeweilige Rotor besteht aus einem Hohlzylinder mit Bohrungen im Zylindermantel, die der Befestigung der Riemen

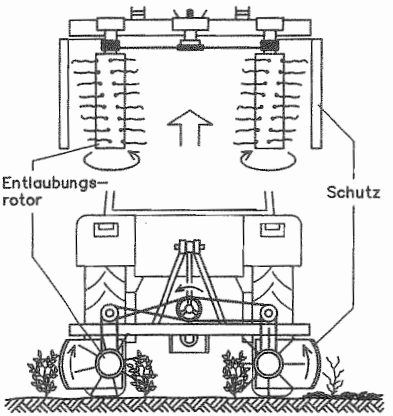
Gerät	Merkmale
 Entlaubungsmaschine	• Umfangsgeschwindigkeit der Schädigungswerkzeuge: 10–20 m/s • Arbeitsgeschwindigkeit: 1,5–2,0 km/h • weitgehend fremdkörper-unempfindlich (abhängig vom Borstenmaterial) • Bestückbar mit Metall- oder Kunststoffborsten oder Kunststoff- oder Lederriemen

Abb. 11: Entlaubungsmaschine für den Schlepperanbau und ihre Merkmale

dienen. Die Fixierung der Riemen erfolgt durch ein verdicktes Ende innerhalb des Hohlzylinders, das meist aus einem Knoten besteht. Durch diese einfache Befestigungstechnik können verschlissene Riemen schnell erneuert werden. Eine Ausrüstung mit locker bestückten ringförmigen Metall- oder Kunststoffbürsten wäre auch denkbar.

Seitlich montierte Bleche bieten Schutz vor herumfliegenden Pflanzenteilen. Die Investitionskosten für ein zweireihiges Gerät liegen bei ca. 3500,- DM bis 4000,- DM. Einreihige Rotorbürsten mit hydraulischem Antrieb kommen im Weinbau zum Einsatz. Diese mit flexiblen Rundriemen aus Kunststoff bestückte Rotorbürste dient zum schonenden Entfernen von Wassertrieben und zur Beseitigung des Unkrauts am Fuß des Weinstocks. Die Investitionssumme liegt je nach Ausstattung bei ca. 2300,- DM pro Gerät. In Abbildung 11 sind neben der Darstellung der Entlaubungsmaschine die wichtigen geräte- und einsatztechnischen Merkmale erläutert. Die für eine optimale Arbeitsqualität sehr geringe Vorfahrtsgeschwindigkeit von 1,5 km/h bis 2,0 km/h beschränkt die Flächenleistung erheblich.

Bei einem Reihenabstand der Kulturpflanzen von 75 cm ist mit einem zweireihigen Gerät eine theoretische Flächenleistung von 0,3 ha/h bzw. 0,2 ha/h·m AB erzielbar.

2.5 Erkenntnisse der Voruntersuchungen

Im Jahr 1993 wurden von NAWROTH 1994 [150] in Tastversuchen auf vier Standorten in der Kultur Mais erste Voruntersuchungen mit einem einreihigen Prototypen für die Schädigungsprinzipien Abschneiden und Abschlegeln durchgeführt und Erkenntnisse für einen weiteren Forschungsbedarf zur mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge gewonnen. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen, bei denen der Einfluß der vier Faktoren Werkzeugart, Vorfahrtsgeschwindigkeit, Zapfwellen- bzw. Rotordrehzahl und Standort (verschiedene Ackerunkrautgesellschaften) auf den Regulierungserfolg untersucht wurde, sind in Abbildung 12 zusammengefaßt.

Mittels der Multiplen Classifications-Analyse der in diesen Screeningstests gewonnenen Daten, die den Anteil der Varianz von einzelnen bzw. aller Einflußfaktoren (Werkzeugart, Vorfahrtsgeschwindigkeit, Zapfwellendrehzahl, Standort) an der Gesamtvarianz schätzt, konnte der Einfluß bzw. der Effekt des einzelnen Einflußfaktors auf den Regulierungserfolg ermittelt werden. Der Regulierungserfolg entspricht der prozentualen Verminderung des Unkrautdeckungsgrades „nach der Behandlung" im Vergleich zu „vor der Behandlung". Die Multiple-Classifications-Analyse berechnet neben nicht bereinigter Effekte auch vom Einfluß der übrigen Faktoren bereinigte Effekte (β) für jeden Faktor. Für die Varianten des einzelnen Einflußfaktors werden Abweichungen vom Gesamtmittelwert (Regulierungserfolg von 73,3 %) aller Versuche der vier Standorte angegeben (Abbildung 12). Die Wichtigkeit der vier bekannten Einflußfaktoren ist am angegebenen β-Wert ersichtlich. Der Faktor „Werkzeugart" hatte somit den größten Einfluß auf den Regulierungserfolg. Hierbei zeigte sich, daß das Abschlegeln einen deutlich positiven Effekt auf den Regulierungserfolg ausübt und diesen ausgehend vom Gesamtmittelwert von 73,3 % um 9,0 % auf 82,3 % steigern konnte.

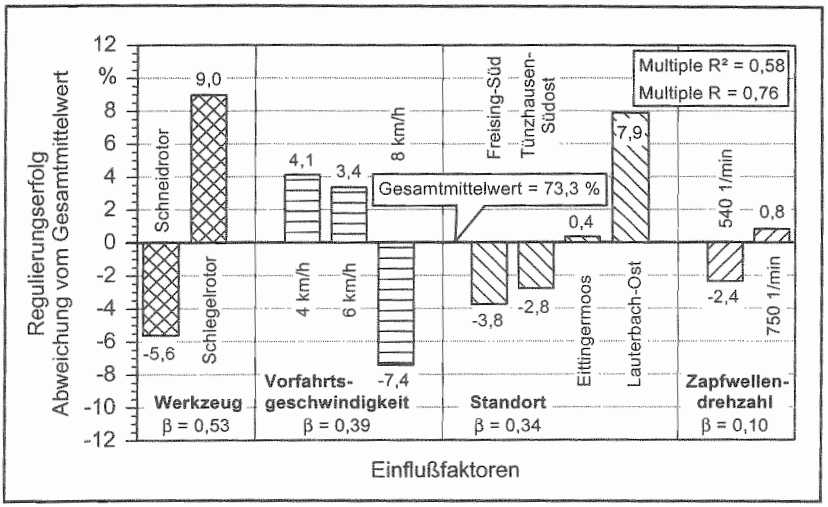


Abb. 12: Auswirkung ausgewählter Einflußfaktoren auf den Regulierungserfolg von Unkräutern (Ergebnisse der Multiplen Classifications-Analyse), Voruntersuchungen in der Kultur Mais 1993 (NAWROTH 1994) [150]

Das multiple R^2, das der Summe der β^2 entspricht, wurde mit 0,58 errechnet. Dieser Wert kann wie bei der Regressionsanalyse als Gütemaß für die durch das Modell aufgeklärte Varianz interpretiert werden (BACKHAUS et al. 1990) [9].

Zudem wurde in den Tastversuchen festgestellt, daß das nachlaufende, schlappgummibereifte Tastrad, das für die exakte Schnitthöheneinstellung nötig war, den lockeren Oberboden rückverdichtete. In diesem Bereich wurde ein verstärktes Auflaufen von neuen Unkräutern beobachtet. Die Reduzierung des Unkrautwuchses war abhängig vom Habitus der Unkräuter. Hochwachsende Arten wie *Amaranthus retroflexus* L., *Chenopodium spec.*, *Galeopsis tetrahit* L., *Galinsoga spec.* und *Solanum nigrum* L. wurden besser im Wachstum reguliert als Ungräser und kriechende Arten wie *Stellaria media* (L.) Vill., die nur partiell geschädigt werden konnten. Da der nachhaltige Regulierungserfolg wesentlich von der Einhaltung der Abtrennhöhe abhängig ist, sollten wegen der unvermeidbaren kleinräumigen Bodenunebenheiten verschleißfeste Werkzeuge eingesetzt werden. Hinsichtlich der Nachhaltigkeit der

getesteten Varianten konnten keine Aussagen getroffen werden, welche Behandlungsvariante im Wiederaufwuchs die niedrigsten Werte erreicht. Dies ist darin begründet, daß die Verunkrautung der Beobachtungsflächen neben dem Wiederaustrieb auch vom keimfähigen Unkrautsamenpotential abhängig ist. Deshalb sind zur Erlangung weiterführender Erkenntnisse Versuche unter definierten Bedingungen ohne neu keimende Unkräuter zu fordern. Die dabei erfolgreich geprüften Varianten sollten nachfolgend in der Praxis überprüft werden (NAWROTH 1994) [150].

3 Zielstellung

Da in der bisherigen Literatur keine grundlegenden Erkenntnisse über eine mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge vorhanden sind, hatte die vorliegende Arbeit das Ziel, zu klären, ob durch eine mechanische Unkrautregulierung, die nicht in den Oberboden eingreift, das Unkrautwachstum wirksam reguliert werden kann.

Der Prozeß der Unkrautregulierung, der aus den Teilprozessen Schädigung und Regeneration besteht, kann durch ein Input-Output-Modell (Abbildung 13), das nach ENGLERT 1997 [49] für die Darstellung dynamischer verfahrenstechnischer Systeme und deren Prozesse geeignet ist, erklärt werden. Der Teilprozess der Schädigung wird vorwiegend durch die Einsatzparameter der verwendeten Werkzeuge und die dabei herrschenden Klimabedingungen bestimmt. Die nachfolgende Regeneration der Unkraut- bzw. Ungraspopulation wird hauptsächlich durch den Witterungsverlauf (Klima), den Boden und das Zusammenspiel Kulturpflanze zu Unkräuter beeinflußt. Aufgrund der großen Anzahl an Einflußfaktoren auf das Unkrautwachstum nach einer Regulierungsmaßnahme unter natürlichen Bedingungen, die in Abbildung 13 dargestellt sind, wurden zur systematischen Bearbeitung der Fragestellung zwei Teilziele formuliert:

1. Wie können Unkräuter und Ungräser durch eine mechanische Schädigung des Sprosses wirkungsvoll und nachhaltig im Wachstum reguliert werden?

2. Kann durch eine mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge der Unkrautaufwuchs so reguliert werden, daß er nur noch eine tolerierbare Konkurrenz zur Kulturpflanze darstellt und keine Ertragseinbußen zu befürchten sind?

Daher gliedert sich die vorliegende Arbeit in zwei Teile. Zur Beantwortung der ersten Fragestellung wurden umfangreiche grundlegende Prüfstandsversuche ohne den Einfluß von Kulturpflanzen durchgeführt. In diesen Versuchen wurde geprüft,

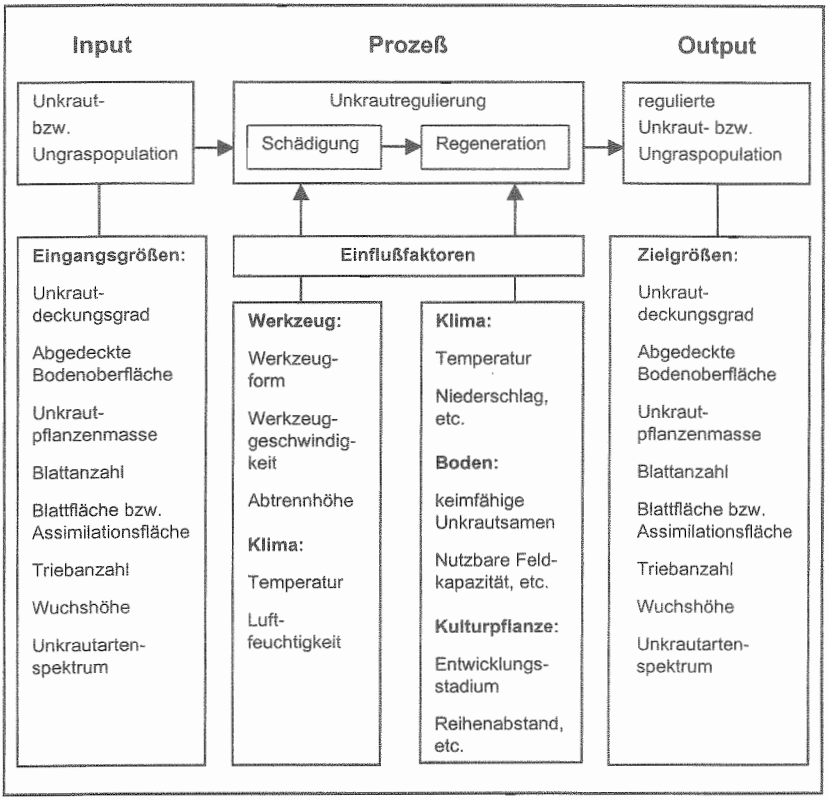


Abb. 13: Input-Output-Modell der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge

wie sich der Einflußfaktor Werkzeug bei unterschiedlichen Abtrennhöhen und Wuchsstadien der Unkräuter und Ungräser auf den nachhaltigen Regulierungserfolg von Unkräutern und Ungräsern auswirkt. Hierbei wurden die drei möglichen Arbeitsprinzipien Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben anhand der in Abbildung 13 genannten Eingangs- bzw. Zielgrößen unter definierten und standardisierten Bedingungen untersucht, so daß insbesondere der Einflußfaktor Boden eliminiert war.

Die zweite Frage wurde in Feldversuchen in der Reihenkultur Mais untersucht. Für die Kultur Mais (*Zea mays* L.) kann nach LAUDIEN (1972), KOCH und HURLE (1978), STAAS-EBREGT (1979) und KOCH und KEMMER (1980) [130, 108, 188, 109] vom 2-Blatt-Stadium bis zum 10-Blatt-Stadium keine bzw. nur eine geringe Konkurrenz durch Unkräuter und Ungräser toleriert werden, denn nur dann sind bei Mais keine Ertrags- und Qualitätseinbußen zu befürchten.

Zusätzlich wurden gerätetechnische Untersuchungen unter Praxisbedingungen zur Optimierung des neuen Unkrautregulierungsverfahrens durchgeführt. Diese Untersuchungen dienen auch der verfahrenstechnischen Bewertung und Einordnung des Verfahrens der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge.

4 Prüfstandsversuche

In grundlegenden Untersuchungen sollte geklärt werden, auf welche Weise Unkräuter und Ungräser wirkungsvoll und nachhaltig geschädigt werden können. Dazu wurde ein Prüfstand angefertigt und Testpflanzen kultiviert. Nach der Erläuterung von Material und Methoden werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfstandsversuche in diesem Kapitel vorgestellt.

4.1 Material und Methoden

Das Kapitel Material und Methoden beschreibt zu Beginn den Aufbau und die Funktionsweise des Prüfstands sowie die verwendeten Testpflanzen. Der deutsche Name und der neben dem wissenschaftlichen Namen benutzte internationale Code der Unkräuter und Ungräser sind in Tabelle A1 im Anhang zu finden. Anschließend wird die Gesamtplanung der Untersuchungen über die Wirkung der verschiedenen Arbeitsprinzipien der Schädigung des Sprosses von Unkräutern und Ungräsern vorgestellt. Nachfolgend wird für jeden dieser Versuche die Planung, Durchführung und Auswertung erläutert.

4.1.1 Aufbau des Prüfstands

Für die Prüfstandsversuche wurde ein schienengebundenes Versuchsgerät (Abbildung 14) angefertigt. Das Versuchsgerät war in einen Gerätetragrahmen ① eingehängt, der mittels einer umlaufenden Kette ③ und einem 2,2-kW-Drehstrom-Getriebemotor ⑦ über eine Testfläche bewegt werden konnte. Die gesamte Fläche wies eine Länge von 22,0 m und eine Breite von 2,9 m auf. Die Einstellung der Geschwindigkeit erfolgte über einen Frequenzumrichter, der sich in einem Schaltschrank ⑧ befand. Die Fahrtstrecke von 22,0 m unterteilte sich in eine Beschleunigungs- und Abbremsstrecke sowie in eine dazwischenliegende Behandlungsstrecke von 2,50 m Länge, in der die gewählte Vorfahrtsgeschwindigkeit konstant war. Um der Forderung nach einer hohen Flächenleistung im

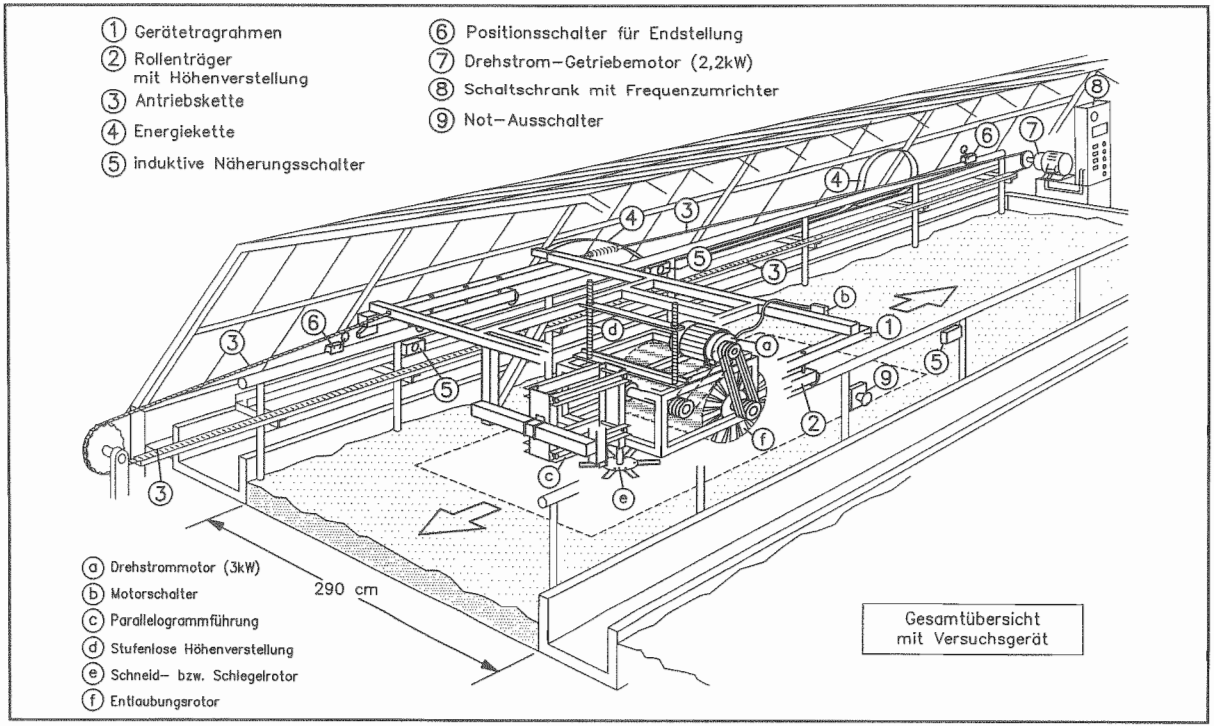


Abb. 14: Prüfstand - Gesamtübersicht mit Versuchsgerät

Feldeinsatz gerecht zu werden, wurden die Versuche mit einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 2,22 m/s (8,00 km/h) durchgeführt. Im Bereich der gesamten Behandlungsstrecke wurde die exakte Vorfahrtsgeschwindigkeit mittels Lichtschrankentechnik und einer digitalen Stoppuhr mit einer Meßgenauigkeit von $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ Sekunden erfaßt. Der Bremsvorgang wurde nach dem Passieren der induktiven Näherungsschalter ⑤ eingeleitet. An beiden Enden der Teststrecke befanden sich Positionsschalter ⑥, die das Versuchgerät stoppten und in Parkstellung brachten. Da sich der Prüfstand in einem Gewächshaus befand, war eine witterungsunabhängige Behandlung der Testpflanzen möglich. Diese konnten somit zu genau definierten Zeitpunkten termingerecht behandelt werden.

Für die genaue Einhaltung der Abtrennhöhe über dem Boden war eine feste Position der Testpflanzen, die in Multitopfplatten (Quickpot 60; 335 mm · 510 mm) kultiviert waren, nötig. Deshalb wurden die Multitopfplatten während der Behandlung durch Halteleisten auf einer eben verlegten Bodenplatte längs zur Fahrtrichtung fixiert. Eine vollständige Behandlung der jeweiligen Parzelle war gewährleistet, da die Arbeitsbreite der Werkzeuge 550 mm betrug und somit die Multitopfplatte von den Werkzeugen seitlich jeweils um 107,5 mm überdeckt wurde. Über die Parallelogrammführung (c) und zwei Gewindestangen (d) konnte die gewünschte theoretische Abtrennhöhe stufenlos exakt eingestellt werden.

Zur Schädigung der Testpflanzen wurden mehrere Versuchsrotoren konstruiert, die mit verschiedenartigen Schädigungswerkzeugen bestückt waren. Damit die Behandlung der Testpflanzen eines definierten Wuchsstadiums in einer kurzen Zeitspanne erfolgen konnte, waren die Versuchsrotoren innerhalb weniger Minuten auswechselbar. Der jeweils eingebaute Rotor wurde über drei Keilriemen von einem aufgebauten 3 kW-Drehstrommotor (a) angetrieben. Dieser wurde über eine Energiekette ④ mit Strom gespeist.

Um die Umfangsgeschwindigkeit an der Werkzeugspitze bestimmen zu können, wurden Drehzahlmessungen mit dem Drehzahlmeßgerät „Deumo“ der Firma Hoffmann vorgenommen. Zur Absicherung des Meßergebnisses wurden die Messungen

für die jeweilige Drehzahl der Antriebswelle dreimal wiederholt. Der Meßwert wird als arithmetischer Mittelwert angegeben. Die Meßgenauigkeit betrug ± 5 1/min.

4.1.2 Testpflanzen

Um einen Vergleich mit den nachfolgenden Feldversuchen zu ermöglichen, wurden als Testpflanzen nicht Simulationsunkräuter wie z. B. *Sinapis alba* L. (Weißer Senf), sondern Original-Unkräuter und -Ungräser verwendet. Dabei wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Leitunkräuter des sogenannten Hackfruchtanbaus, die das Spektrum unterschiedlicher Wuchshöhen abdecken, ausgewählt.

Tab. 2: Ausgewählte Unkraut- und Ungrasarten und ihre Wuchshöhen

Pflanzen-Art			Wuchshöhe
Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Code	
Agropyron repens (L.) Beauv.	Gemeine Quecke	AGRRE	niedrig - mittel
Amaranthus retroflexus L.	Zurückgekrümmter Amarant	AMARE	hoch
Chenopodium album L.	Weißer Gänsefuß	CHEAL	hoch
Echinochloa crus-galli (L.) Beauv.	Hühnerhirse	ECHCR	mittel -hoch
Galinsoga parviflora Cav.	kleinblütiges Franzosenkraut	GASPA	niedrig - mittel
Polygonum lapathifolium L.	Ampferblättriger Knöterich	POLLA	mittel
Solanum nigrum L.	Schwarzer Nachtschatten	SOLNI	niedrig - mittel
Stellaria media (L.) Vill.	Vogelmiere	STEME	niedrig

Das Saatgut dieser Arten wurde zuerst auf dessen theoretische Keimfähigkeit mit dem Tetrazoliumtest an zweimal 50 Körnern nach dem ISTA-Handbuch für die Tetrazoliumuntersuchung (MOORE 1986) [146] geprüft. Ein weiterer Labortest auf Keimfähigkeit, der in angefeuchteten Filterpapiertaschen bei 20 °C nach einer vierwöchigen Stratifikation bei 2 °C erfolgte, wurde ergänzend durchgeführt. Nach den Labortests schloß sich eine Keimfähigkeits- und Anzuchtprüfung in Substrat an. Als Substrat wurde eine Mischung aus Floraton 1 (15 % Tongehalt) (Fa. Floragard) und Quarzsand im Verhältnis 10:1 verwendet, um soweit wie möglich natürliche Bodenverhältnisse zu simulieren und um zugleich das Vorhandensein weiterer Diasporen bzw. Samen anderer Unkrautarten auszuschließen. Dieses Substrat wurde auch für alle weiteren Prüfstandsversuche benutzt.

Die Keimprüfung in Substrat erfolgte in einem Gewächshaus bei Temperaturverhältnissen von 20 °C am Tag und 15 °C in der Nacht. Die Tageslänge betrug 16 Stunden. Sie wurde mittels Zusatzbelichtung, die auch tagsüber bei Einstrahlungswerten unter 1000 $\mu mol/m^2 \cdot s$ angeschaltet wurde, erreicht. Für die Zusatzbelichtung wurden die Pflanzenbestrahlungsleuchten SON-T AGRO 400 (SGR 200/400K) der Firma Philips verwendet. Das Saatgut der jeweiligen Art wurde in Multitopfplatten (Quickpot 60; 335 mm · 510 mm), die 48 mit Substrat gefüllte Einzeltöpfe besitzen, mit einem Korn pro Einzeltopf bei einer Saattiefe von 0,5 cm ausgesät. Vor der Aussaat wurde das Saatgut vierzehn Tage bei 2 °C stratifiziert. Der Versuch wurde als Blockanlage in vierfacher Wiederholung ausgeführt, so daß pro Unkrautart 192 (4 · 48) Diasporen bzw. Samen in Substrat geprüft wurden. Die Bewässerung der Anzuchtplatten, die sich auf Anstautischen befanden, erfolgte nach Bedarf, so daß immer eine optimale Wasserversorgung gewährleistet war. Die Ergebnisse der Keimfähigkeits- und Anzuchtprüfungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Zugleich ist die daraus abgeleitete Anzahl der Samenkörner pro Tuff für die Aussaat angegeben.

Bei *Galinsoga parviflora* Cav. und *Polygonum lapathifolium* L. wurden für eine Kultivierung im größeren Maßstab zu geringe Keimfähigkeitswerte, insbesondere in Substrat, festgestellt. Deshalb wurden die Prüfstandsversuche mit den sechs Unkrautarten *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Chenopodium album* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., *Solanum nigrum* L. und

Tab. 3: Ergebnisse der Keimfähigkeitsprüfungen von ausgewählten Unkrautarten

Unkrautart	Saatgut-herkunft (Firma, Ort)	KF[1] nach TTC-Test[2] [%]	KF[1] nach FT- Test[3] [%]	KF[1] nach Substrat-Test[4] [%]	Aussaat-empfehlung[5] [Körner/Tuff]
Agropyron repens (L.) Beauv.	BSV, Ismaning	81	54	70	3
Amaranthus retroflexus L.	Bornträger, Offstein	95	42	73	3
Chenopodium album L.	Appel, Darmstadt	79	40	25	6
Echinochloa crus-galli (L.) Beauv.	Appel, Darmstadt	80	20	35	5
Galinsoga parviflora Cav.	Zeller, Riedern	27	13	3	-
Polygonum lapathifolium L.	Appel, Darmstadt	31	25	9	-
Solanum nigrum L.	Appel, Darmstadt	74	59	20	6
Stellaria media (L.) Vill.	Zeller, Riedern	66	9	27	5

[1] KF: Keimfähigkeit
[2] Tetrazolium-Test nach ISTA-Vorschriften
[3] Keimfähigkeitsprüfung in wasserbefeuchteten Filterpapiertaschen bei 20 °C nach 21 Tagen
[4] Keimprüfung in Floraton 1 (15% Tongehalt) mit 10 Vol.-% Quarzsand
[5] Aussaatempfehlung mit Sicherheitszuschlag

Stellaria media (L.) Vill. durchgeführt (Abbildung 15). Mit diesen sechs Unkrautarten war das Spektrum hinsichtlich unterschiedlicher Wuchshöhen in vollem Umfang abgedeckt.

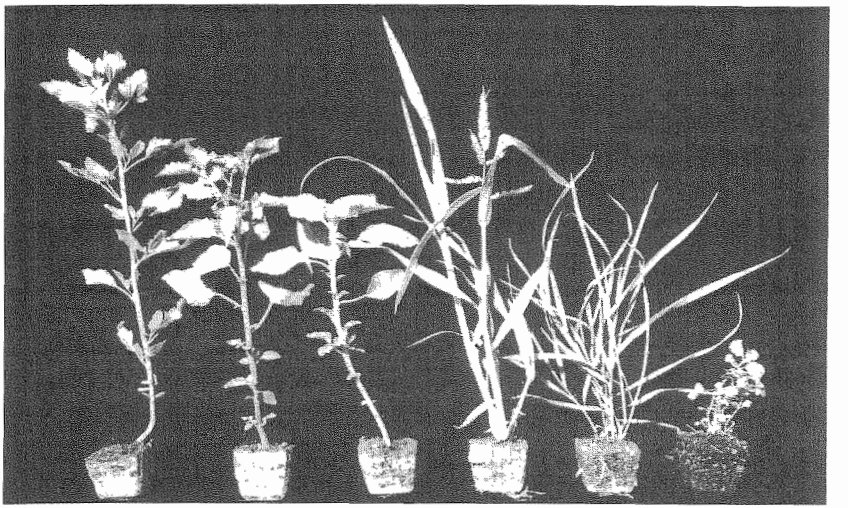


Abb. 15: Verwendete Unkrautarten der Prüfstandsversuche: CHEAL, SOLNI, AMARE, ECHCR, AGRRE und STEME (von links nach rechts)

Das Saatgut der jeweiligen Unkrautart wurde vor der Aussaat vierzehn Tage bei 2 °C stratifiziert und anschließend in die oben genannten Multitopfplatten mit der ermittelten Anzahl an Samen in Tuffs ausgesät. Die Saatgutablagetiefe betrug 0,5 cm. Damit sich in jedem Einzeltopf der Multitopfplatten genau eine Pflanze befand, wurden nach dem Auflaufen die überzähligen Pflanzen in EC 13 bis EC 20 (Keimblattstadium bis 1. Laubblattpaar) entfernt. Eine Multitopfplatte besaß somit 48 Einzelpflanzen und stellte eine Parzelle mit einer Dichte von 282 Pflanzen/m^2 dar. Jeder Pflanze stand ein Wurzelraum von 100 cm^3 zur Verfügung.

Die Testpflanzen wurden in den Vegetationsperioden der Jahre 1995, 1996 und 1997 in zwei Frühbeetkästen mit je 15 m^2 unter Freilandbedingungen am Standort

Dürnast (Versuchsstation des Lehrstuhls für Zierpflanzenbau) unweit der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (Wetterstation Weihenstephan) kultiviert (Abbildung 16). Zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen durch eventuellen Hagelschlag war ein Glasdach in 1,40 m Höhe über dem Bodenniveau angebracht.

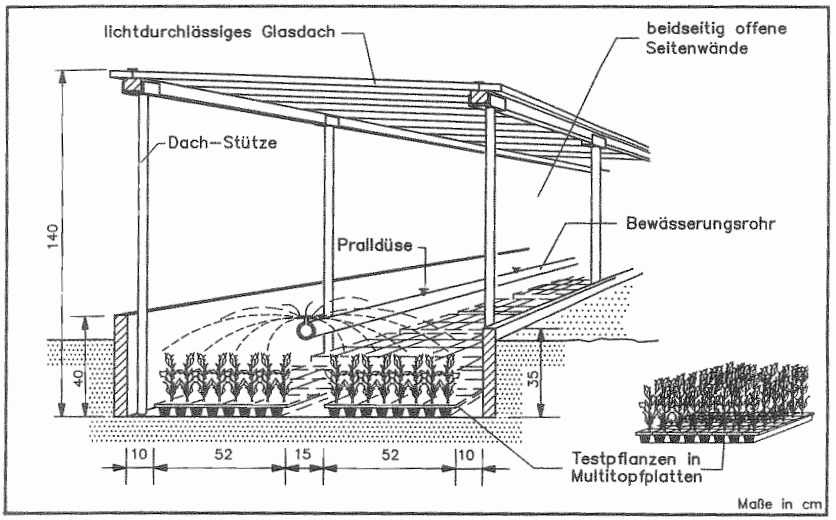


Abb. 16: Frühbeetkasten mit Hagelschutz (Querschnitt)

Die Bewässerung erfolgte nach Bedarf über ein mittig angeordnetes Regnerrohr. Die Düngung der Unkrautpflanzen wurde über das Gießwasser vorgenommen, dem ein flüssiger Volldünger (N/P/K: 8/8/8) zugesetzt wurde, so daß die Pflanzen immer mit einer 0,2 %-igen Düngerlösung versorgt wurden.

In begleitenden Untersuchungen wurde die Festigkeit der Testpflanzen mit der Detergentien-Analyse nach VAN SOEST (KIRCHGEßNER 1987) [102] überprüft. Damit sollte festgestellt werden, ob die kultivierten Unkräuter die gleiche Festigkeit aufwiesen wie die auf Ackerflächen gewachsenen Unkräuter. Zum Zeitpunkt der Behandlung wurden hierzu Testpflanzen aus den laufenden Versuchen entnommen.

Zeitgleich wurden Proben der entsprechenden Unkräuter und Ungräser im gleichen Entwicklungsstadium von Ackerflächen, die mit Mais bestellt waren, genommen. Die kultivierten Unkräuter und die Ackerunkräuter wurden bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurden in der Bayerischen Hauptversuchsanstalt für Landwirtschaft der TU München in Weihenstephan je 100 g TM auf den ADF- und den ADL- bzw. Lignin-Gehalt untersucht. Aus der Differenz von ADF und ADL errechnet sich der Gehalt an Cellulose. Der Gehalt an den Gerüstsubstanzen Lignin und Cellulose ist ein Maß für die Ausbildung von Festigungselementen im Pflanzensproß. Die Ergebnisse der VAN SOEST-Analyse sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tab. 4: ADF- und ADL-/Lignin- und Cellulose-Gehalt der Testpflanzen und Ackerunkräuter

Parameter	Unkrautart											
	AGRRE		AMARE		CHEAL		ECHCR		SOLNI		STEME	
	T[1]	A[2]	T[1]	A[2]	T[1]	A[2]	T[1]	A[2]	T[1]	A[2]	T[1]	A[2]
ADF-Gehalt [%]	22,8	26,9	16,0	13,4	11,8	14,6	16,2	19,4	15,0	22,7	24,6	22,7
ADL-/Lignin-Gehalt [%]	2,4	3,3	2,2	2,1	2,6	4,6	2,8	2,5	2,4	4,2	5,3	2,3
Cellulose-Gehalt [%]	20,4	23,6	13,8	11,3	9,2	10,0	13,4	16,9	12,6	18,5	19,3	20,4

[1] Im Frühbeetkasten kultivierte Testpflanzen
[2] Vom Acker entnommene Pflanzen

Der Vergleich von Testpflanzen und Ackerunkräutern ergab bei *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Chenopodium album* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. und *Solanum nigrum* L. geringere ADF-Werte und bei *Amaranthus retroflexus* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. höhere ADF-Werte für die im Frühbeetkasten kultivierten Testpflanzen. Hinsichtlich des Lignin-Gehalts wiesen die Ackerunkräuter von *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Chenopodium album* L. und *Solanum nigrum* L. höhere Werte als die angezogenen Testpflanzen auf, während für die Ackerunkräuter von *Amaranthus retroflexus* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. und *Stellaria media* (L.) Vill. niedrigere Lignin-Werte festgestellt wurden. Mit Ausnahme von *Solanum nigrum* L. befanden sich die Gehalte der Gerüstsubstanzen Lignin und Cellulose für Acker- und Testpflanzen auf ähnlichem Niveau mit der Tendenz, daß die Werte der Testpflanzen unter den Werten der Ackerunkräuter lagen. Dies war bedingt durch die optimale Wasserversorgung und die etwas windgeschütztere Lage der Testpflanzen im Frühbeetkasten.

4.1.3 Versuchsplanung

Mit den Prüfstandsversuchen sollte geklärt werden, wie sich die Arbeitsprinzipien Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben auf die sechs ausgewählten Unkrautarten auswirken. Zu Beginn wurden dafür zwei Leitunkräuter, die Dicotyle *Chenopodium album* L. und die Monocotyle *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., ausgewählt, da sie aufrund ihrer weiten Verbreitung von großer Bedeutung sind (KLINGENHAGEN 1995, HOFMEISTER und GARVE 1998) [105, 86]. Die Unkräuter bzw. Ungräser wurden in zwei verschiedenen Wuchsstadien behandelt. Das erste Wuchsstadium betrug 10 cm Wuchshöhe, da ein gewisser Unkrautaufwuchs zur Bodenbedeckung als Erosionsschutz notwendig ist. Das zweite Wuchsstadium lag bei einer Wuchshöhe von 20 cm, denn bei Unkrautpflanzen, die größer als 20 cm sind, steigt die Konkurrenz gegenüber der Nutzpflanze aufgrund zunehmender Beschattung stark an. Bei der Behandlung wurden die Schädigungswerkzeuge in zwei Abtrennhöhen eingesetzt. Als niedrigste Abtrennhöhe wurde 2 cm über der Bodenoberfläche gewählt, da bei einer geringeren Abtrennhöhe das Schädigungswerkzeug beim Feldeinsatz wegen Bodenunebenheiten in den Boden eingreifen

würde. Die zweite Abtrennhöhe betrug 5 cm über dem Boden, denn bei höheren Werten wurde keine nachhaltige Schädigungswirkung erwartet.

Die Versuche mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. zeigten, daß das technische Entlauben keine zufriedenstellende Wirkung hinsichtlich eines hohen Regulierungserfolges hatte. Um Erkenntnisse über die Auswirkung des Arbeitsprinzips Entlauben zu gewinnen, wurde bei den Unkrautarten *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. in einem weiteren Versuch eine Entlaubung von Hand vorgenommen.

Nachfolgend schlossen sich die Prüfstandsversuche mit den vier Unkrautarten *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Solanum nigrum* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. an. Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen konzentrierten sich diese Versuche auf den Einsatz der erfolgreichen Schädigungswerkzeuge sowie auf die Abtrennhöhe, die eine nachhaltigere Schädigung zur Folge hatte.

Zusätzlich wurden zur Optimierung der tatsächlichen Abtrennhöhe bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. verschiedene Bauarten von Schädigungswerkzeugen mit den Arbeitsprinzipien Abschneiden und Abschlegeln geprüft.

Im folgenden werden für die einzelnen Versuchsabschnitte jeweils die Schädigungswerkzeuge, die Testpflanzen, die Versuchsanlage sowie die Versuchsdurchführung und -auswertung vorgestellt.

4.1.4 Versuche zum Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben von CHEAL und ECHCR

Die Versuche mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., standen am Beginn der Serie der Prüfstandsversuche. Nachfolgend werden die verwendeten Schädigungswerkzeuge sowie die Versuchsanlage, -durchführung und -auswertung beschrieben.

4.1.4.1 Schädigungswerkzeuge

Zur Erprobung der Arbeitsprinzipien Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben wurden drei Rotoren mit entsprechenden Schädigungswerkzeugen angefertigt. Die verwendeten Versuchsrotoren mit ihren Schädigungswerkzeugen sind in Abbildung 17 dargestellt.

Am Schneidrotor waren sechs drehbar gelagerte Messerklingen (m_{Messer} = 200 g) befestigt, die gleichmäßig über 360° verteilt waren. Die Klingen wiesen eine „glatte" Schneide mit einer Länge von 100 mm auf. Der Keilwinkel der Schneide betrug 24,8°, da nach FISCHER-SCHLEMM und EGGERT 1953 [60] im Hinblick auf eine gute Schneidfähigkeit und ausreichende Standzeit für das Schneiden von Halmgut ein Keilwinkel von etwa 24° als optimal ermittelt wurde. Da es sich bei den Testpflanzen um junges, weiches Pflanzenmaterial handelte, wurde ohne Freiwinkel geschnitten (WIENEKE 1972) [207], so daß der Sproß der Testpflanzen in einem Schnittwinkel von 24,8° durchtrennt wurde.

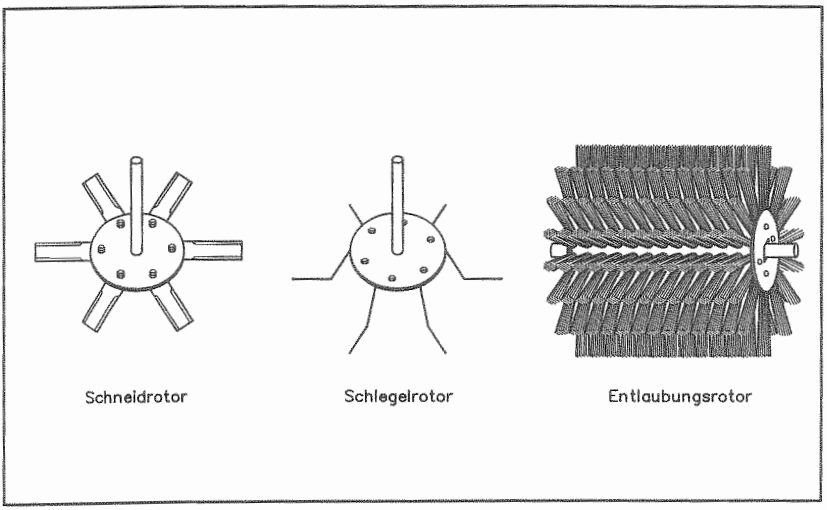


Abb. 17: Verwendete Schädigungswerkzeuge

Der Schlegelrotor besaß sechs gekröpfte Federzinken aus 6 mm Rundstahl, die jeweils im Winkel von 60° angeordnet waren. Die Drehrichtung des Schlegelrotors war so festgelegt, daß die Federzinken beim Einsatz „auf Griff" arbeiteten. Die Spiralfedern der Federzinken waren während des Abschlegelns somit auf Druck belastet. Dadurch war die Abschlagwirkung aggressiver als bei einer Belastung auf Zug.

Zum technischen Entlauben der Testpflanzen wurde ein Entlaubungsrotor konstruiert. Der Rotor bestand aus dreizehn Rundbürsten, die auf einen horizontalen Korpus aufgeschoben waren. Um ein Verdrehen der Rundbürsten zu verhindern, besaß der Korpus vier Nuten, in die die Nasen der Rundbürsten eingriffen. In den Korpus war die horizontale Antriebswelle eingeschoben. Jede Rundbürste hatte vierzehn über den Umfang verteilte Büschel, die mit je 25 Polypropylenborsten (1,4 mm · 2,4 mm) locker bestückt waren.

Der horizontal rotierende Schneidrotor, der horizontal rotierende Schlegelrotor und der vertikal rotierende Entlaubungsrotor verfügten über den gleichen Durchmesser von 550 mm, so daß die drei Werkzeuge bei derselben Umfangsgeschwindigkeit hinsichtlich ihrer Wirkung verglichen werden können. Alle drei Rotoren wiesen eine Arbeitsbreite von 550 mm auf. Die Wellendrehzahl der Rotoren betrug 1020 ± 5 1/min. Daraus resultiert eine Umfangsgeschwindigkeit an der jeweiligen Werkzeugspitze von 29,4 m/s. Nach WIENEKE 1972 [207] ist damit die Bedingung von mindestens 25 m/s für den freien Schnitt ohne Gegenschneide erfüllt. Somit erfolgte bei einer translatorischen Geschwindigkeit von 8,0 km/h alle 28 mm eine neue Zykloidenbahn bei einer wirksamen Eingriffslänge der Werkzeuge von 100 mm und mehr. Das Entlaubungswerkzeug rotierte in Fahrtrichtung, damit die jungen Unkrautpflanzen aufgrund ihres geringen Biegewiderstands nicht bereits vor dem Kontakt „Bürste-Pflanze" durch den Luftstrom, der durch die Rotationsbewegung des Bürstenrotors erzeugt wird, auf den Boden gedrückt wurden.

4.1.4.2 Versuchsanlage

Für die Versuche mit Unkräutern und Ungräsern lagen keine Erkenntnisse über die Mindestanzahl der Wiederholungen und über die optimale Anzahl der Testpflanzen pro Teilparzelle vor.

Bestimmung der Mindestwiederholungsanzahl und der Testpflanzenanzahl

Zur Klärung dieser Fragen wurde ein Versuch mit *Chenopodium album* L., der als Blockanlage in elffacher Wiederholung angelegt war, vorgeschaltet. Die Unkrautart *Chenopodium album* L. wurde in einem Gewächshaus des Lehrstuhls für Zierpflanzenbau in Dürnast bei 18 °C am Tag und 16 °C in der Nacht angezogen. Unter Verwendung von Zusatzlampen wurde ein 16 Stunden-Tag simuliert. Die Zusatzbelichtung wurde auch tagsüber bei Einstrahlungswerten unter 1000 $\mu mol/m^2 \cdot s$ eingeschaltet. Für die Zusatzbelichtung wurden die Pflanzenbestrahlungsleuchten SON-T AGRO 400 (SGR 200/400K) der Firma Philips verwendet. Das Saatgut von *Chenopodium album* L. wurde von Hand in mit Substrat gefüllte Multitopfplatten (Quickpot 60, 48 Einzeltöpfe/Platte) so ausgesät, daß sich sechs Diasporen in jedem Einzeltopf befanden. Die Saattiefe betrug 0,5 cm. Vor der Aussaat wurde das Saatgut vierzehn Tage bei 2 °C stratifiziert. Da zum Zeitpunkt der Behandlung nur eine Pflanze pro Einzeltopf vorhanden sein sollte, wurden die überzähligen Pflanzen im Keimblatt-Stadium entfernt. Für eine optimale Wasserversorgung wurden die Multitopfplatten, die sich auf Anstautischen befanden, nach Bedarf über ein Vorratsbecken mit einer Tauchpumpe bewässert. Die Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen erfolgte über das Gießwasser, dem immer ein flüssiger Volldünger (N/P/K: 8/8/8) in 0,2 % zudosiert wurde.

Als mechanisches Schädigungsprinzip wurde Abschneiden gewählt. Die Unkrautpflanzen wurden bei einer durchschnittlichen Wuchshöhe von 20 cm von Hand mit einer Schere in exakt 2 cm bzw. 5 cm über dem Boden abgeschnitten. Für Vergleichszwecke gab es eine unbehandelte Kontrolle. Nach der Behandlung wurde der Wiederaufwuchs von *Chenopodium album* L. zwanzig Tage lang beobachtet. Zur

Quantifizierung des Wiederaufwuchses wurde die Trockenmasse der verbleibenden oberirdischen Pflanzenmasse 0, 10 und 20 Tage nach der Behandlung bestimmt. Dafür wurde jede Parzelle, die aus 72 Einzelpflanzen bestand, in 3 Teilparzellen mit je 24 Pflanzen unterteilt. Die 12 inneren Pflanzen (Kern) und die 12 äußeren Pflanzen (Rand) wurden getrennt abgeerntet und verwogen. Die Ermittlung der Trockenmasse erfolgte in einem Trockenschrank (DIN 50 011) [39] durch Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz und anschließender Wiegung mit einer digitalen Analysenwaage (DIN 81 20) [38], die eine Genauigkeit von $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ kg aufwies, in Anlehnung an DIN 10 360 [37].

Der Regulierungserfolg der Behandlung von *Chenopodium album* L., gemessen als Trockenmasse, ist nachfolgend angegeben. Während Tabelle 5 die Trockenmasse der Kernbeerntung (12 Pflanzen) angibt, enthält Tabelle 6 die Trockenmasse der gesamten Teilparzelle (24 Pflanzen), die sich aus den Werten der 12 Kernpflanzen und der 12 Randpflanzen berechnet.

Die gewonnenen Daten wurden mit einem Homogenitätstest nach DAVID, HARTLEY und PEARSON 1954 [32] und PEARSON und STEPHENS 1964 [160] geprüft. Die Hypothese, daß die Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt, konnte angenommen werden. Daher konnte die Bestimmung des Mindeststichprobenumfangs nach folgender Formel [11] durch Iteration erfolgen:

$$\text{Stichprobenumfang } n = 2 \cdot [\,(t_{(\alpha,FG(R))} + t_{(\beta,FG(R))}) \cdot s_R / \delta\,]^2 \qquad (2)$$

mit:

t: t-Tabellenwert
α: Irrtumswahrscheinlichkeit (Fehler 1. Art)
β: Irrtumswahrscheinlichkeit (Fehler 2. Art)
FG(R): (Anzahl der Prüfglieder - 1) · (n - 1)
n: Anzahl der Wiederholungen
s_R: Standardabweichung $_{Rest}$
δ: Mittelwertdifferenz

Tab. 5: Trockenmasse von *Chenopodium album* L. nach 0, 10 und 20 Tagen nach der Behandlung bei 12 Pflanzen/Teilparzelle (Kern)

Variante	Trockenmasse [g/Teilparzelle]		
	Tage nach der Behandlung		
	0	10	20
Kontrolle (unbehandelt)	2,7	5,7	9,3
Abschneiden in 2 cm Höhe über dem Boden	0,3	0,3	0,3
Abschneiden in 5 cm Höhe über dem Boden	0,5	0,6	0,7

Tab. 6: Trockenmasse von *Chenopodium album* L. nach 0, 10 und 20 Tagen nach der Behandlung bei 24 Pflanzen/Teilparzelle (Kern + Rand)

Variante	Trockenmasse [g/Teilparzelle]		
	Tage nach der Behandlung		
	0	10	20
Kontrolle (unbehandelt)	5,4	11,5	17,9
Abschneiden in 2 cm Höhe über dem Boden	0,6	0,6	0,7
Abschneiden in 5 cm Höhe über dem Boden	1,0	1,2	1,5

Aus den Werten von Tabelle 5 geht hervor, daß in diesem Vorversuch die kleinste Mittelwertdifferenz 0,2 g beträgt. Um diese Differenz statistisch absichern zu können, sind unter der Bedingung $\alpha = 5$ % und $\beta = 1$ % und bei einer errechneten Standardabweichung$_{Rest}$ $s_R = 0{,}0633$ mindestens fünf Wiederholungen nötig. Bei einem Vergleich der Werte von Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigt sich, daß die Werte von 12 Pflanzen/Teilparzelle mit den Werten von 24 Pflanzen/Teilparzelle eng miteinander korrelieren. Deshalb sind 12 Pflanzen/Teilparzelle zur statistischen

Absicherung der Prüfstandsversuche ausreichend. Wie der Versuch mit 24 Pflanzen/Teilparzelle gezeigt hat, können Randpflanzen in die Versuchsauswertung einbezogen werden, falls der Randeffekt für alle Parzellen identisch ist.

Aufbau der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage befand sich in den zwei beschriebenen Frühbeetkästen (Kapitel 4.1.2). Die beiden Frühbeetkästen waren zunächst mit *Chenopodium album* L. und anschließend mit *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. belegt. Aus versuchstechnischen Gründen wurde als Anlageform eine dreifaktorielle, zweistufige Spaltanlage [11, 196] mit sieben Wiederholungen mit den Prüffaktoren Wuchsstadium der Unkräuter, Abtrennhöhe über dem Boden und verwendete Werkzeugart gewählt (Abbildung A1). Die Wiederholungsanzahl wurde aus Sicherheitsgründen von den erforderlichen fünf auf sieben Wiederholungen erhöht. Die Anlageform der Spaltanlage zeichnet sich durch einen relativ geringen Platzbedarf aus und ermöglicht eine rationelle Versuchsdurchführung. Zudem konnte mit dieser Anlageform eine Beschattung der beiden Wuchsstadien ausgeschlossen werden, da für jedes Wuchsstadium ein eigener Frühbeetkasten zur Verfügung stand.

Der Faktor Wuchsstadium wurde in den zwei Stufen 10 cm und 20 cm Wuchshöhe der Unkräuter und der Faktor Abtrennhöhe in den zwei Stufen 2 cm und 5 cm über der Bodenoberfläche geprüft. Der Prüffaktor Werkzeugart bestand aus den drei Behandlungsvarianten Schneidrotor (C: cutter disc), Schlegelrotor (F: flail disc) und Entlaubungsrotor (S: stripper) sowie einer unbehandelten Kontrolle (K) zum Vergleich.

Eine Multitopfplatte mit 48 Einzelpflanzen stellte eine Parzelle dar, die aufgrund der drei Boniturtermine in drei Teilparzellen mit je 16 Pflanzen unterteilt war. Damit war die Bedingung einer ausreichenden Anzahl an Testpflanzen erfüllt. Um die statistische Absicherung der Ergebnisse zu verbessern, wurde die Individuenanzahl pr Teilparzelle von 12 auf 16 Pflanzen erhöht. Hierzu konnten die Randpflanzen d jeweiligen Parzelle einbezogen werden, da der Randeffekt für alle Parzell

identisch war. Der Randeffekt auf die äußeren Parzellen wurde durch eine Randbepflanzung von je einer Multitopfplatte an den Stirnseiten der Frühbeetkästen ausgeschlossen. Insgesamt befanden sich in den beiden Frühbeetkästen 5760 Einzelpflanzen je Unkrautart, wovon 5376 Testpflanzen für die Versuchsdurchführung verwendet wurden.

4.1.4.3 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Behandlung von *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. erfolgte mit den beschriebenen Schädigungswerkzeugen, als die jeweils festgelegte Wuchhöhe (10 cm bzw. 20 cm) erreicht war. Die Versuchsanordnung ist in den Abbildungen 18 und 19 dargestellt. Der Zeitbedarf für die Behandlung mit dem jeweiligen Schädigungswerkzeug lag bei jeweils zwei Stunden, so daß die Behandlung eines Wuchsstadiums innerhalb von sechs Stunden abgeschlossen war.

Datenerfassung

Nachfolgend schloß sich die Ermittlung des Regulierungserfolges und des Wiederaufwuchses an. Dafür wurden jeweils 0, 10 und 20 Tage nach der Behandlung eine Bonitur und eine Beerntung einer Teilparzelle mit jeweils 16 Einzelpflanzen vorgenommen. Um den Regulierungserfolg und den Wiederaufwuchs zu quantifizieren, wurden die Merkmale Wuchshöhe, abgedeckte Bodenfläche, Blatt- und Triebanzahl, Blattfläche und die aufgewachsene Trockenmasse bestimmt. Die Merkmale wurden nicht für jede Einzelpflanze, sondern für die gesamte Teilparzelle erfaßt, damit der Einfluß der genetischen Variabilität der Unkräuter begrenzt blieb.

Die Wuchshöhe wurde mit einem Meterstab mit einer Genauigkeit von ± 5 mm gemessen. Die von den Testpflanzen abgedeckte Bodenoberfläche wurde als Summe der abgedeckten Bodenoberflächen der Einzelpflanzen einer Teilparzelle mittels einer Monochrome-CCD-Kamera der Firma Baxall, eines Leuchtschirmes und einer

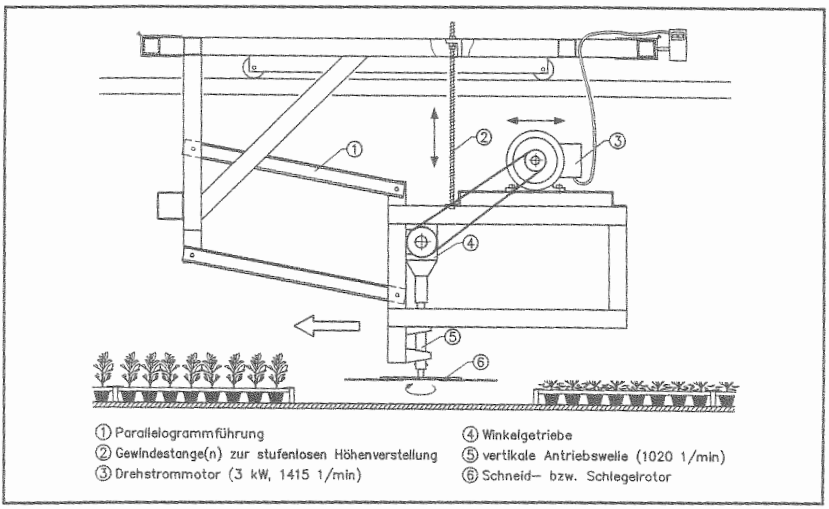


Abb. 18: Anordnung der Testpflanzen und des Versuchsgeräts (Seitenansicht) während der Behandlung mit dem Schneid- bzw. Schlegelrotor

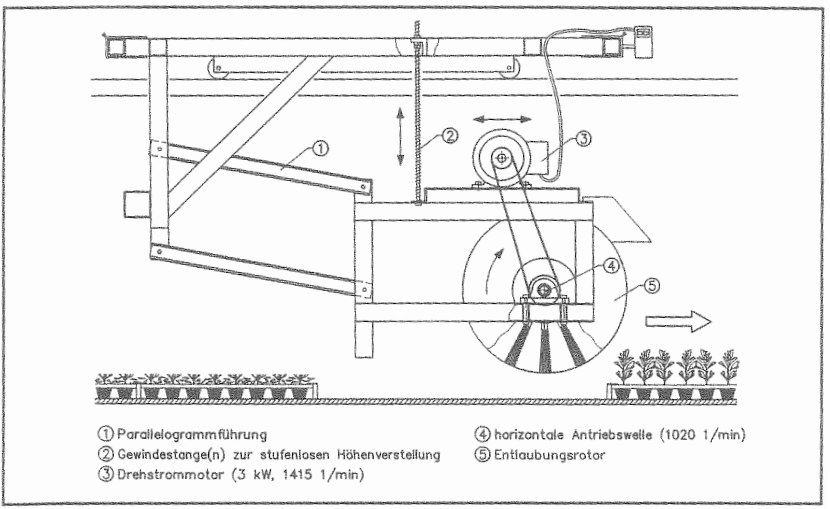


Abb. 19: Anordnung der Testpflanzen und des Versuchsgeräts (Seitenansicht) während der Behandlung mit dem Entlaubungsrotor

Auswertungseinheit ΔT AREA METER MK 2 der Firma Delta-T Devices mit der Meßgenauigkeit von ± 1 cm² erfaßt. Die Anzahl der Blätter und Triebe der Teilparzelle wurde ausgezählt. Die Blattflächenmessung erfolgte mit dem Blattflächenmeßgerät LI-3100 der Firma LI-COR mit einer Meßgenauigkeit von ± 0,1 cm². Hierzu wurden die Blätter manuell von den Testpflanzen entfernt und in das Blattflächenmeßgerät eingelegt.

Zur Bestimmung der Trockenmasse wurden die abgeernteten Testpflanzen in einem Trockenschrank (DIN 50 011) [39] bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend mit einer digitalen Analysenwaage (DIN 81 20) [38], die eine Genauigkeit von $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ kg aufwies, in Anlehnung an DIN 10 360 [37] gewogen. Zur Dokumentation wurden zusätzlich photographische Aufnahmen der geschädigten Unkräuter und Ungräser angefertigt.

Statistische Auswertungsverfahren

Die Durchführung der statistischen Auswertung erfolgte mit dem PC-Statistikprogramm SPSS® 7.5 [187]. Vor der varianzanalytischen Verrechnung wurden die erhobenen Daten auf Normalverteilung mit dem Homogenitätstest nach DAVID et al. 1954 [32] und PEARSON und STEPHENS 1964 [160] geprüft. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 5 % lagen fast alle Quotienten „Spannweite/Standardabweichung" innerhalb der kritischen Grenzen von 2,40 und 3,22. Einzelne Werte besaßen geringfügige Abweichungen von diesen kritischen Grenzen. Die Daten dieser Prüfglieder wurden auf Schiefe und Wölbung der Verteilung getestet. Die Werte dieser Datensätze wiesen für die Schiefe Werte von 0 bis ± 1 und für die Wölbung von 0 bis ± 3 auf. Damit sind die Bedingungen für die Normalverteilung erfüllt, so daß die Annahme, die Daten sind sinnvoll normalverteilt, angenommen werden konnte. Die varianzanalytische Verrechnung der Daten erfolgte mit der Prozedur ANOVA (Analysis of Variance) bzw. GLM (General Linear Model) bei α = 5 % für den F-Test. Anschließend wurden die Daten einem Mittelwertsvergleich mit dem Student-Newman-Keuls-Signifikanztest bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 5 % unterzogen, da zwischen den Prüfgliedern

signifikante Unterschiede festgestellt wurden. Der Student-Newman-Keuls-Test wurde ausgewählt, da er sich durch eine konstante Irrtumswahrscheinlichkeit α bei zunehmender Prüfgliedanzahl auszeichnet (WEBER 1972, PRECHT und KRAFT 1993) [198, 164]. Auch das staatliche Versuchswesen (Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Sachgebiet Biometrie) nutzt bereits langjährig die Vorteile des Student-Newman-Keuls-Test in der Auswertung seiner Versuche im Acker- und Pflanzenbau. Der Student-Newman-Keuls-Test eignet sich sowohl für die Prüfstands- als auch für die nachfolgenden Feldversuche, die in der Kultur Mais durchgeführt wurden. Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern sind im Kapitel 4.2 „Prüfstandsversuche - Ergebnisse" mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. Hierbei sind signifikante Unterschiede nur für die beiden erfolgreichen Varianten C und F ausgewiesen, da das technische Entlauben (Variante S) mit der Rotorbürste nicht den gewünschten Erfolg erzielte. Weiterhin wurden bei den Versuchen mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. Signifikanztabellen für die Varianten C und F über alle Meßgrößen außer der Wuchshöhe, da sie kein geeignetes Maß zur Quantifizierung des Regulierungserfolges bzw. Wiederaufwuchses ist, erstellt. Die Buchstaben (a, b, c, etc.) wurden in Zahlen (1, 2, 3, etc.) umgewandelt; dabei entspricht a der Zahl 1, etc. Abschließend erfolgte die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes über alle verrechneten Meßgrößen für jede Behandlungsvariante, so daß die Varianten mit dem kleinsten Wert hinsichtlich des Regulierungserfolges bzw. Wiederaufwuchses zu bevorzugen sind. Zusätzlich wurden die Korrelationen zwischen den einzelnen Meßgrößen berechnet.

Zudem wurde für jedes erfaßte Merkmal eine Multiple Classifikations-Analyse (BACKHAUS et al. 1990) [9] berechnet, um den Anteil der Varianz des jeweiligen Prüffaktors an der Gesamtvarianz zu schätzen. Dadurch kann der Grad des Einflusses für jeden Prüffaktor bestimmt werden.

Die graphische Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte mit dem PC-Programm Xact® in der Version 5.00f [184]. In den Graphiken sind die Mittelwerte der jeweiligen Variante gezeigt. Zudem sind die Minima und Maxima und die signifikanten Unterschiede für alle gemessenen Parameter außer der Wuchshöhe dargestellt.

4.1.5 Versuche zur Handentlaubung von CHEAL und ECHCR

Die im folgenden beschriebenen Versuche zur Handentlaubung wurden an *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. vorgenommen, um Erkenntnisse über die Auswirkungen des Arbeitsprinzips Entlauben zu erlangen.

4.1.5.1 Versuchsanlage

Für die Handentlaubung standen die Testpflanzen der jeweiligen Unkrautart in einer einfaktoriellen Blockanlage mit sieben Wiederholungen (Abbildung A2). Das manuelle Entlauben (mS: manual stripping) wurde gegenüber einer unbehandelten Kontrolle (K) geprüft. Die Prüffaktoren Wuchsstadium der Unkräuter und Abtrennhöhe über dem Boden blieben dabei konstant. Das Wuchsstadium betrug 20 cm Wuchshöhe und als Abtrennhöhe wurde 20 mm festgelegt.

4.1.5.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die beiden Unkrautarten *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. wurden von Hand so entlaubt, daß der Stengel bzw. der Haupttrieb unbeschädigt blieb. Bei *Chenopodium album* L. wurde zudem die Gipfelknospe mit dem Vegetationskegel (Apex) entfernt und damit die apikale Dominanz gebrochen [190]. Die Gipfelknospe wurde deshalb entfernt, da diese beim technischen Entlauben zusätzlich zu den Blättern abgerissen würde.

Datenerfassung

Die Versuche wurden wie im vorangehenden Versuch 0, 10 und 20 Tage nach der Behandlung bonitiert. Hierbei wurden neben der photographischen Dokumentation die Wuchshöhe und die Trockenmasse der Unkräuter erfaßt. Die Bestimmung der

Wuchshöhe und der Trockenmasse erfolgte in gleicher Weise wie in Kapitel 4.1.4.3 beschrieben.

Statistische Auswertungsverfahren

Die statistische Auswertung und die graphische Bearbeitung der Daten erfolgte wie in Kapitel 4.1.4.3 beschrieben. Da nur zwei Prüfglieder getestet wurden, reichte zur Bestimmung der signifikanten Unterschiede die Varianzanalyse mit nachfolgendem F-Test aus. Signifikante Unterschiede sind durch verschiedene Buchstaben aufgezeigt. Die graphische Auswertung der Ergebnisse erfolgte analog Kapitel 4.1.4.3.

4.1.6 Versuche zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE, AMARE, SOLNI und STEME

Aufgrund der Erkenntnisse der Prüfstandsversuche mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. konzentrierten sich die Untersuchungen an *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Solanum nigrum* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. auf die Schädigungsprinzipien Abschneiden und Abschlegeln bei einer Abtrennhöhe von 20 mm.

4.1.6.1 Schädigungswerkzeuge

Als Schädigungswerkzeuge kamen der in Kapitel 4.1.4.1 beschriebene Schneid- und Schlegelrotor zum Einsatz (Abbildung 17). Aufgrund von Vorversuchen mit *Agropyron repens* (L.) Beauv. wurde die Wellendrehzahl der Rotoren auf 1950 ± 5 1/min erhöht, so daß die Umfangsgeschwindigkeit an der Werkzeugspitze 56,2 m/s betrug. Die Umfangsgeschwindigkeit war damit im Bereich der optimalen Schneidgeschwindigkeit, die SCHEUFLER 1984 [172] in Feldversuchen bei Gras mit mindestens 50 m/s bestimmt hat. Damit erfolgte bei 8,0 km/h alle 15 mm eine neue Zykloidenbahn bei einer wirksamen Klingen- bzw. Schlegellänge von 100 mm.

4.1.6.2 Versuchsanlage

Der Versuch wurde in Form einer zweifaktoriellen Spaltanlage [11, 196] mit der geforderten Anzahl von fünf Wiederholungen mit den Prüffaktoren Wuchsstadium der Unkräuter und verwendete Werkzeugart (Abbildung A3) durchgeführt. Aufgrund der gewonnenen Sicherheit in der Kultivierung homogener Testpflanzenbestände waren die zwei zusätzlichen Wiederholungen nicht mehr erforderlich. Der Prüffaktor Wuchsstadium der Unkräuter bestand aus den zwei Stufen 10 cm und 20 cm Wuchshöhe. Im Faktor Werkzeugart wurden die zwei Varianten Schneidrotor (C) und Schlegelrotor (F) sowie zum Vergleich die unbehandelte Kontrolle (K) geprüft.

4.1.6.3 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuche zum Abschneiden und Abschlegeln von *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Solanum nigrum* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. erfolgten analog den Prüfstandsversuchen zum Abscheiden, Abschlegeln und Entlauben von *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (Kapitel 4.1.4). Da für die Prüfmerkmale abgedeckte Bodenfläche, Blattanzahl und -fläche gegenüber der Prüfgröße Trockenmasse sehr hohe Korrelationskoeffizienten von 0,87 bis 0,98 berechnet wurden, beschränkten sich die Versuche auf die Ermittlung der aussagekräftigen Größe Trockenmasse und auf die Wuchshöhe. Die statistische Verrechnung und graphische Auswertung der Versuchsdaten wurde, wie in Kapitel 4.1.4.3 beschrieben, durchgeführt.

4.1.7 Versuche mit verschiedenen Werkzeugtypen zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE

Die Versuche zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE, AMARE, SOLNI und STEME (Kapitel 4.1.6) zeigten, daß sich bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. bei Einsatz des in Kapitel 4.1.4.1 beschriebenen Schlegelrotors die tatsächliche

Abtrennhöhe von der eingestellten Abtrennhöhe (20 mm) unterschied. Zur Ermittlung der Auswirkungen der Werkzeugform auf die Abtrennhöhe wurden Versuche mit unterschiedlichen Schneid- und Schlegelrotoren bei verschiedenen Vorfahrtsgeschwindigkeiten durchgeführt. Damit sollte bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. als Beispielspflanze für Ungräser eine optimale Werkzeugausformung gefunden werden, die unter den gegebenen Einsatzbedingungen die vorgegebene Abtrennhöhe einhält und die gewünschte Schädigungswirkung erzielt. Die verschiedenen Werkzeugtypen wurden bei unterschiedlichen Vorfahrtsgeschwindigkeiten getestet, um festzustellen, ob ein Einfluß der Vorfahrtsgeschwindigkeit auf das Schädigungsergebnis vorliegt.

4.1.7.1 Schädigungswerkzeuge

Bei den Versuchen mit *Agropyron repens* (L.) Beauv. kamen sechs verschiedene Rotoren zum Einsatz (Abbildung 20). Für das Abschneiden von *Agropyron repens*

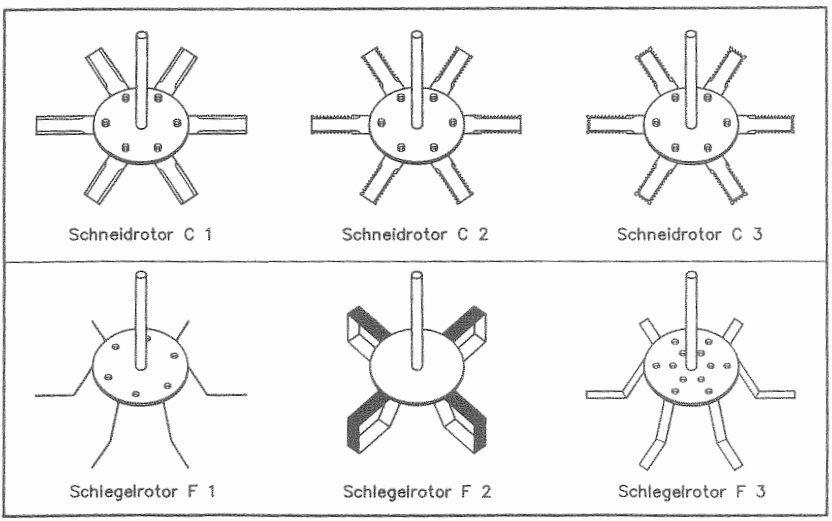


Abb. 20: Verwendete Schädigungswerkzeuge zum Abschneiden und Abschlegeln von *Agropyron repens* (L.) Beauv.

(L.) Beauv. wurden drei Schneidrotoren (C1, C2, C3) angefertigt, die mit unterschiedlichen Messern bestückt waren. Der Schneidrotor C1 besaß Klingen mit „glatten" Schneiden, der Schneidrotor C2 mit „gezahnten" und der Schneidrotor C3 mit „rundum gezahnten" Schneiden. Zum Abschlegeln von *Agropyron repens* (L.) Beauv. wurden ebenfalls drei verschiedene Rotoren geprüft. Der Schlegelrotor F1 entspricht dem in Kapitel 4.1.4.1 beschriebenen Schlegelrotor. Der auch bei den Feldversuchen eingesetzte Rotor F2 wies geschlossene bügelförmige Schlegel auf. Die gekröpften Schlegel des Schlegelrotors F3 waren aus einem 6 mm dicken Flachstahl gefertigt. Alle sechs Rotoren wiesen einen Durchmesser von 550 mm auf. Die Umfangsgeschwindigkeit an der Werkzeugspitze für die verwendeten Rotoren lag bei 56,2 m/s und erfüllte die von SCHEUFLER 1984 [172] für Gras geforderten 50 m/s. Bei der translatorischen Geschwindigkeit von 8,0 km/h (6,0 km/h) ergab sich alle 15 mm (8 mm) bzw. bei dem Schlegelrotor F2 alle 22 mm (12 mm) eine neue Zykloidenbahn. Der Zykloidenkennwert $\varkappa$, der nach SCHEUFLER 1984 [172] bei Mähwerken in der Regel kleiner als 0,05 ist, betrug bei 8,0 km/h 0,040. Die wirksame Eingriffslänge der Werkzeuge von 100 mm reichte damit gut aus.

4.1.7.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Wirkung der in Kapitel 4.1.7.1 dargestellten Werkzeugformen auf die tatsächlich erreichte Abtrennhöhe der gut entwickelten Queckenpflanzen, die eine Wuchshöhe von 15 cm ± 2 cm aufwiesen, wurde bei unterschiedlichen Vorfahrtsgeschwindigkeiten untersucht. Der Test wurde bei 2,0 km/h, 4,0 km/h, 6,0 km/h und 8,0 km/h durchgeführt. Die eingestellte Abtrennhöhe über der Bodenoberfläche betrug 20 mm. Der Versuch wurde vierfach wiederholt, so daß bei jeder Variante die Stoppelhöhe von 192 (= 4 · 48) Queckenpflanzen erfaßt wurde. Die Messung der erreichten Stoppelhöhe erfolgte mit einem Meterstab und einem Anlegewinkel mit einer Genauigkeit von ± 1 mm. Aufgrund der Eindeutigkeit der Ergebnisse beschränkte sich die statistische Auswertung der Daten neben der Varianzanalyse auf die Multiple Classifikations-Analyse. Die graphische Darstellung der Daten erfolgte wie in Kapitel 4.1.4.3 beschrieben.

4.2 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse der Prüfstandsversuche mit den drei in Kapitel 2.4 beschriebenen Arbeitsprinzipien der mechanischen Schädigung, die an *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. durchgeführt wurden, dargestellt. Anschließend werden die Erkenntnisse der Handentlaubungsversuche mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. erläutert. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Prüfstandsversuche mit den weiteren vier Unkrautarten vorgestellt. Am Ende dieses Kapitels wird die Auswirkung von verschiedenen Werkzeugformen auf die Abtrennhöhe bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. beschrieben.

In den Abbildungen und Tabellen ist die jeweilige Variante durch den Kennbuchstaben K (Kontrolle), C (cutting; Abschneiden), F (flailing; Abschlegeln), S (stripping; Entlauben) und mS (manual stripping; Handentlaubung) und durch nachfolgende Zahlen gekennzeichnet. Die erste Zahl (10 bzw. 20) nach dem Kennbuchstaben steht für das Wuchsstadium 10 cm bzw. 20 cm Wuchshöhe. Die nach dem Bindestrich folgende zweite Zahl (2 bzw. 5) bestimmt die Abtrennhöhe über dem Boden von 2 cm bzw. 5 cm.

4.2.1 Versuche zum Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben von CHEAL und ECHCR

Die Ergebnisse der grundlegenden Prüfstandsversuche mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. sind im folgenden für die gemessenen Parameter Wuchshöhe, aufgewachsene Trockenmasse, Blattanzahl, Blattfläche und abgedeckte Bodenoberfläche sowie die Triebanzahl bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. je Unkrautart aufgeführt. Für die einzelne Unkrautart sind die Ergebnisse in Abbildungen, die in der Reihenfolge der Bonituren 0, 10 und 20 Tage nach der Behandlung angeordnet sind, dargestellt. Um einen besseren Überblick über die Einzelergebnisse zu erhalten, sind im Anschluß an die graphischen Darstellungen jeweils die in Kapitel 4.1.4.3 beschriebenen Signifikanztabellen eingefügt.

In Bezug auf das Prüfmerkmal „aufgewachsene Trockenmasse" wurden in den Versuchen mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. für die Prüfmerkmale Blattanzahl (r = 0,87 bis 0,97), Blattfläche (r = 0,93 bis 0,98) und abgedeckte Bodenoberfläche (r = 0,89 bis 0,98) hohe Korrelationskoeffizienten ermittelt. Für den Parameter Wuchshöhe lagen die Korrelationskoeffizienten bei 0,75 bis 0,91. Die nur im Versuch mit *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. erhobene Triebanzahl korrelierte mit der Trockenmasse in geringerem Ausmaß (r = 0,66 bis 0,74). Die Ergebnisse der Multiplen Classifications-Analyse werden bei der jeweiligen Unkrautart im Text erläutert.

Die Versuche zum Entlauben von *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. zeigten, daß durch die Behandlung mit dem Entlaubungsrotor keine nachhaltige Unterdrückung des Unkrautwachstums erzielbar war. Zur Erforschung der Ursachen wurden während der Behandlung Aufnahmen mit einer Videokamera im High-Speed-Modus gemacht. Auch GASPARETTO 1969 [64] und GASPARETTO et al. 1989 [65] haben zur Klärung der Vorgänge bei Futtererntemaschinen und im Mähdrescher High-Speed-Filmaufnahmen verwendet. Die Auswertung der Videoaufnahmen ergab, daß die Testpflanzen durch die vom Entlaubungsrotor erzeugte Luftbewegung auf den Boden und zur Seite gedrückt wurden. Dieser Effekt konnte weder durch eine Veränderung der Rotordrehrichtung noch durch eine geringere Borstendichte der Bürste ausgeschaltet werden.

4.2.1.1 Versuch mit CHEAL

Bei der varianzanalytischen Verrechnung der Varianten C und F wurden signifikante Unterschiede zwischen den Prüfgliedern festgestellt, die vorwiegend auf den Prüffaktoren Abtrennhöhe und Wuchsstadium beruhen. Vereinzelt trat die 2-Weg-Wechselwirkung „Wuchsstadium · Abtrennhöhe" auf. 3-Weg-Wechselwirkungen zwischen den drei Prüffaktoren wurden nicht ermittelt. Im Rahmen der Multiplen Classifikations-Analyse wurde bei allen Prüfmerkmalen (aufgewachsene Trockenmasse, Blattanzahl, Blattfläche und abgedeckte Bodenfläche) und allen Boniturterminen folgender Einfluß auf den Regulierungserfolg gefunden: Den größten Einfluß besaß immer die Abtrennhöhe gefolgt vom Prüffaktor

„Wuchsstadium". Der Faktor „Werkzeug" hatte von den drei Prüffaktoren die geringste Wichtigkeit in Bezug auf den Regulierungserfolg und den Wiederaufwuchs. Die multiplen R^2 betrugen für die Trockenmasse 0,66 bis 0,85, für die abgedeckte Bodenoberfläche 0,57 bis 0,69 sowie für die Blattanzahl 0,77 bis 0,91 und die Blattfläche 0,62 bis 0,82. In allen Fällen stieg das multiple R^2 von 0 Tage nach Behandlung bis 20 Tage nach Behandlung an. Dies bedeutet, daß mit zunehmender Beobachtungsdauer sich die Güte der oben getroffenen Aussage verbesserte.

0 Tage nach der Behandlung

Bei Betrachtung der Wuchshöhe direkt nach der Behandlung (Abbildung 21) ist festzustellen, daß die vorgegebene Abtrennhöhe immer eingehalten wurde, außer bei den Versuchsgliedern, die mit dem Entlaubungsrotor behandelt wurden. Hinsichtlich der verbleibenden Trockenmasse waren die Varianten C 10-2, F 10-2 und F 20-2 signifikant am besten (Abbildung 22). Sowohl bei der Anzahl Blätter wie auch der verbleibenden Blattfläche nach der Behandlung erzielten die Varianten mit der Abtrennhöhe 2 cm die signifikant geringsten Werte (Abbildung 23 und Abbildung 24). Bei der Blattfläche wiesen davon die Varianten mit dem exakten Schnitt tendeziell geringere Werte als die Varianten des Abschlegelns auf. In Abbildung 25 erzielte die Variante C 20-2 bedingt durch die höhere Wuchshöhe und den damit verbundenen späteren Schnitt bei der Behandlung den niedrigsten Wert für die abgedeckte Bodenfläche. Jedoch unterschieden sich nur die Varianten C 10-5 und F 10-5 mit den höchsten Werten signifikant von den anderen. Die Signifikanztabelle (Tabelle 7) nach den Abbildungen zeigt, daß die Varianten C 10-2, F 10-2 und F 20-2 über alle gemessenen Parameter signifikant die niedrigsten Werte erzielten. Die Variante C 20-2 folgt mit geringem Abstand den drei besten Varianten. Somit konnten hinsichtlich des Regulierungserfolges keine Unterschiede zwischen den eingesetzten Werkzeugen gefunden werden. Die Abtrennhöhe 2 cm lieferte wie erwartet die besseren Werte der gemessenen Parameter. Ein Unterschied zwischen dem Wuchsstadium 10 cm und 20 cm wurde im Wesentlichen nicht festgestellt. Bei der Abtrennhöhe von 5 cm erreichten die Varianten der Wuchshöhe 20 cm niedrigere Werte als die der Wuchshöhe 10 cm.

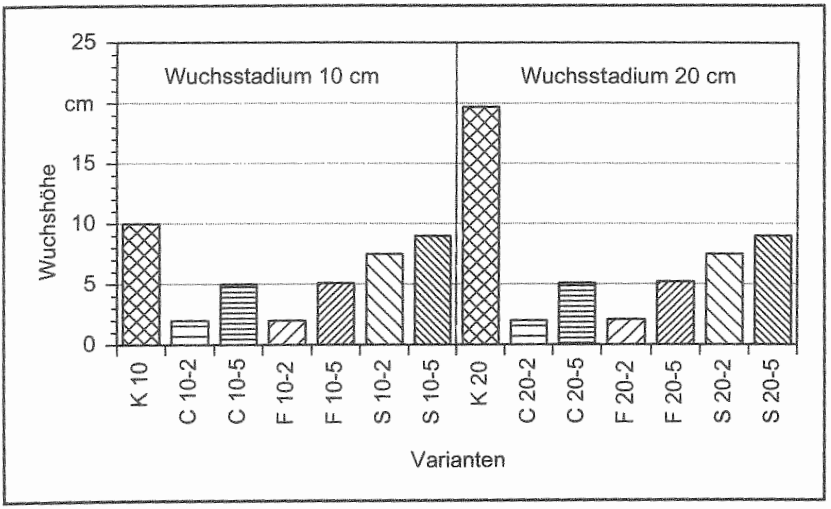


Abb. 21: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L.,
0 Tage nach der Behandlung

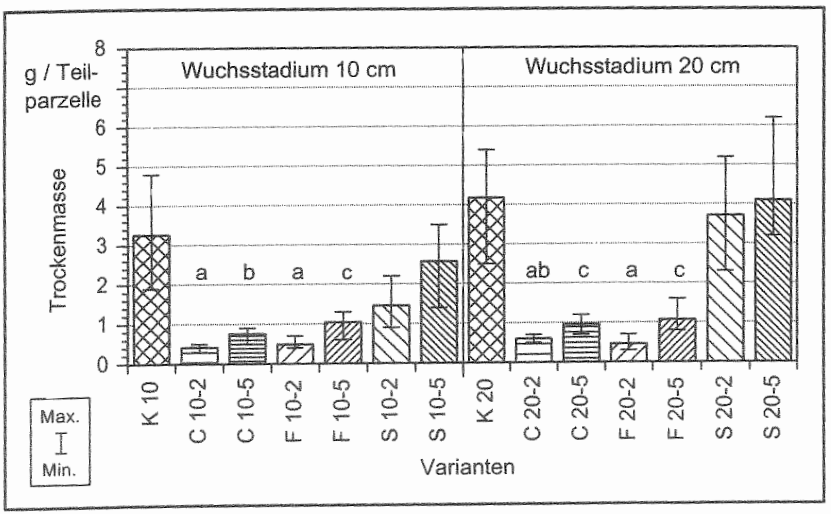


Abb. 22: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L.,
0 Tage nach der Behandlung

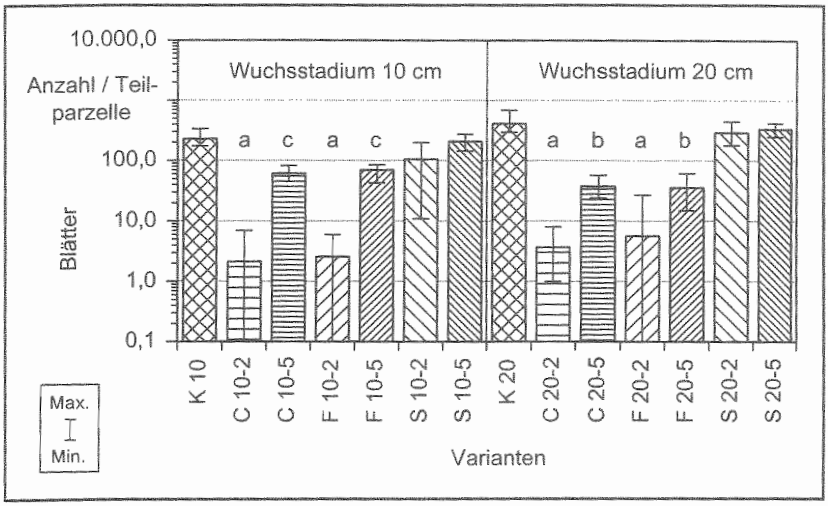


Abb. 23: Anzahl der Blätter von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung

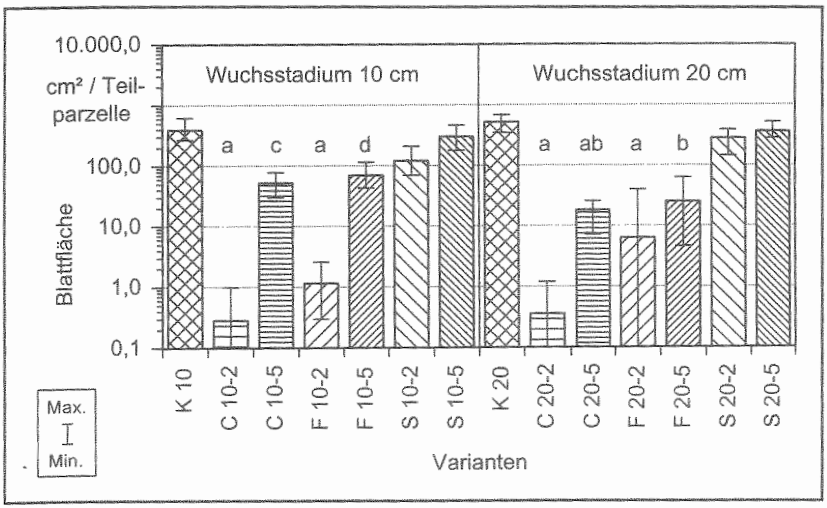


Abb. 24: Blattfläche von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung

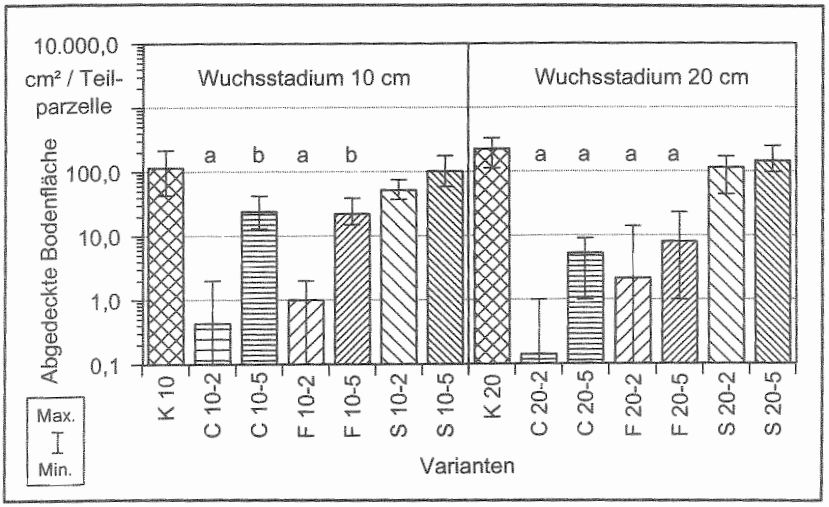


Abb. 25: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung

Tab. 7: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Chenopodium album* L., 0 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmale	Varianten							
	C 10-2	C 10-5	F 10-2	F 10-5	C 20-2	C 20-5	F 20-2	F 20-5
Trocken-masse	1,0	2,0	1,0	3,0	1,5	3,0	1,0	3,0
Blattanzahl	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Blattfläche	1,0	3,0	1,0	4,0	1,0	1,5	1,0	2,0
Abgedeckte Bodenfläche	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
arithmetischer Mittelwert	**1,0**	2,5	**1,0**	3,0	1,1	1,9	**1,0**	2,0

10 Tage nach der Behandlung

Nach 10 Tagen hatte die Kontrolle sowohl im Wuchsstadium 10 cm als auch 20 cm fast die doppelte Wuchshöhe wie zum Zeitpunkt der Behandlung erreicht (Abbildung 26). Die Wuchshöhe der geschädigten Pflanzen von *Chenopodium album* L. nahm nur unwesentlich außer bei den Varianten des Entlaubens zu. Auch bei den Varianten C 20-5 und F 20-5 war ein Längenzuwachs deutlich sichtbar. Hinsichtlich der aufgewachsenen Trockenmasse schnitt die Variante F 20-2 deutlich am besten ab (Abbildung 27). Jedoch konnte kein signifikanter Unterschied zu den Varianten C 10-2 und F 10-2 ermittelt werden. Bei den Prüfmerkmalen Blattanzahl, Blattfläche und abgedeckte Bodenfläche erzielten alle Varianten C und F mit 2 cm Abtrennhöhe niedrigere Werte als mit 5 cm Abtrennhöhe (Abbildung 28, Abbildung 29, Abbildung 30). Die einzelnen Varianten mit 2 cm Abtrennhöhe unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Der Tabelle 8 ist zu entnehmen, daß die Variante F 20-2 bei der Halbzeit der Beobachtung des Wiederaufwuchses den ersten Rang einnimmt. Knapp dahinter folgen die Varianten C 10-2, F 10-2 und C 20-2.

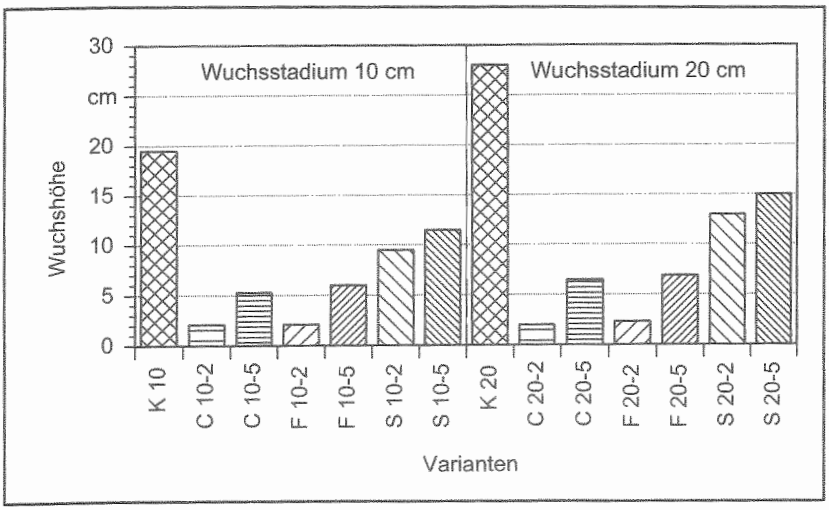


Abb. 26: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung

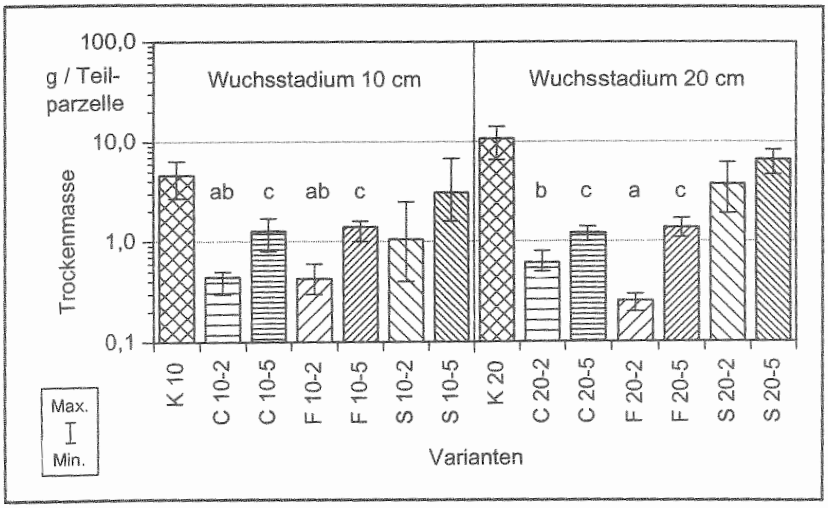


Abb. 27: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung

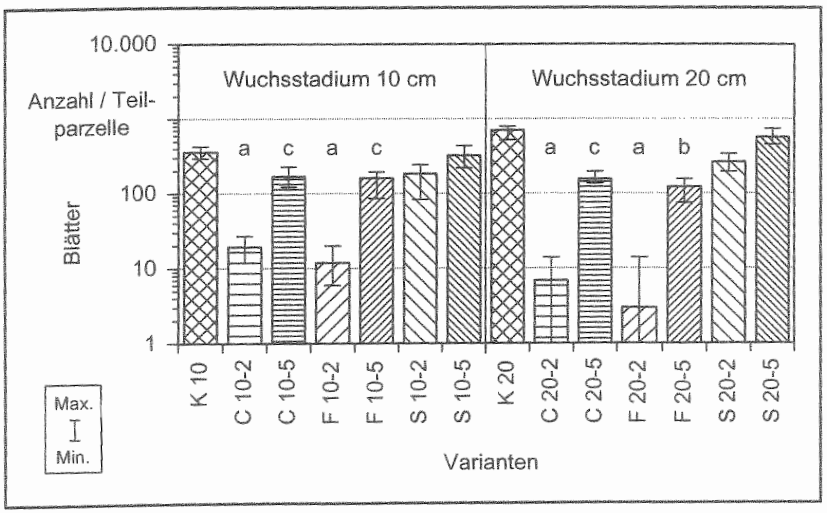


Abb. 28: Anzahl der Blätter von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung

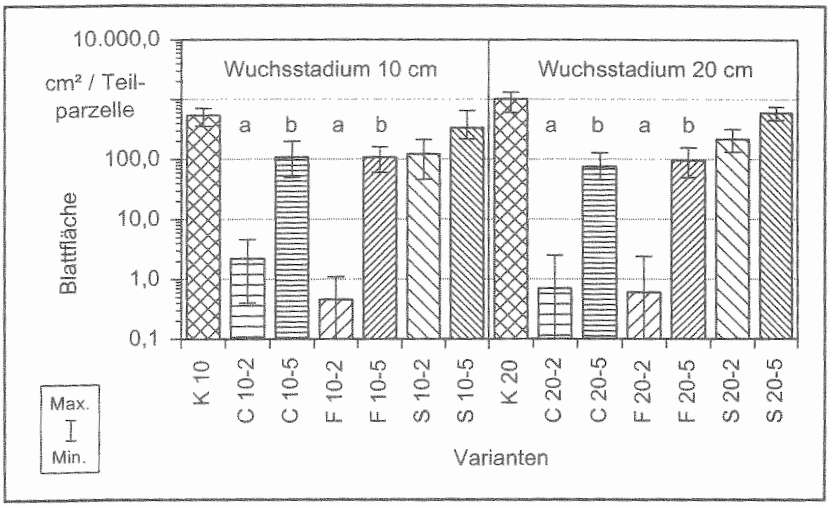


Abb. 29: Blattfläche von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung

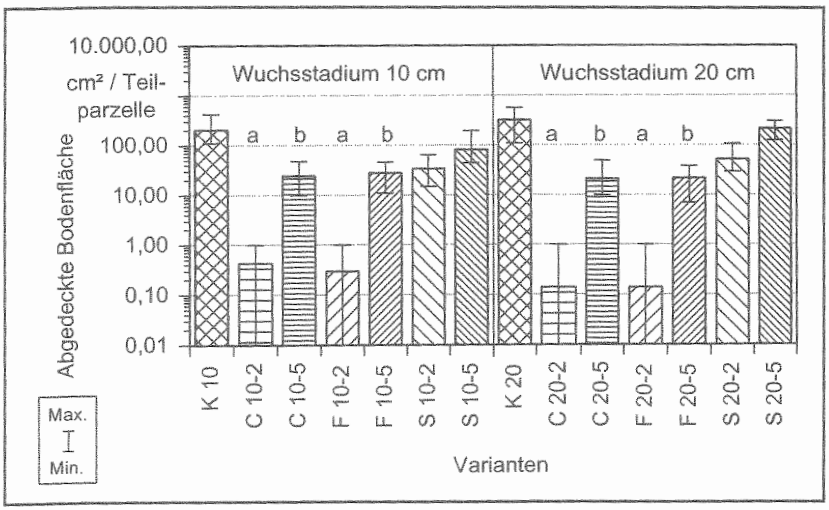


Abb. 30: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung

Tab. 8: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Chenopodium album* L., 10 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmale	Varianten							
	C 10-2	C 10-5	F 10-2	F 10-5	C 20-2	C 20-5	F 20-2	F 20-5
Trocken-masse	1,5	3,0	1,5	3,0	2,0	3,0	1,0	3,0
Blattanzahl	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	2,0
Blattfläche	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Abgedeckte Bodenfläche	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0
arithmetischer Mittelwert	1,1	2,5	1,1	2,5	1,3	2,5	**1,0**	2,3

20 Tage nach der Behandlung

Beim letzten Boniturtermin verzeichneten die Kontrollparzellen einen weiteren Längenzuwachs. Die Wuchshöhe erhöhte sich bei den Varianten mit 2 cm Abtrennhöhe nur geringfügig, während hingegen die Varianten mit 5 cm Abtrennhöhe wieder eine Wuchshöhe von über 10 cm erreichten (Abbildung 31, Abbildung A4). Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen der aufgewachsenen Trockenmasse (Abbildung 32). Die Varianten C und F mit 2 cm Abtrennhöhe, die sich alle nicht signifikant voneinander unterscheiden, erzielten 20 Tage nach der Behandlung die geringsten Werte. Die aufgewachsene Trockenmasse der Varianten S wies die gleiche Höhe wie die der Kontrollparzellen auf. Die gleiche Beobachtung wurde auch bei den Parametern Anzahl der Blätter, Blattfläche und abgedeckte Bodenoberfläche gemacht (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35). Dieses Ergebnis ist auch in der Signifikanztabelle (Tabelle 9) ersichtlich. Demnach konnte in den Prüfstandsversuchen bei *Chenopodium album* L. eine nachhaltige Unkrautregulierung nur durch die Abtrennhöhe von 2 cm über dem Boden erreicht werden. Hinsichtlich der beiden Wuchsstadien konnten dabei keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Ein signifikanter Unterschied zwischen Abschneiden und Abschlegeln wurde in diesen Versuchen nicht festgestellt.

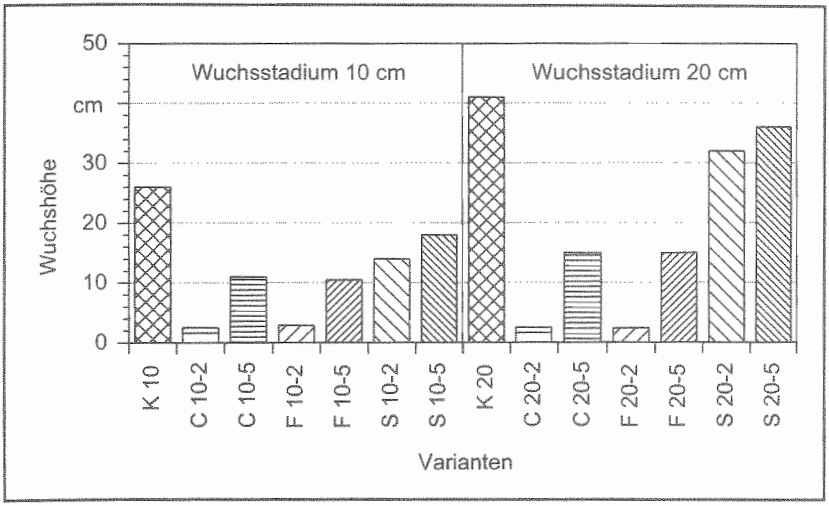


Abb. 31: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung

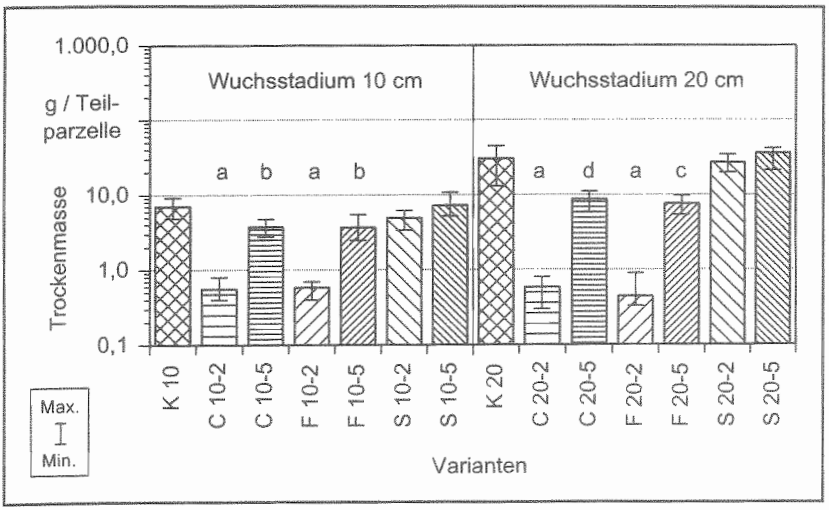


Abb. 32: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung

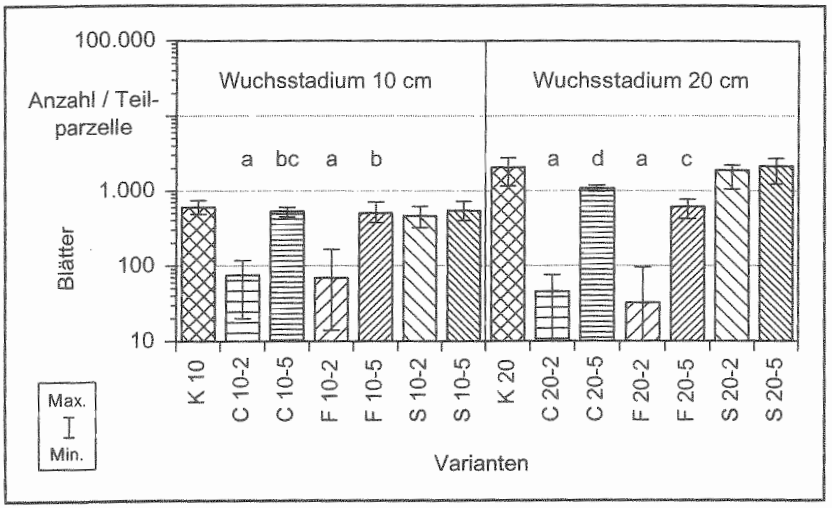


Abb. 33: Anzahl der Blätter von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung

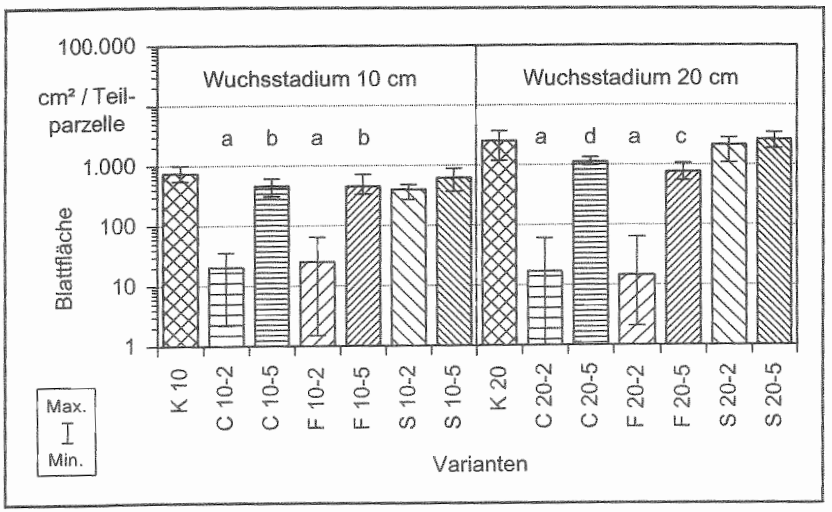


Abb. 34: Blattfläche von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung

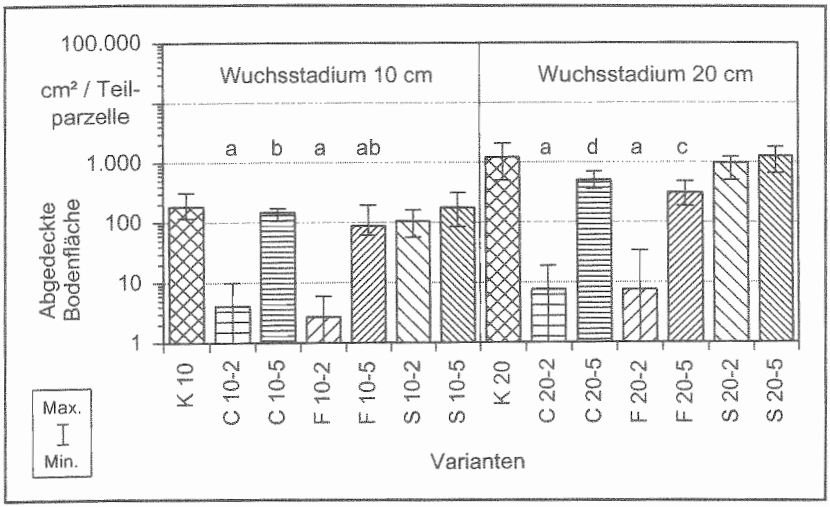


Abb. 35: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung

Tab. 9: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Chenopodium album* L., 20 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmale	Varianten							
	C 10-2	C 10-5	F 10-2	F 10-5	C 20-2	C 20-5	F 20-2	F 20-5
Trocken-masse	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	4,0	1,0	3,0
Blattanzahl	1,0	2,0	1,0	2,5	1,0	4,0	1,0	3,0
Blattfläche	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	4,0	1,0	3,0
Abgedeckte Bodenfläche	1,0	2,0	1,0	1,5	1,0	4,0	1,0	3,0
arithmetischer Mittelwert	**1,0**	2,0	**1,0**	2,0	**1,0**	4,0	**1,0**	3,0

4.2.1.2 Versuch mit ECHCR

Wie im Prüfstandsversuch mit *Chenopodium album* L. ergab die Varianzanalyse der Boniturdaten der Versuche mit *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. signifikante Unterschiede zwischen den Prüfgliedern, die meistens in den Prüffaktoren Wuchsstadium und Abtrennhöhe begründet sind. Bei den 2-Weg-Wechselwirkungen wurde nur die Wechselwirkung „Wuchsstadium · Abtrennhöhe" in einzelnen Fällen beobachtet. Eine 3-Weg-Wechselwirkung trat nicht auf. Die Multiple Classifikations-Analyse der Daten zeigte die gleiche Reihenfolge der Prüffaktoren hinsichtlich der Wichtigkeit des Einflusses auf Regulierungserfolg und Wiederaufwuchs wie im Versuch mit *Chenopodium album* L. In allen Fällen hatte die Abtrennhöhe den größten Einfluß, gefolgt vom Wuchsstadium (2. Rang) und der Werkzeugart (3. Rang). Das multiple R^2, das immer von 0 Tage nach der Behandlung bis 20 Tage nach der Behandlung anstieg, erreichte für die aufgewachsene Trockenmasse Werte von 0,78 bis 0,88, für die abgedeckte Bodenoberfläche von 0,74 bis 0,82, für die Anzahl der Blätter von 0,68 bis 0,87 und für die Blattfläche von 0,78 bis 0,88. Für die zusätzlich bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. erhobene Anzahl der Triebe gelten die gleichen Aussagen, jedoch sank das zugehörige multiple R^2 von 0,83 bei 0 Tage nach der Behandlung auf 0,41 bei 20 Tage nach der Behandlung ab.

0 Tage nach der Behandlung

Bei der Schädigung von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. zeigte sich, daß die vorgewählte Abtrennhöhe bei den Varianten C und F im Gegensatz zu den Varianten S auch tatsächlich realisiert werden konnte (Abbildung 36). Durch das Entlauben konnte keine ausreichende Verminderung der Wuchshöhe insbesondere beim Wuchsstadium 10 cm erzielt werden. Die Wuchshöhe der Varianten des Abschlegelns wiesen tendenziell geringfügig höhere Werte bei den Wuchshöhen auf, da durch den Schlegeleinsatz der Trieb von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. deutlich mehr aufgespleist war und somit die Wunde stark ausgefranst war (Abbildung A5). In Abbildung 37 bei der Darstellung der Trockenmasse der einzelnen Varianten ist zu beobachten, daß im jeweiligen Wuchsstadium bei den Varianten C und F bei 2 cm Abtrennhöhe die niedrigsten Werte gemessen wurden.

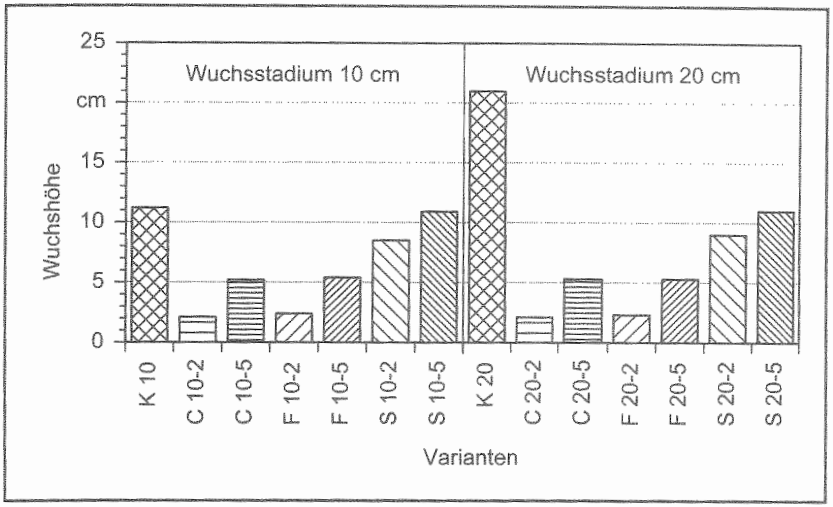


Abb. 36: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

Das Wuchsstadium mit 10 cm Wuchshöhe erreichte signifikant geringere Werte. Die Anzahl der Blätter wurde jedoch bei den Varianten C und F bei 2 cm Abtrennhöhe im Wuchsstadium 20 cm signifikant besser reduziert (Abbildung 38). Die Varianten mit 5 cm Abtrennhöhe liegen bei der Anzahl der Blätter auf ungefähr gleichem Niveau. Bei der Verminderung der Blattfläche hingegen konnten, wenn die Varianten C und F mit 2 cm Abtrennhöhe betrachtet werden, keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Wuchsstadien 10 cm und 20 cm Wuchshöhe festgestellt werden (Abbildung 39). Ein ähnliches Ergebnis wie bei dem Parameter Blattfläche wurde bei der abgedeckten Bodenoberfläche erzielt (Abbildung 40). Das Ergebnis des zusätzlich erhobenen Parameters „Anzahl der Triebe" ist in Abbildung 41 dargestellt. Dabei ist im Vergleich zur Kontrolle keine bzw. keine nennenswerte Reduzierung der Triebanzahl bei allen untersuchten Varianten außer der Variante C 20-2 festgestellt worden. Die zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse in der Signifikanztabelle verdeutlicht, daß die Varianten C und F bei 2 cm Abtrennhöhe im Wuchsstadium 10 cm den höchsten Regulierungserfolg erreichten (Tabelle 10). Dabei wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Werkzeugarten Abschneiden und Abschlegeln ermittelt.

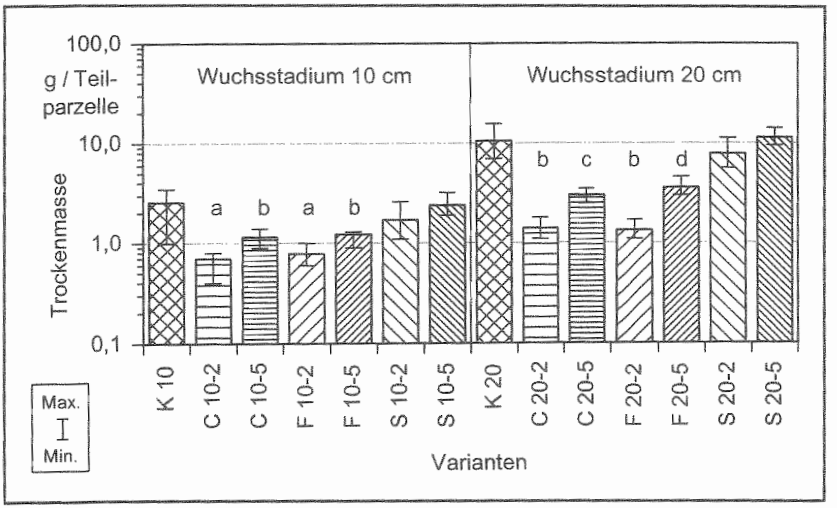


Abb. 37: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

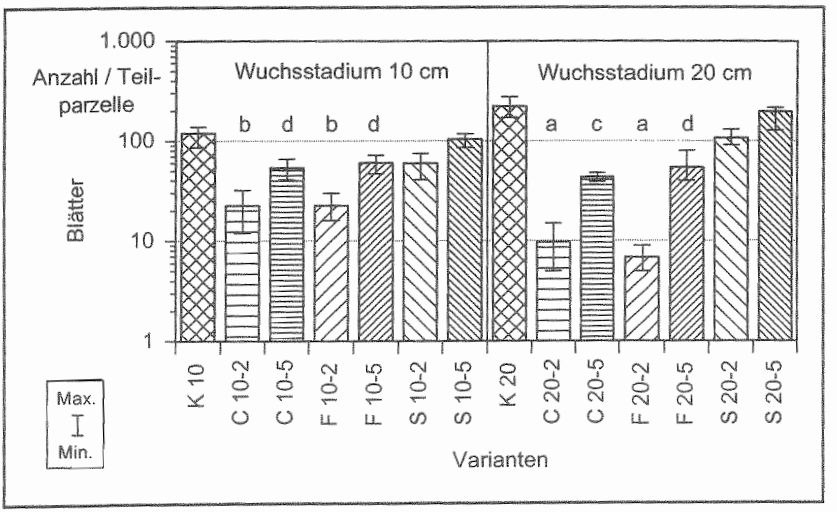


Abb. 38: Anzahl der Blätter von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

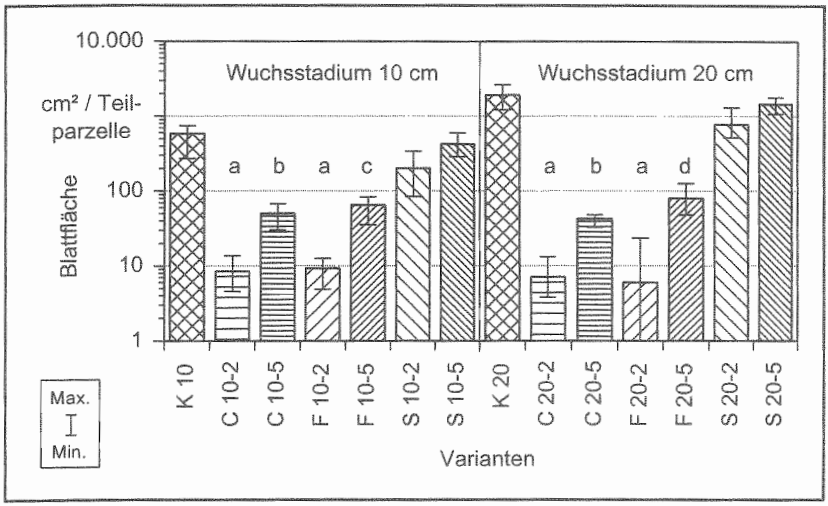


Abb. 39: Blattfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

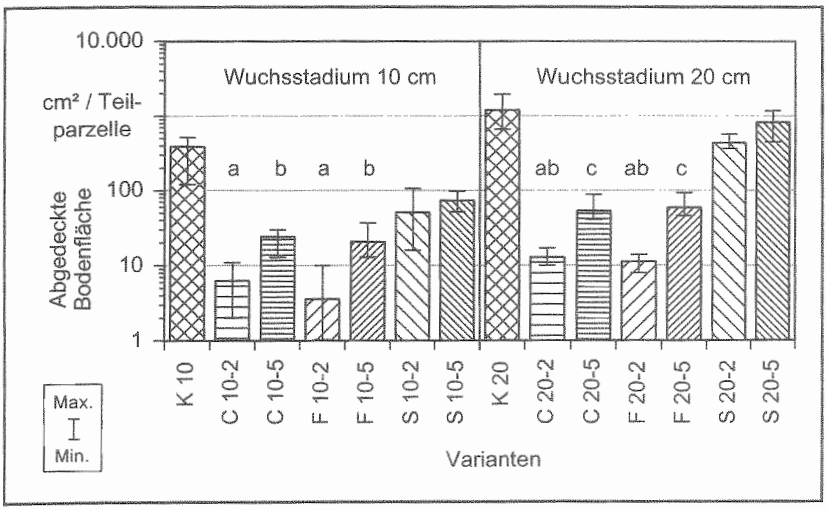


Abb. 40: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

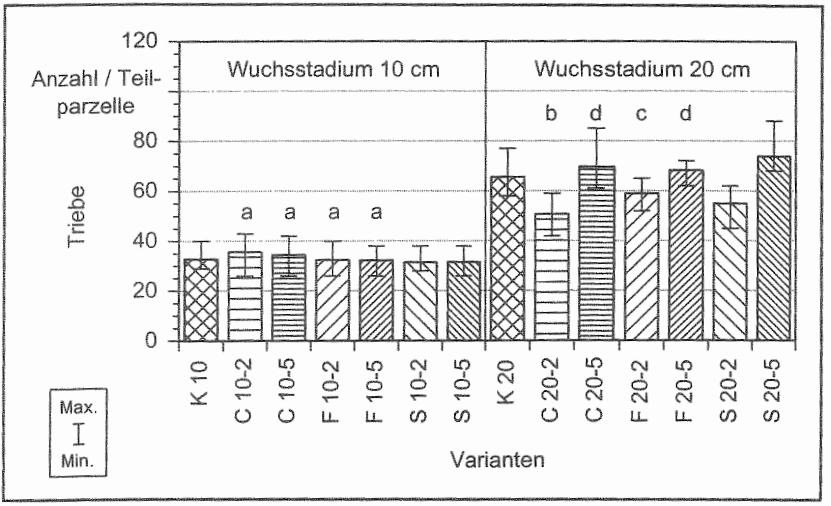


Abb. 41: Anzahl der Triebe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

Tab. 10: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmale	Varianten							
	C 10-2	C 10-5	F 10-2	F 10-5	C 20-2	C 20-5	F 20-2	F 20-5
Trocken-masse	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0	3,0	2,0	4,0
Blattanzahl	2,0	4,0	2,0	4,0	1,0	3,0	1,0	4,0
Blattfläche	1,0	2,0	1,0	3,0	1,0	2,0	1,0	4,0
Abgedeckte Bodenfläche	1,0	2,0	1,0	2,0	1,5	3,0	1,5	3,0
Triebanzahl	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	4,0	3,0	4,0
arithmetischer Mittelwert	**1,2**	2,2	**1,2**	2,4	1,5	3,0	1,7	3,8

10 Tage nach der Behandlung

Bei der Zwischenbonitur nach 10 Tagen verzeichneten die Kontrollparzellen - vor allem das Wuchsstadium 10 cm - einen sehr großen Längenzuwachs (Abbildung 42). Im Vergleich zu *Chenopodium album* L. wuchsen auch die besten Varianten C und F bei 2 cm Abtrennhöhe stärker zu, da die im Inneren des geschädigten Halms bereits angelegten weiteren Internodien durch den Turgor noch teleskopartig nach oben geschoben wurden. Hinsichtlich der aufgewachsenen Trockenmasse erreichten die Varianten C und F mit 2 cm Abtrennhöhe die niedrigsten Werte (Abbildung 43). Bei diesen Varianten traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Wuchsstadien und den Werkzeugarten auf. Bei der Blattanzahl und der Blattfläche hingegen waren die Varianten C 20-2 und F 20-2 signifikant besser (Abbildung 44, Abbildung 45). Für den Parameter abgedeckte Bodenfläche (Abbildung 46) ergab sich das gleiche Bild wie bei der Trockenmasse. Eine deutlich reduzierte Triebanzahl konnte besonders bei der Variante F 20-2 beobachtet werden (Abbildung 47). Dadurch erzielte die Variante F 20-2 auch den 1. Rang (Tabelle 11).

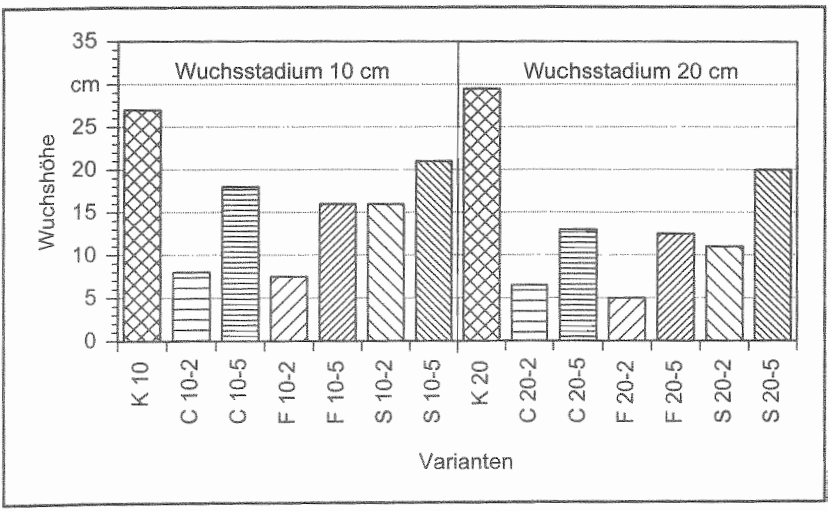


Abb. 42: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

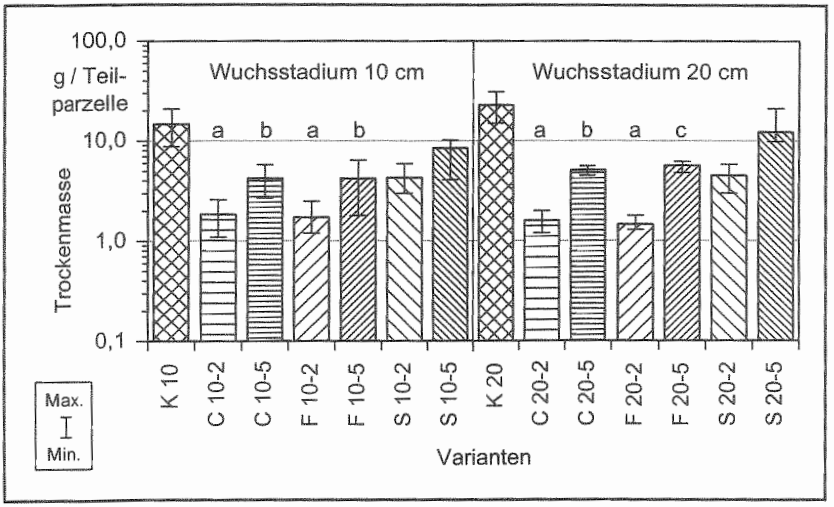


Abb. 43: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

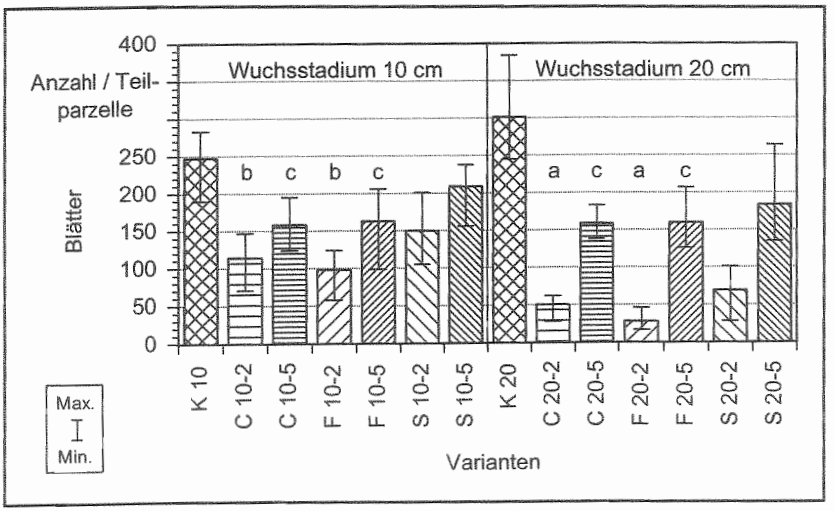


Abb. 44: Anzahl der Blätter von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

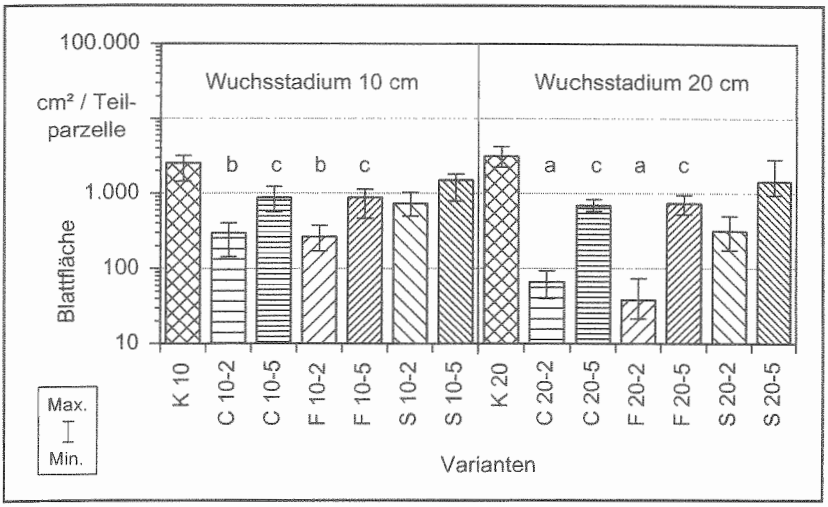


Abb. 45: Blattfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

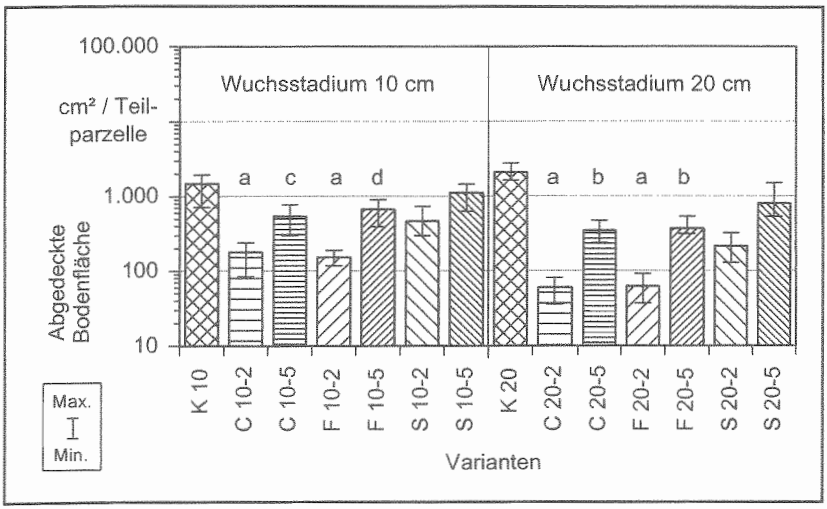


Abb. 46: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

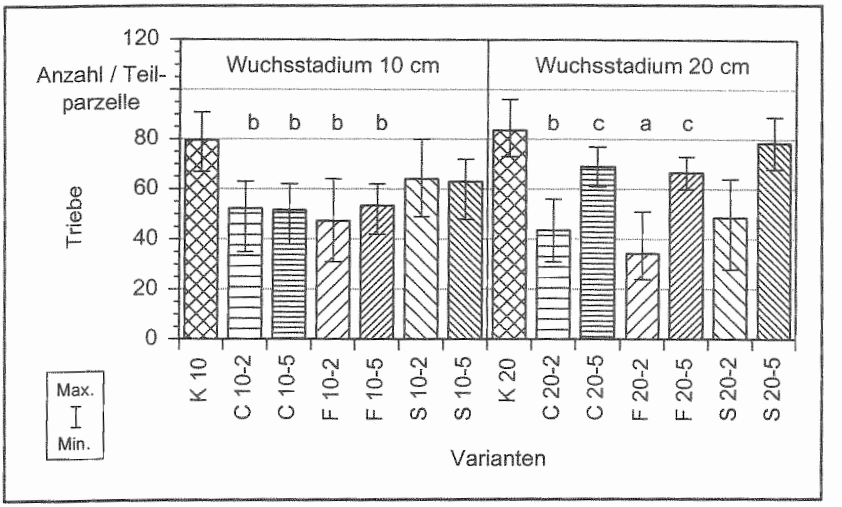


Abb. 47: Anzahl der Triebe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

Tab. 11: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmale	Varianten							
	C 10-2	C 10-5	F 10-2	F 10-5	C 20-2	C 20-5	F 20-2	F 20-5
Trocken-masse	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	3,0
Blattanzahl	2,0	3,0	2,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0
Blattfläche	2,0	3,0	2,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0
Abgedeckte Bodenfläche	1,0	3,0	1,0	4,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Triebanzahl	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0	3,0
arithmetischer Mittelwert	1,6	2,6	1,6	2,8	1,2	2,6	**1,0**	2,8

20 Tage nach der Behandlung

Am Ende des Beobachtungszeitraumes für den Wiederaufwuchs wiesen die Varianten C 20-2 und F 20-2 die niedrigste Wuchshöhe auf (Abbildung 48, Abbildung A6). Auch bei der aufgewachsenen Trockenmasse erzielen diese beiden Varianten signifikant das beste Ergebnis (Abbildung 49). Noch deutlicher fiel das Ergebnis für diese beiden Varianten bei den Prüfmerkmalen Anzahl der Blätter, Blattfläche, abgedeckte Bodenfläche und bei der Anzahl Triebe aus (Abbildung 50, Abbildung 51, Abbildung 52, Abbildung 53). Die Varianten C und F mit 5 cm Abtrennhöhe erreichten keine nachhaltige unkrautregulierende Wirkung. Dies wird besonders bei der Betrachtung des Parameters Trockenmasse deutlich (Abbildung 49). In Tabelle 12 ist ersichtlich, daß die Varianten C und F bei 2 cm Abtrennhöhe am erfolgreichsten waren. Das Wuchsstadium 20 cm führte zu einem geringeren Wiederaufwuchs, da auch die Anzahl der Triebe deutlich reduziert werden konnte. Dagegen wurde bei der Behandlung im Wuchsstadium 10 cm durch den Schnitt bzw. das Abschlegeln die Bestockung gefördert. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Werkzeugarten C und F wurden nicht gefunden.

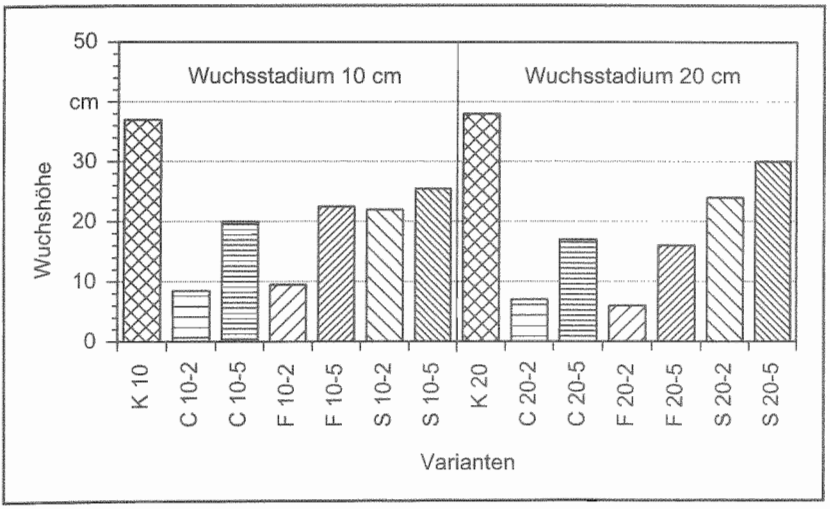


Abb. 48: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

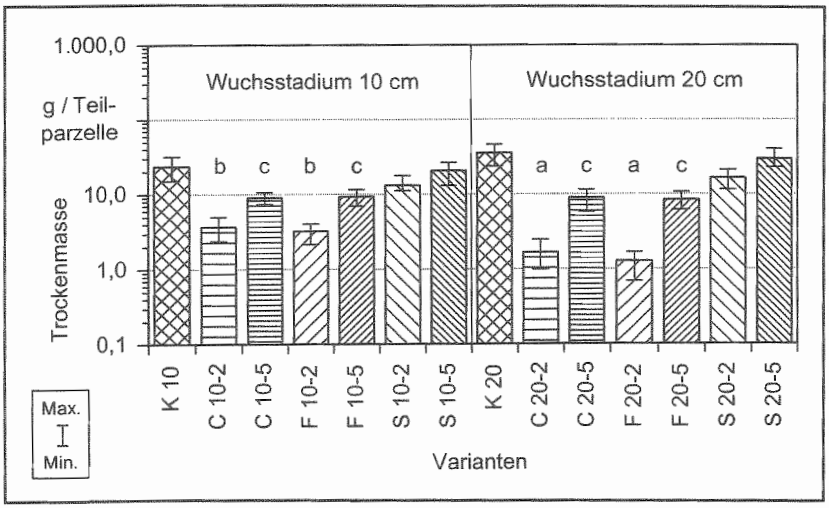


Abb. 49: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

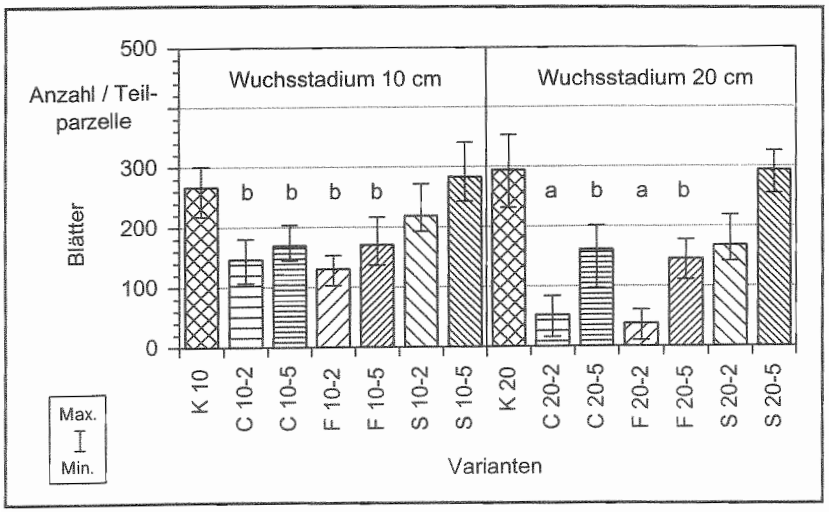


Abb. 50: Anzahl der Blätter von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

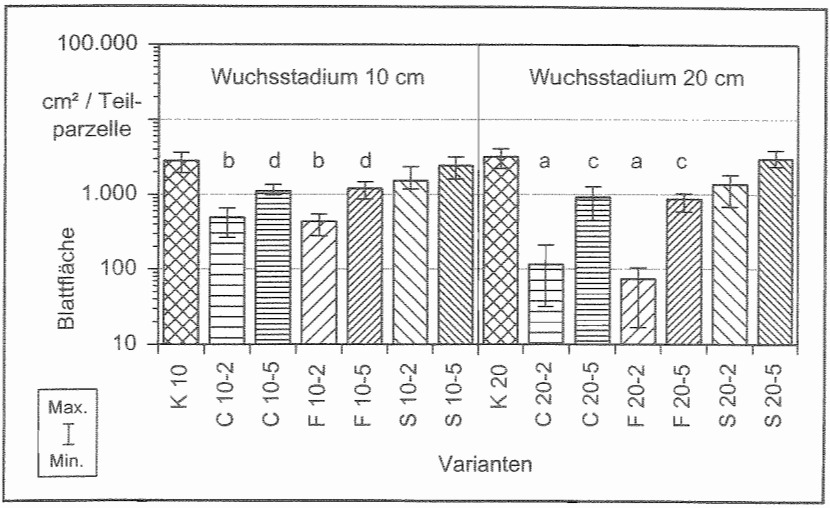


Abb. 51: Blattfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

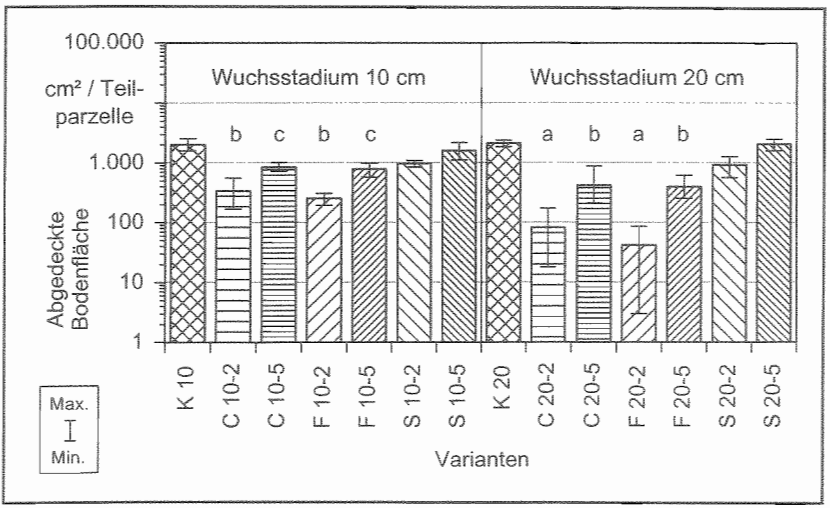


Abb. 52: Abgedeckte Bodenoberfläche von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

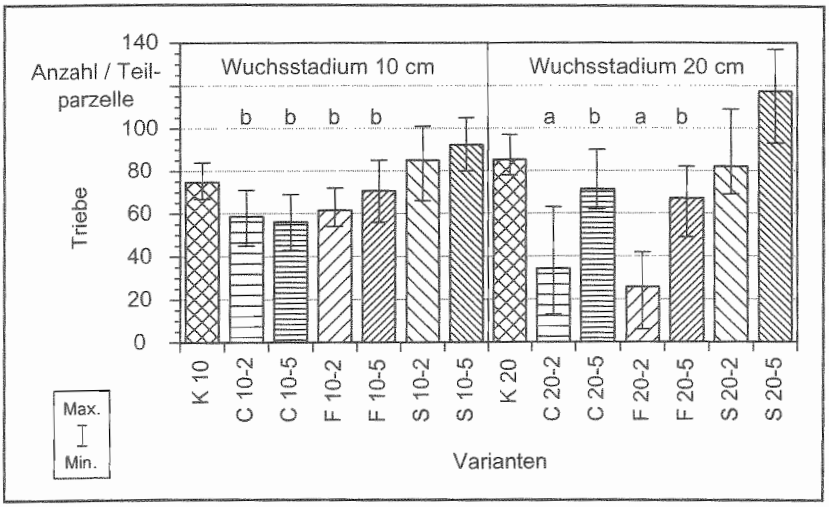


Abb. 53: Anzahl der Triebe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

Tab. 12: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmale	Varianten							
	C 10-2	C 10-5	F 10-2	F 10-5	C 20-2	C 20-5	F 20-2	F 20-5
Trocken-masse	2,0	3,0	2,0	3,0	1,0	3,0	1,0	3,0
Blattanzahl	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Blattfläche	2,0	4,0	2,0	4,0	1,0	3,0	1,0	3,0
Abgedeckte Bodenfläche	2,0	3,0	2,0	3,0	1,0	2,0	1,0	2,0
Triebanzahl	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0
arithmetischer Mittelwert	2,0	2,8	2,0	2,8	**1,0**	2,4	**1,0**	2,4

4.2.2 Versuche zur Handentlaubung von CHEAL und ECHCR

Das technische Entlauben mit dem Entlaubungsrotor (Abbildung 17, Kapitel 4.1.4.1) führte, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, für eine nachhaltige Regulierung zu keiner ausreichenden Schädigung der Unkräuter, da die eingestellte Abtrennhöhe und die tatsächlich erreichte Abtrennhöhe erheblich differierten. Deshalb wurden zur Überprüfung des Schädigungsprinzips „Entlauben" Versuche mit manuellem Entfernen der Blätter an *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse der vorangegangenen Prüfstandsversuche beschränkten sich die Versuche auf das spätere Wuchsstadium von 20 cm und auf die als erfolgreicher ermittelte Abtrennhöhe von 2 cm. Dies bedeutet, daß Blätter unterhalb von 2 cm an den Unkrautpflanzen belassen wurden. Für einen besseren Überblick sind in den nachfolgenden Abbildungen je Prüfmerkmal die Ergebnisse über den gesamten Beobachtungszeitraum dargestellt.

4.2.2.1 Versuch mit CHEAL

In Abbildung 54 zeigt sich, daß das Entlauben von Hand das Längenwachstum von *Chenopodium album* L. deutlich vermindert hat. Dies war auch begründet darin, daß die kleinen Blätter an der Stengelspitze samt Gipfelknospe entfernt wurden. Erst nach 20 Tagen war eine geringe Längenzunahme beobachtbar. Bei der aufgewachsenen Trockenmasse in Abbildung 55 wurden für die Variante mS im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle immer signifikante Unterschiede festgestellt. Das Niveau der aufgewachsenen Trockenmasse war so niedrig, daß durch das Arbeitsprinzip „Entlauben" der Wiederaufwuchs nachhaltig reduziert wurde.

4.2.2.2 Versuch mit ECHCR

Das Entlauben erzielte bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. ähnliche Ergebnisse wie bei *Chenopodium album* L. (Abbildung 56, Abbildung 57, Abbildung A7). Der Regulierungserfolg war jedoch nicht so nachhaltig, da der Anstieg der Wuchshöhe und der Trockenmasse nach 20 Tagen erheblich größer ausfiel.

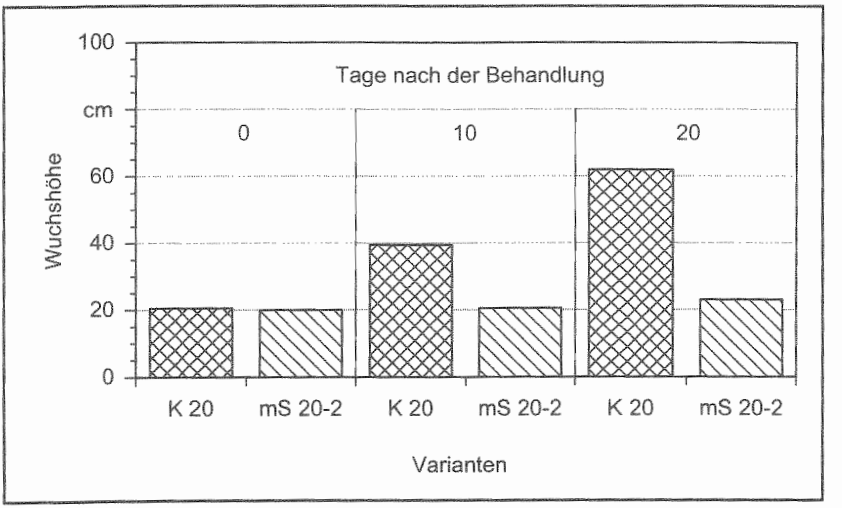


Abb. 54: Wuchshöhe von *Chenopodium album* L.,
0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung)

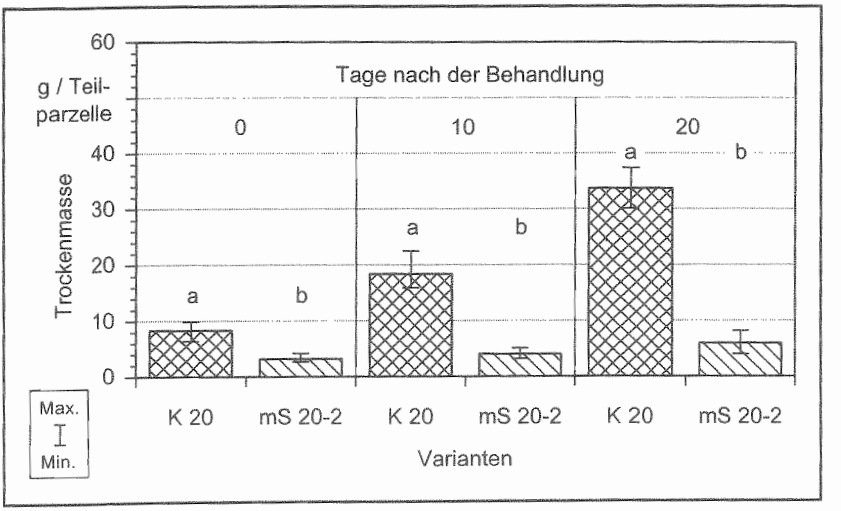


Abb. 55: Aufgewachsene Trockenmasse von *Chenopodium album* L.,
0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung)

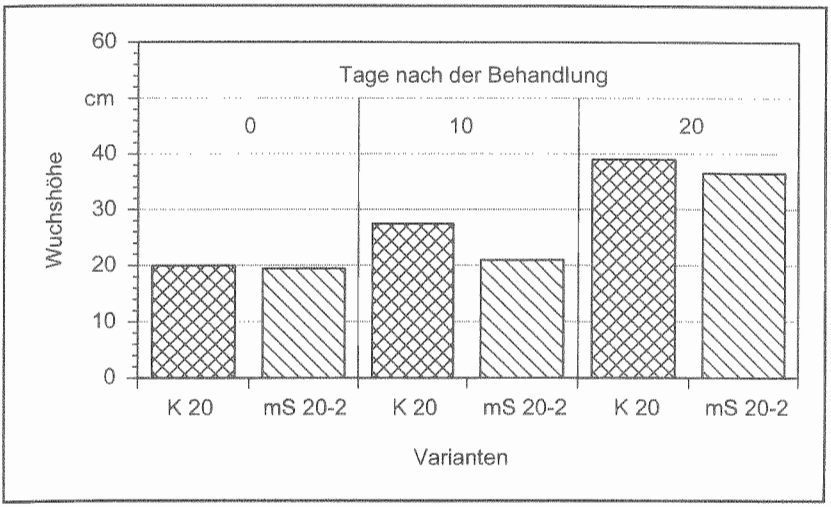


Abb. 56: Wuchshöhe von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung)

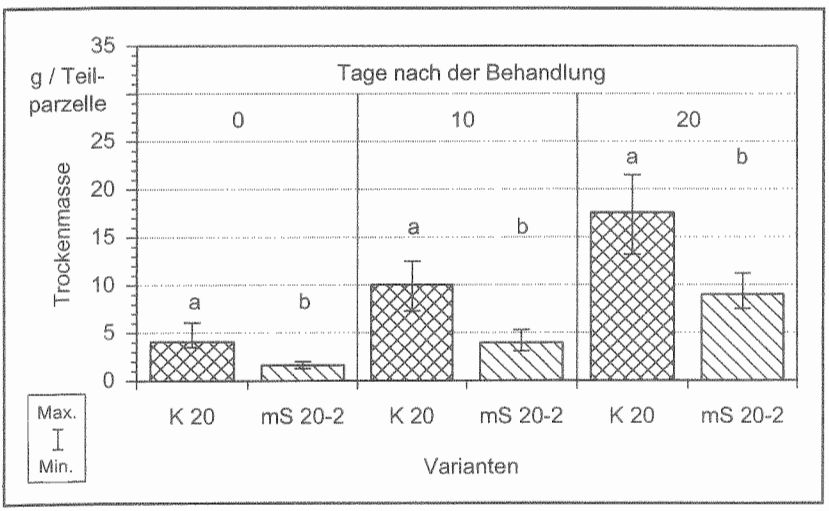


Abb. 57: Aufgewachsene Trockenmasse von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung (Handentlaubung)

4.2.3 Versuche zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE, AMARE, SOLNI und STEME

Zur Absicherung der Erkenntnisse der Prüfstandsversuche mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. wurden weitere Versuche mit den in Reihenkulturen häufig auftretenden Unkraut- und Ungrasarten *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Solanum nigrum* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. durchgeführt. Für die einzelne Unkrautart sind die Ergebnisse der Parameter Wuchshöhe und Trockenmasse 0, 10 und 20 Tage nach der Behandlung in Abbildungen dargestellt. Im Anschluß an die Graphiken sind die Einzelergebnisse in Signifikanztabellen zusammengefaßt. Die Ergebnisse der Varianzanalyse und der Multiplen Classifikations-Analyse sind im Text erläutert.

4.2.3.1 Versuch mit AGRRE

Die Varianzanalyse der Versuchsdaten von *Agropyron repens* (L.) Beauv. stellte in jedem Fall signifikante Unterschiede beruhend auf Wuchsstadium und Werkzeug fest. Signifikante 2-Weg-Wechselwirkungen traten nicht auf. Die Multiple Classifikations-Analyse zeigte bei einem multiplen R^2 von 0,75 bis 0,91, daß der Einfluß des Werkzeugs immer größer war als der des Wuchsstadiums. Im Vergleich zu den Prüfstandsversuchen mit CHEAL und ECHCR konnte bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. die vorgewählte Abtrennhöhe besonders bei den Varianten F nicht exakt eingehalten werden (Abbildung 58). Deshalb waren auch 0 Tage nach der Behandlung die Trockenmassewerte bei den Varianten F signifikant höher als bei den Varianten C (Abbildung 59). Zehn Tage später wurden analoge Beobachtungen gemacht (Abbildung 60, Abbildung 61). Bei der letzten Bonitur 20 Tage nach der Behandlung war die Wuchshöhe der Varianten C und F im Vergleich zur Kontrolle deutlich geringer (Abbildung 62). Hinsichtlich der aufgewachsenen Trockenmasse erzielten die Varianten C 20-2 und C 10-2 die signifikant besten Ergebnisse, wobei sich die Variante C 10-2 von der Variante F 20-2 nicht signifikant unterschied (Abbildung 63, Tabelle 13). Tendenziell war der Regulierungserfolg wie bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. bei der Behandlung im Wuchsstadium 20 cm erfolgreicher (Tabelle 13).

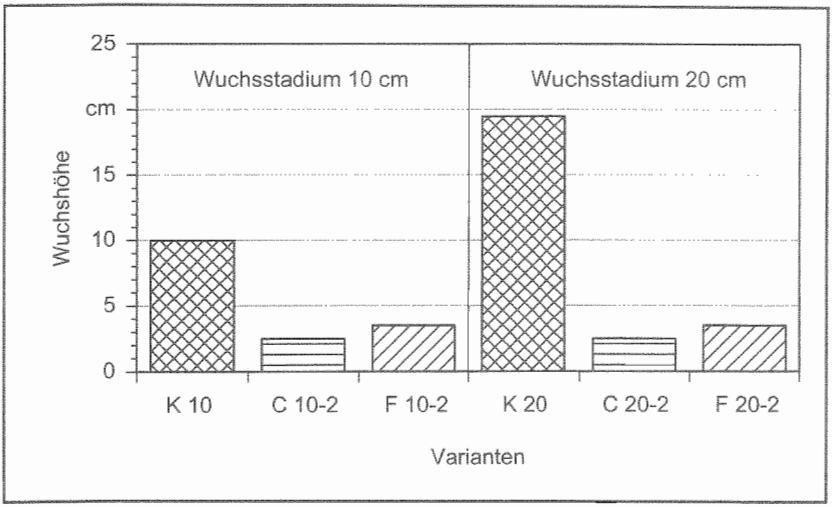


Abb. 58: Wuchshöhe von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

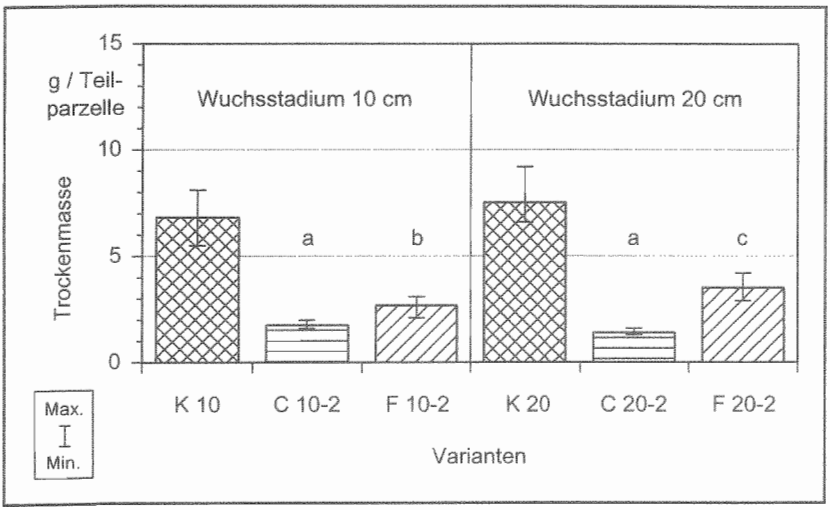


Abb. 59: Aufgewachsene Trockenmasse von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

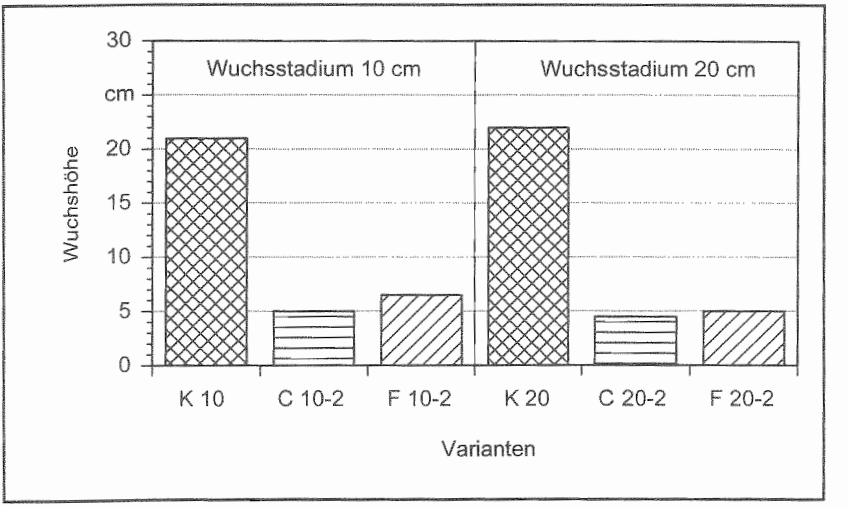


Abb. 60: Wuchshöhe von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

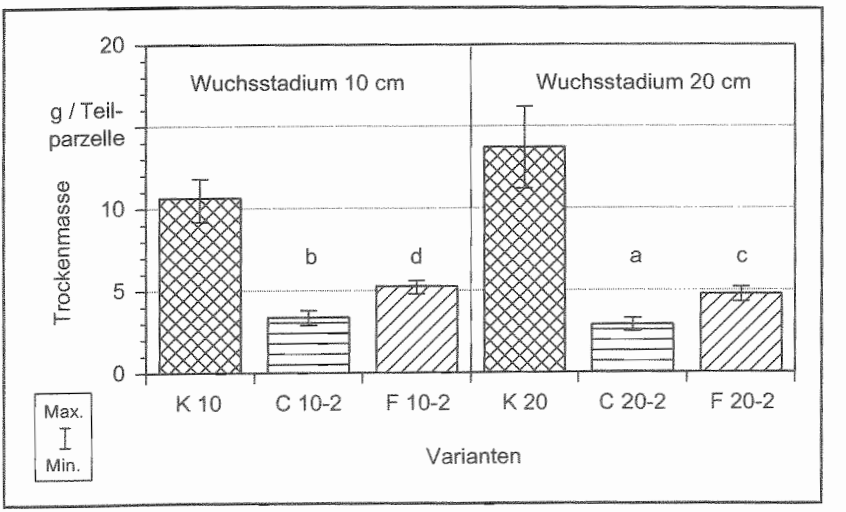


Abb. 61: Aufgewachsene Trockenmasse von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 10 Tage nach der Behandlung

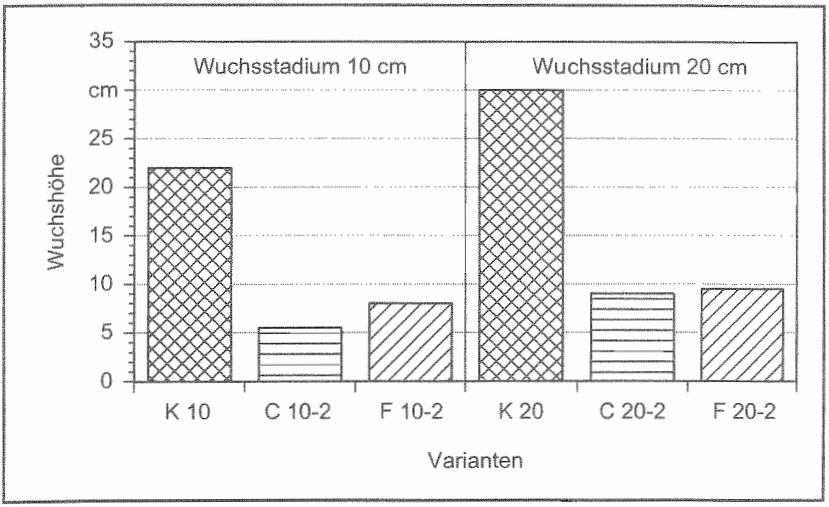


Abb. 62: Wuchshöhe von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

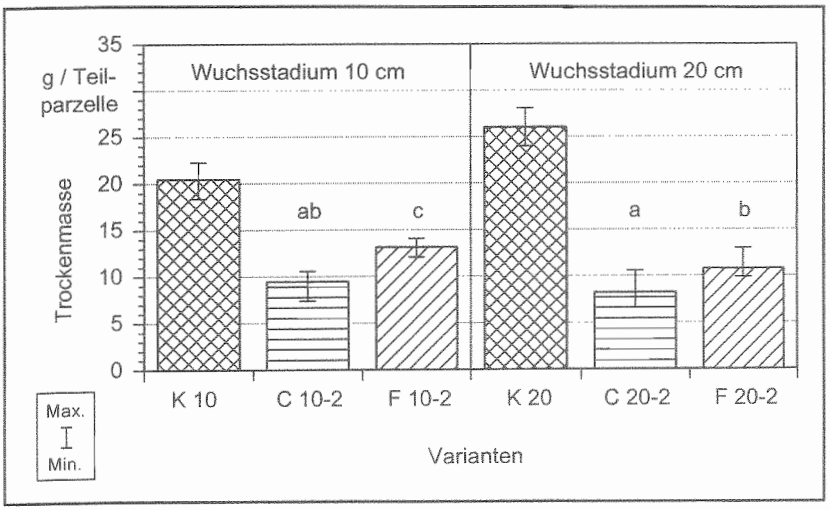


Abb. 63: Aufgewachsene Trockenmasse von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung

Tab. 13: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmal **Trockenmasse**	Varianten			
Tage nach der Behandlung	C 10-2	F 10-2	C 20-2	F 20-2
0	**1,0**	2,0	**1,0**	3,0
10	2,0	4,0	**1,0**	3,0
20	1,5	3,0	**1,0**	2,0

4.2.3.2 Versuch mit AMARE

Zwischen den Prüfgliedern wurden bei der varianzanalytischen Verrechnung der Trockenmassedaten von *Amaranthus retroflexus* L. signifikante Unterschiede beruhend auf Wuchsstadium und Werkzeug gefunden. Signifikante Wechselwirkungen zwischen den Prüffaktoren Wuchsstadium und Werkzeug wurden nicht festgestellt. Der mittels Multipler Classifikations-Analyse (multiples R^2 von 0,75 bis 0,83) errechnete Einfluß des Werkzeugs auf den Regulierungserfolg war in allen Fällen größer als der des Wuchsstadiums.

Im Gegensatz zu *Agropyron repens* (L.) Beauv. wurde bei beiden Werkzeugarten die vorgegebene Abtrennhöhe eingehalten. Bei den Varianten F wurde eine geringfügig höhere Stoppelhöhe gemessen (Abbildung 64). Dies spiegelt sich auch in den Trockenmasseergebnissen wieder (Abbildung 65). Hier erreichten die Varianten C signifikant niedrigere Werte. Bei der Zwischenbonitur nach 10 Tagen verbuchten die Kontrollparzellen einen deutlichen Längenzuwachs. Die geschädigten Parzellen wiesen nur ein geringfügiges Längenwachstum auf (Abbildung 66). Hinsichtlich der aufgewachsenen Trockenmasse lag die Variante C 10-2 an der ersten Stelle (Abbildung 67). Nach 20 Tagen wies die Variante C 10-2 gefolgt von der Variante C 20-2 die geringste Wuchshöhe auf (Abbildung 68). Diese beiden Varianten erzielten auch die signifikant niedrigsten Trockenmassewerte (Abbildung 69) und damit den nachhaltigsten Regulierungserfolg. Die Signifikanztabelle (Tabelle 14) von *Amaranthus retroflexus* L. verdeutlicht nochmals diese Ergebnisse.

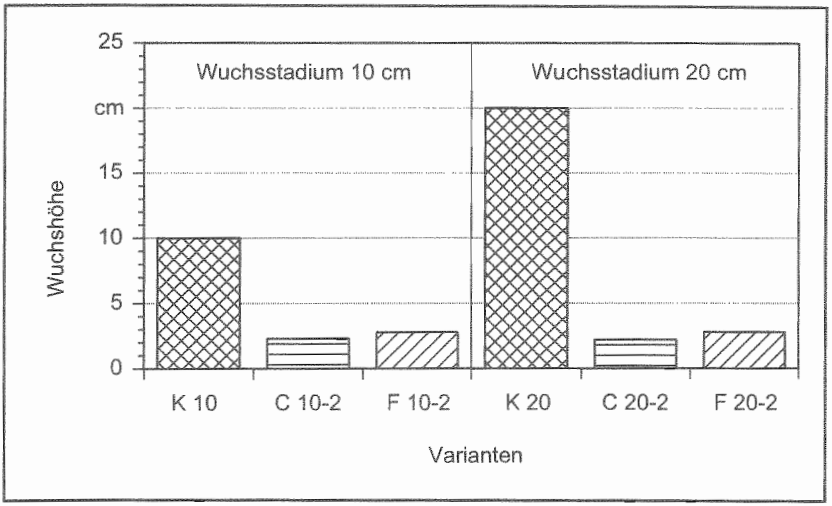


Abb. 64: Wuchshöhe von *Amaranthus retroflexus* L., 0 Tage nach der Behandlung

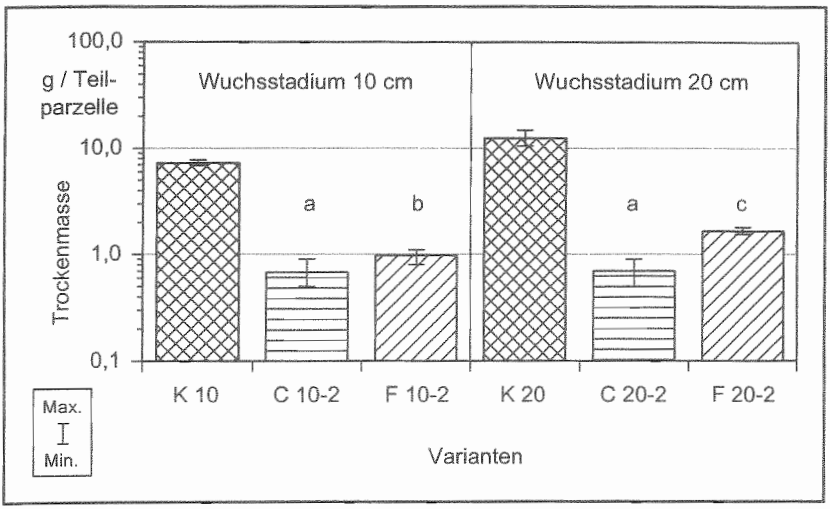


Abb. 65: Aufgewachsene Trockenmasse von *Amaranthus retroflexus* L., 0 Tage nach der Behandlung

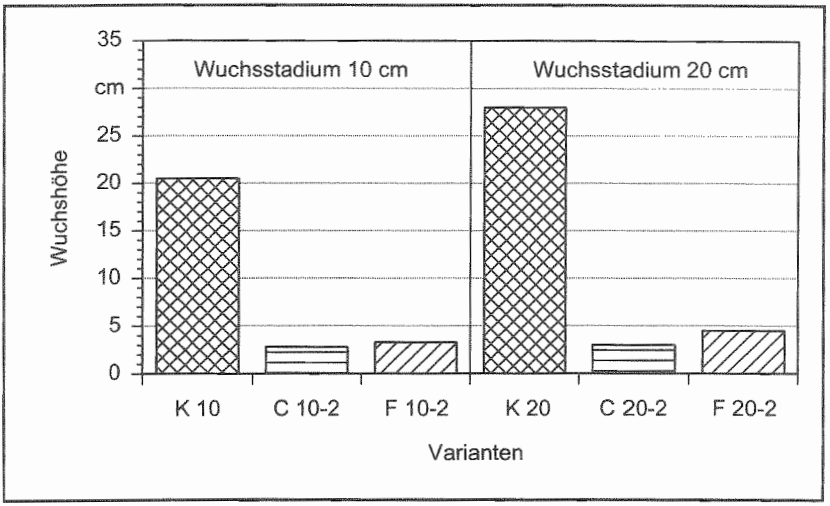


Abb. 66: Wuchshöhe von *Amaranthus retroflexus* L., 10 Tage nach der Behandlung

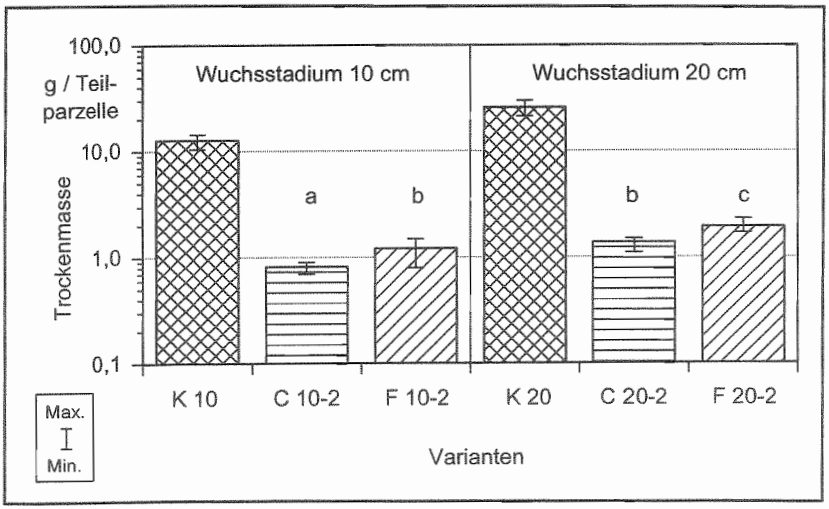


Abb. 67: Aufgewachsene Trockenmasse von *Amaranthus retroflexus* L., 10 Tage nach der Behandlung

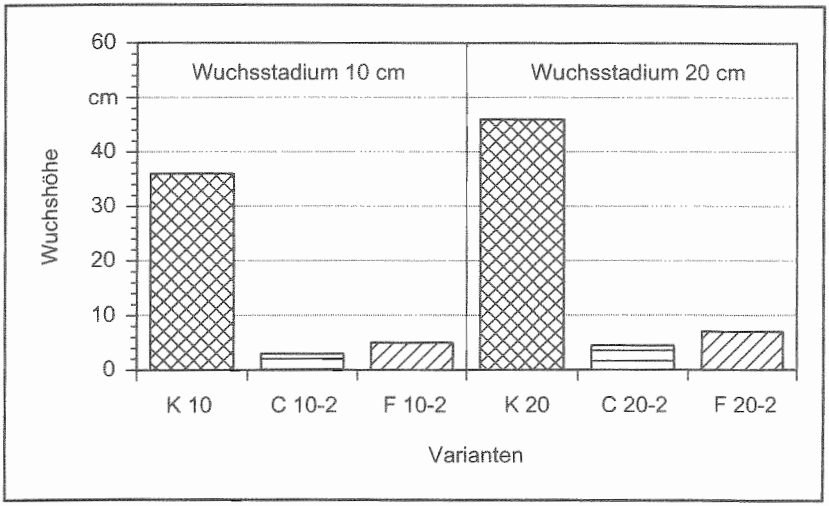


Abb. 68: Wuchshöhe von *Amaranthus retroflexus* L., 20 Tage nach der Behandlung

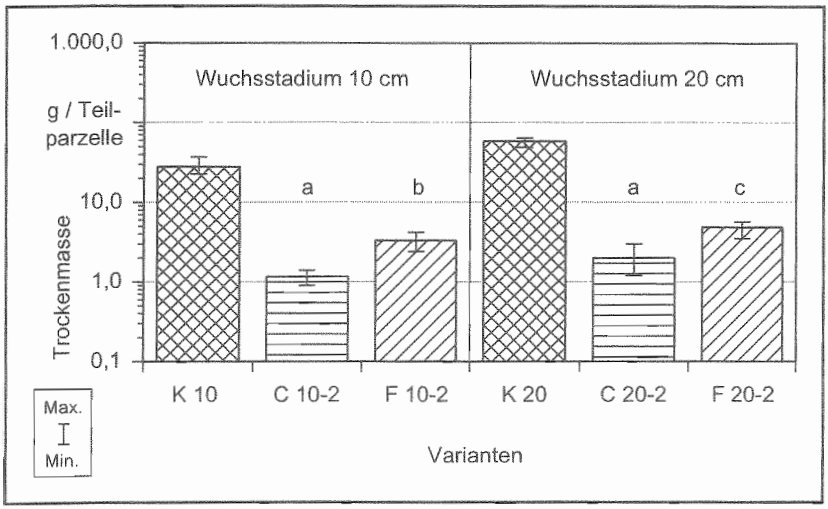


Abb. 69: Aufgewachsene Trockenmasse von *Amaranthus retroflexus* L., 20 Tage nach der Behandlung

Tab. 14: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Amaranthus retroflexus* L. , 0 bis 20 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmal **Trockenmasse**	Varianten			
Tage nach der Behandlung	C 10-2	F 10-2	C 20-2	F 20-2
0	**1,0**	2,0	**1,0**	3,0
10	**1,0**	2,0	2,0	3,0
20	**1,0**	2,0	**1,0**	3,0

4.2.3.3 Versuch mit SOLNI

Bei der Varianzanalyse der Daten der Varianten C und F von *Solanum nigrum* L. wurden signifikante Unterschiede, die auf den Prüffaktoren Wuchsstadium und Werkzeug basieren, festgestellt. Signifikante Wechselwirkungen zwischen den beiden Prüffaktoren wurden nicht gefunden. Die Multiple Classifikations-Analyse zeigte bei einem multiplen R^2 von 0,74 bis 0,92, daß der Einfluß des Werkzeugs auf den Regulierungserfolg bzw. Wiederaufwuchs bedeutender war als der des Prüffaktors Wuchsstadium. Die eingestellte Abtrennhöhe wurde bei *Solanum nigrum* L. von den Varianten C exakt realisiert. Dagegen war die tatsächliche Abtrennhöhe bei den Varianten F um etwa 5 mm höher (Abbildung 70). Daher waren die Trockenmasseergebnisse direkt nach der Behandlung für die Varianten C im jeweiligen Wuchsstadium signifikant niedriger (Abbildung 71). Die Bonitur 10 Tage nach der Behandlung ergab ein ähnliches Bild wie direkt nach der Behandlung (Abbildung 72, Abbildung 73). Die Variante C 10-2 besaß sowohl die niedrigste Wuchshöhe als auch den signifikant niedrigsten Wert für die aufgewachsene Trockenmasse. Bei der abschließenden Untersuchung des Wiederaufwuchses nach 20 Tagen wies wiederum die Variante C 10-2 die kleinsten Pflanzen auf (Abbildung 74). Beide Kontrollvarianten hatten bereits eine Wuchshöhe von ca. 50 cm erreicht. Hinsichtlich des Trockenmasseaufwuchses erzielten die Varianten C 10-2 und C 20-2 die signifikant besten Ergebnisse (Abbildung 75). Danach folgten die beiden Varianten F mit geringem Abstand. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Wuchsstadien war nicht festzustellen. Die Signifikanztabelle (Tabelle 15) gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der aufgewachsenen Trockenmasse.

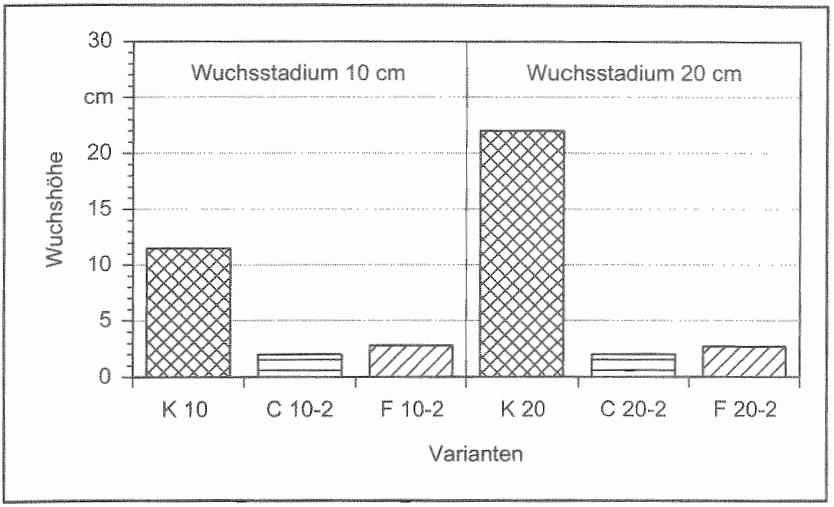


Abb. 70: Wuchshöhe von *Solanum nigrum* L.,
0 Tage nach der Behandlung

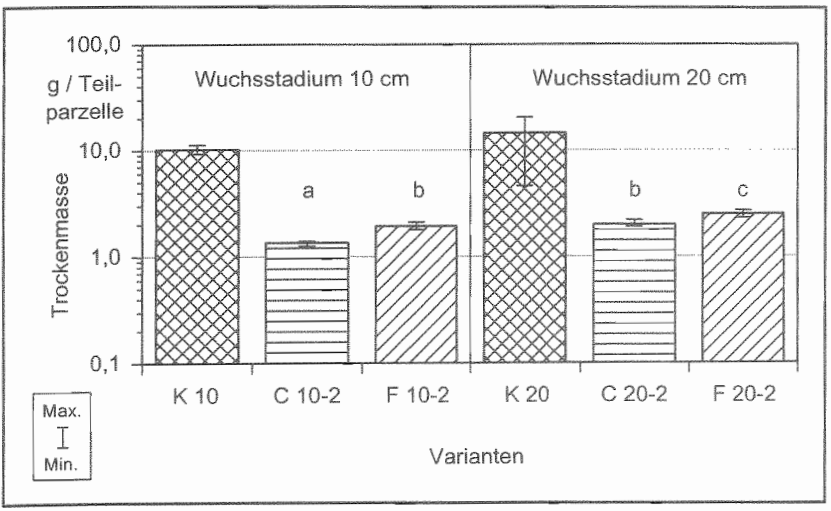


Abb. 71: Aufgewachsene Trockenmasse von *Solanum nigrum* L.,
0 Tage nach der Behandlung

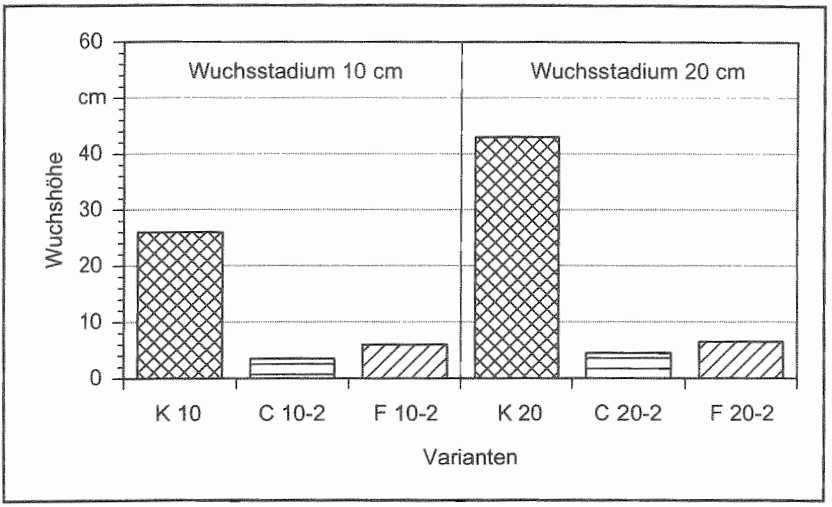


Abb. 72: Wuchshöhe von *Solanum nigrum* L.,
10 Tage nach der Behandlung

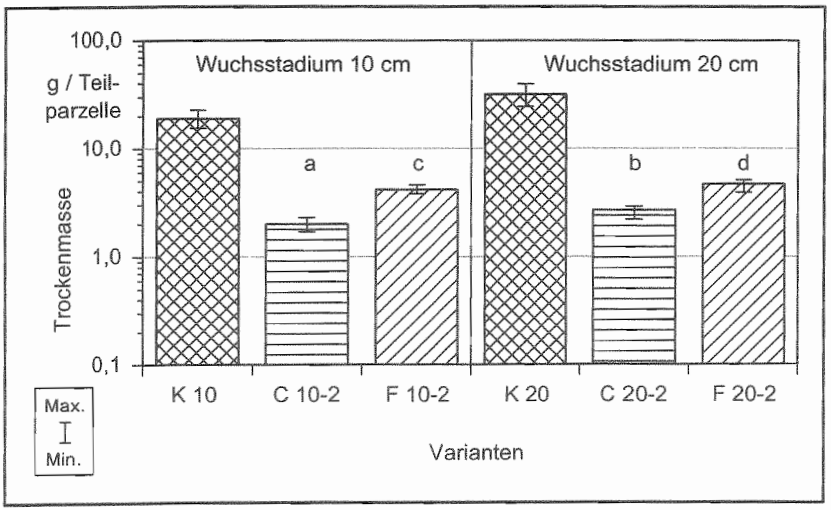


Abb. 73: Aufgewachsene Trockenmasse von *Solanum nigrum* L.,
10 Tage nach der Behandlung

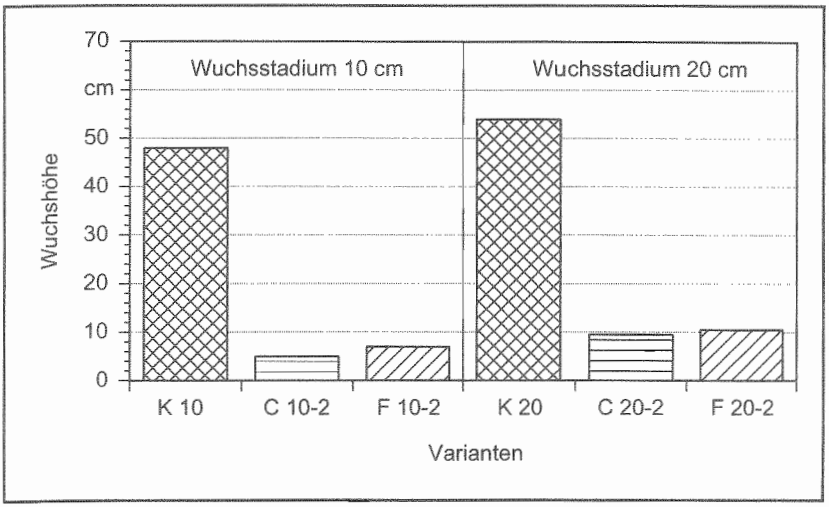


Abb. 74: Wuchshöhe von *Solanum nigrum* L., 20 Tage nach der Behandlung

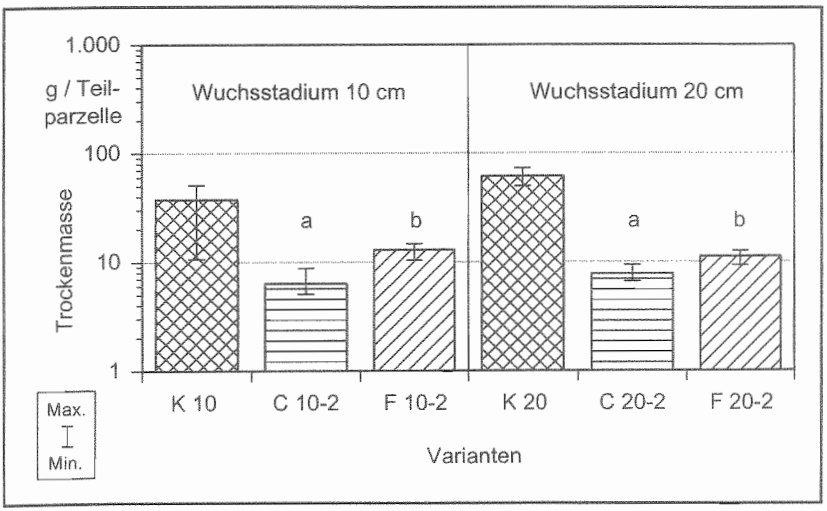


Abb. 75: Aufgewachsene Trockenmasse von *Solanum nigrum* L., 20 Tage nach der Behandlung

Tab. 15: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Solanum nigrum* L., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmal **Trockenmasse**	Varianten			
Tage nach der Behandlung	C 10-2	F 10-2	C 20-2	F 20-2
0	**1,0**	2,0	2,0	3,0
10	**1,0**	3,0	2,0	4,0
20	**1,0**	2,0	**1,0**	2,0

4.2.3.4 Versuch mit STEME

Analog zu den Versuchen mit *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L. und *Solanum nigrum* L. wurden durch die Varianzanalyse der Daten von *Stellaria media* (L.) Vill. signifikante Unterschiede, die auf den Prüffaktoren Wuchsstadium und Werkzeug beruhen, ermittelt. Signifikante Wechselwirkungen zwischen den Prüffaktoren Wuchsstadium und Werkzeug traten nicht auf. Der Einfluß des Prüffaktors Werkzeug auf den Regulierungserfolg bzw. den Wiederaufwuchs war in allen Fällen größer als der des Wuchsstadiums. Dies ergab die Multiple Classifikations-Analyse mit einem multiplen R^2 von 0,81 bis 0,93. In Abbildung 76 ist ersichtlich, daß sowohl beim Abschneiden als auch beim Abschlegeln die eingestellte Abtrennhöhe tatsächlich nicht erreicht wurde, da die einzelnen Triebe von *Stellaria media* (L.) Vill. eine sehr geringe Masse aufweisen und einen kriechenden Habitus besitzen. Dabei erzielte das Abschlegeln eine um 1,5 cm höhere Abtrennhöhe als vorgegeben. Dies spiegelt sich auch in den Trockenmasseergebnissen wieder (Abbildung 77). Nach 10 Tagen besaß die Variante C 20-2 die kürzeste Trieblänge (Abbildung 78). Hinsichtlich der Trockenmasse erreichten die Varianten C die signifikant besseren Ergebnisse (Abbildung 79). Am Ende des Beobachtungszeitraumes nach 20 Tagen wies zwar die Variante C 10-2 die kürzeste Trieblänge auf (Abbildung 80), jedoch besaß sie nur den zweitniedrigsten Trockenmassewert nach der Variante C 20-2, die signifikant besser war (Abbildung 81). In den genannten Abbildungen und in Tabelle 16 wird deutlich, daß die Varianten C im Vergleich zu den Varianten F nachhaltiger wirkten. Das Wuchsstadium beeinflußte den Regulierungserfolg kaum.

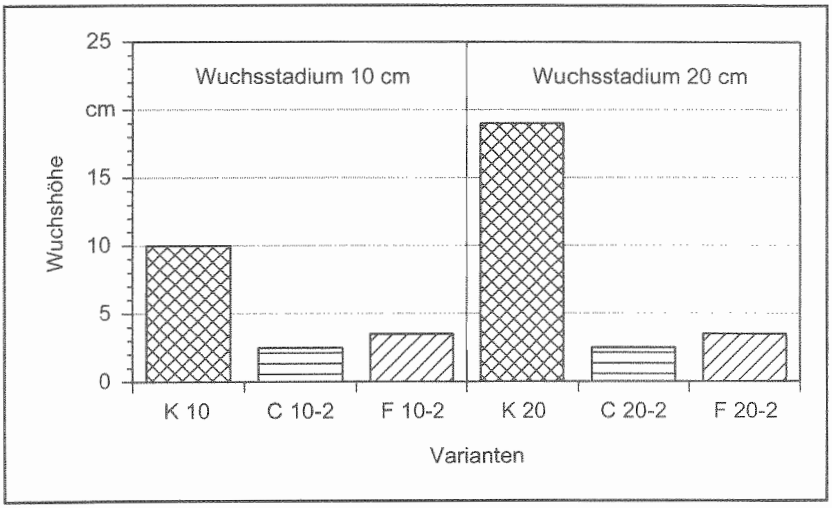


Abb. 76: Wuchshöhe von *Stellaria media* (L.) Vill., 0 Tage nach der Behandlung

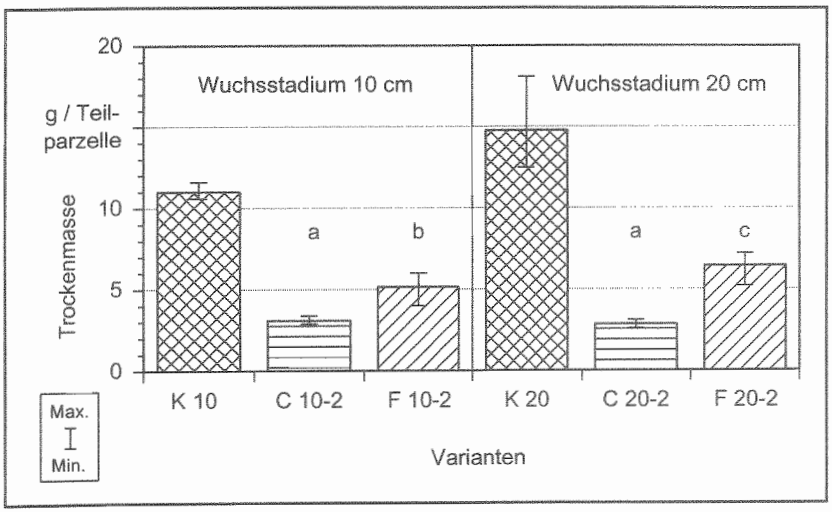


Abb. 77: Aufgewachsene Trockenmasse von *Stellaria media* (L.) Vill., 0 Tage nach der Behandlung

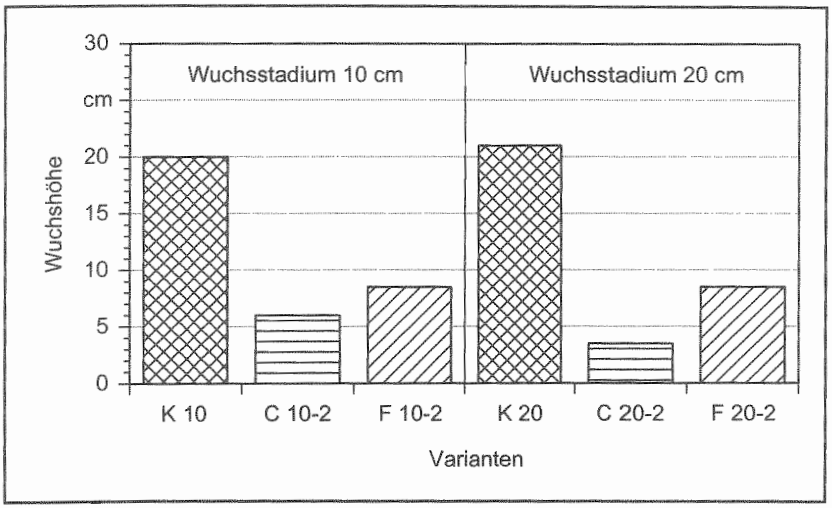


Abb. 78: Wuchshöhe von *Stellaria media* (L.) Vill., 10 Tage nach der Behandlung

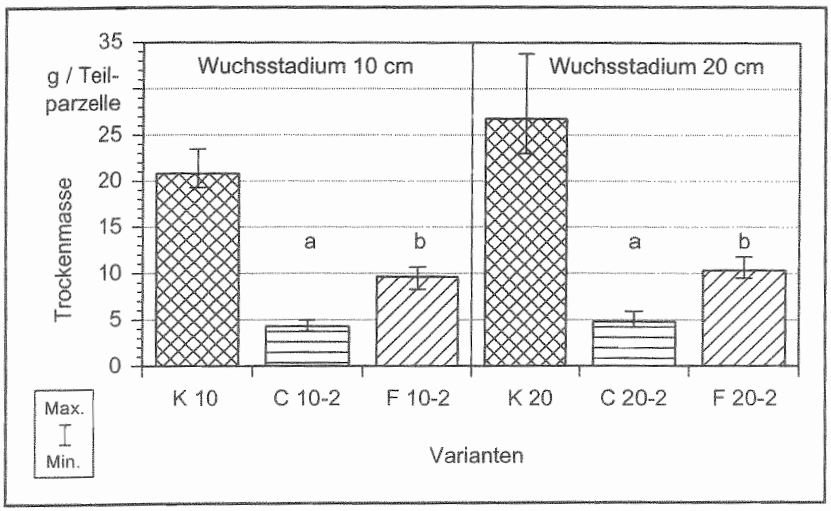


Abb. 79: Aufgewachsene Trockenmasse von *Stellaria media* (L.) Vill., 10 Tage nach der Behandlung

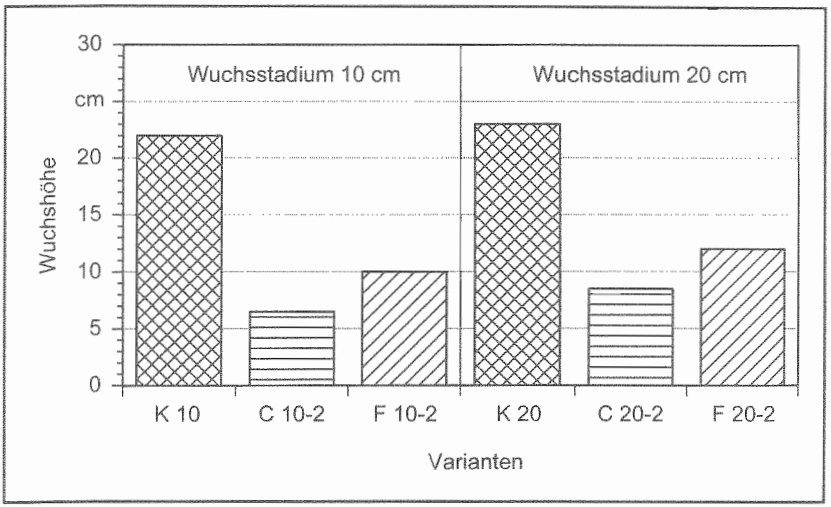


Abb. 80: Wuchshöhe von *Stellaria media* (L.) Vill., 20 Tage nach der Behandlung

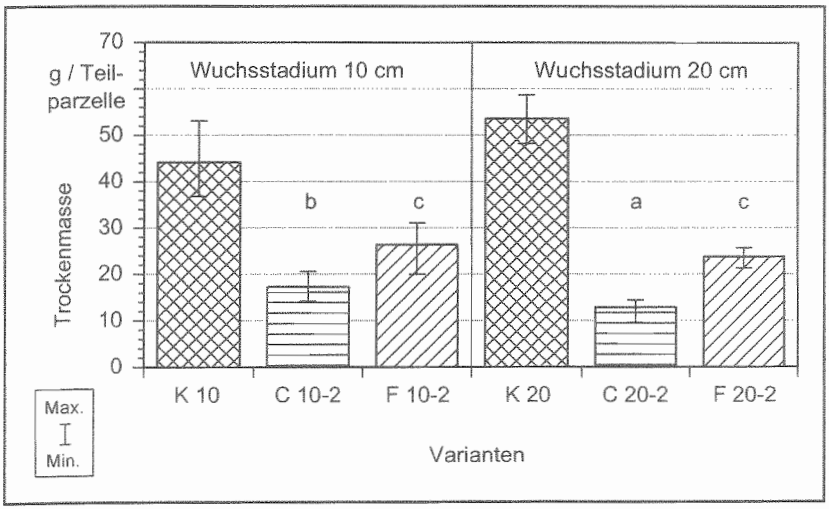


Abb. 81: Aufgewachsene Trockenmasse von *Stellaria media* (L.) Vill., 20 Tage nach der Behandlung

Tab. 16: Signifikanztabelle der Varianten Abschneiden C und Abschlegeln F von *Stellaria media* (L.) Vill., 0 bis 20 Tage nach der Behandlung

Prüfmerkmal **Trockenmasse**	Varianten			
Tage nach der Behandlung	C 10-2	F 10-2	C 20-2	F 20-2
0	**1,0**	2,0	**1,0**	3,0
10	**1,0**	2,0	**1,0**	2,0
20	2,0	3,0	**1,0**	3,0

4.2.4 Versuche mit verschiedenen Werkzeugtypen zum Abschneiden und Abschlegeln von AGRRE

Da besonders bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. die eingestellte und tatsächlich erreichte Abtrennhöhe bei den Varianten F um 1,5 cm voneinander abwichen und die nachhaltige Verminderung des Wiederaufwuchses von der Abtrennhöhe abhängig ist, wurden zusätzlich Versuche mit verschiedenen Werkzeugtypen (Kapitel 4.1.7.1) für die Arbeitsprinzipien Abschneiden und Abschlegeln an *Agropyron repens* (L.) Beauv. bei verschiedenen Vorfahrtsgeschwindigkeiten durchgeführt.

Die Verrechnung der gewonnenen Daten mittels Multipler Classifikations-Analyse (multiples $R^2 = 0,97$) ergab, daß der Einfluß des Werkzeugs auf die Abtrennhöhe größer als die Vorfahrtsgeschwindigkeit war. Die einzelnen Werkzeugtypen hatten eine unterschiedliche Auswirkung auf die tatsächlich erreichte Abtrennhöhe (Abbildung 82). Dabei wurden signifikante Unterschiede zwischen den Werkzeugtypen des Abschneidens und denen des Abschlegelns ermittelt. Während die Werkzeugtypen des Abschneidens C1, C2 und C3 die eingestellte Schnitthöhe von 2,0 cm bei allen Vorfahrtsgeschwindigkeiten nahezu exakt eingehalten haben, fiel das Ergebnis bei den Werkzeugtypen des Abschlegelns F1, F2 und F3 deutlicher schlechter aus. Die vorgegebene Abtrennhöhe von 2,0 cm wurde nur in einzelnen Fällen mit dem Schlegelrotor F2, der auch in den Feldversuchen verwendet wurde, erreicht. Nur bei diesem Werkzeugtyp war ein deutlicher Einfluß

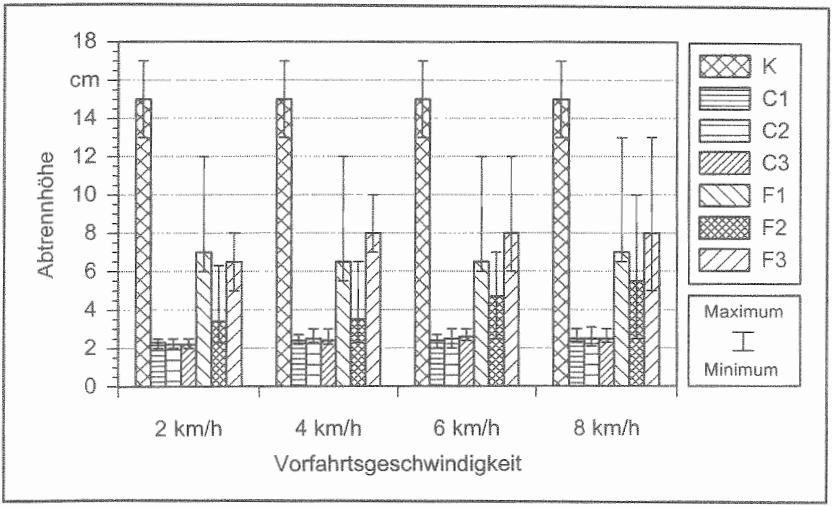


Abb. 82: Erreichte Abtrennhöhen mit verschiedenartigen Schneid- und Schlegelwerkzeugen bei *Agropyron repens* (L.) Beauv., 0 Tage nach der Behandlung

der Vorfahrtsgeschwindigkeit auf die erzielte Abtrennhöhe festzustellen. Mit zunehmender Geschwindigkeit erhöhte sich die Abtrennhöhe bei 8 km/h auf fast das Doppelte im Vergleich zu 2 km/h. Dies war darin begründet, daß der Rotor F2 nur vier auf 360° verteilte Schlegelwerkzeuge aufwies. Eine Erhöhung der Anzahl der Schlegel auf sechs würde zu einer Verbesserung führen. Im Vergleich zu den Schlegelwerkzeugen F1 und F3 wurde mit dem Schlegelrotor F2 durch die Form des geschlossenen Bügels deshalb das bessere Ergebnis erreicht, da gegenüber den Ungrashalmen eine größere Angriffsfläche gegeben war. Bemerkenswert ist, daß der Schlegelrotor F1, der bei den vorangegangenen Prüfstandsversuchen eingesetzt wurde, in diesem Versuch ein schlechteres Ergebnis als bei dem Versuch mit *Agropyron repens* (L.) Beauv. (Kapitel 4.2.3.1) erzielte. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß das Pflanzenmaterial für diesen Versuch aufgrund der Klimabedingungen sehr schnell herangewachsen war und daher wenig Festigungselemente ausgebildet waren. Somit war die Masse der einzelnen Halme geringer als im vorangegangenen Versuch mit *Agropyron repens* (L.) Beauv. Aus diesem Grund ist für die Einhaltung der Abtrennhöhe beim Einsatz von

Schlegelwerkzeugen eine deutlich höhere Geschwindigkeit zu fordern. Die von SCHEUFLER 1984 [172] für Gras genannte Untergrenze von 50 m/s ist, wie das Versuchsergebnis zeigt, nur bei einem Schnitt mit glatter, scharfer Schneide ausreichend.

Das von den „gezahnten" Klingen (Schneidrotor C2) bzw. den „rundum gezahnten" Klingen (Schneidrotor C3) gegenüber den „glatten" Klingen (Schneidrotor C1) erwartete Aufspleisen der Ungrasstoppel wurde nicht beobachtet. Das Trennbild am Halm von *Agropyron repens* (L.) Beauv. war in der gleichen Weise beschaffen wie beim Einsatz des Schneidrotors C1. Die Schnittstellen waren nur beim Einsatz der Schlegelrotoren ausgefranst.

5 Feldversuche

Nachdem in den Prüfstandsversuchen geklärt wurde, in welcher Weise der Wiederaufwuchs von Unkräutern und Ungräsern ohne Eingriff in das Bodengefüge nachhaltig reguliert werden kann, dienten die folgenden Feldversuche dazu, die zweite Frage der Zielstellung zu beantworten. In der Beispielskultur Mais sollte festgestellt werden, ob durch eine mechanische Unkrautregulierung, die nur die oberirdischen Pflanzenteile schädigt, der Unkrautaufwuchs sich so regulieren läßt, daß die Konkurrenz gegenüber der Kulturpflanze toleriert werden kann. Zu Beginn werden Material und Methoden vorgestellt. Im Anschluß daran folgen die Ergebnisse der einzelnen Versuchsstandorte. Zudem werden die beiden ergänzenden Untersuchungen zur Zerkleinerungswirkung der eingesetzten Schädigungswerkzeuge sowie zur Ermittlung des Leistungsbedarfs erläutert.

5.1 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden neben dem Versuchsgerät die Versuchsflächen sowie die Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung der Feldversuche im Mais beschrieben. Danach folgt die Ermittlung der Zerkleinerungswirkung an *Amaranthus retroflexus* L. und die Bestimmung des erforderlichen Leistungsbedarfs für ein Reihen-Unkraut-Mulchgerät.

5.1.1 Aufbau des Versuchsgerätes

Zur Beantwortung der Frage, ob durch eine mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge der Unkrautaufwuchs so reguliert werden kann, daß er eine tolerierbare Konkurrenz zur Kulturpflanze darstellt, wurde ein Reihen-Unkraut-Mulchgerät RWM (Row Weed Mulcher) als Versuchsgerät für die Reihenkultur Mais entwickelt und angefertigt (Abbildung 83), da auf dem Markt keines erhältlich war. Für einen erfolgreichen Einsatz sind von einem Reihen-Unkraut-Mulchgerät folgende Anforderungen zu erfüllen:

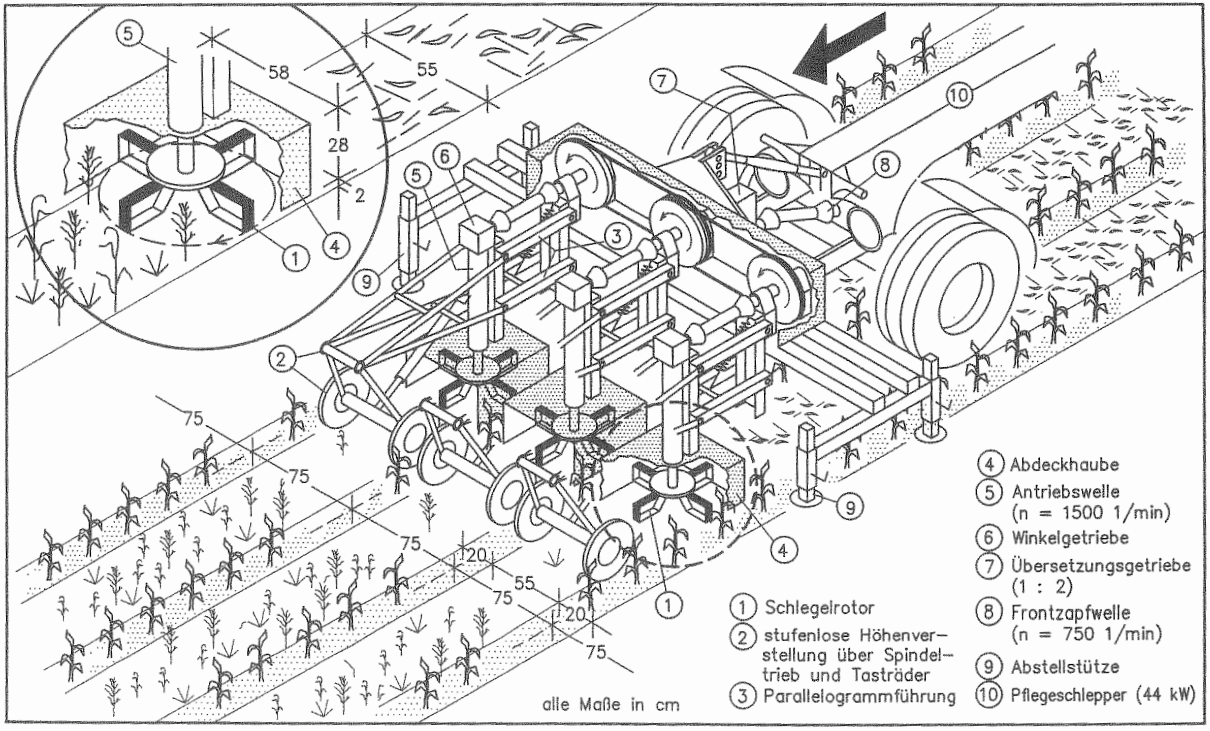


Abb. 83: Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM), 3-reihiges Versuchsgerät (Gesamtübersicht mit Detailansicht Schlegelrotor)

- Eine wirkungsvolle und nachhaltige Schädigung der Unkräuter und Ungräser muß gewährleistet sein. Diese ist erreichbar durch Schaffung einer möglichst großen Wunde und durch das Einhalten einer Schnitthöhe von 20 mm über der Bodenoberfläche (NAWROTH und ESTLER 1996) [153].
- Für eine hohe Flächenleistung ist eine hohe mögliche Vorfahrtsgeschwindigkeit ($v \geq 6$ km/h) nötig.
- Das Reihen-Unkraut-Mulchgerät ist frontseitig am Schlepper anzubauen, damit die Unkräuter nicht bereits durch die Schlepperräder niedergedrückt werden, bevor sie abgeschnitten bzw. abgeschlegelt werden.
- Die Werkzeuge müssen fremdkörperunempfindlich sein und einen geringen Verschleiß aufweisen.
- Das Arbeitsprinzip der Werkzeuge sollte die bodennahe Fauna schonen.
- Ein Reihen-Unkraut-Mulchgerät muß kostengünstig sein, damit die Kosten der Arbeitserledigung niedrig bleiben und keine hohen Fixkosten dieses Verfahren der Unkrautregulierung belasten.

Das Reihen-Unkraut-Mulchgerät RWM (Abbildung 83 und Abbildung 84) wurde als horizontal rotierender Schlegelmulcher konzipiert und ist in seinem Aufbau einem Sichelmessermäher oder -mulcher ähnlich. Der Vorteil des horizontal rotierenden Schlegelmulchers ist, daß fast die gesamte Baubreite der Arbeitsbreite entspricht. Ein vertikal rotierender Schlegelmulcher besitzt dagegen eine etwas größere Fremdkörperunempfindlichkeit, jedoch ist für den meist seitlich angeordneten Antrieb ein zusätzlicher Platzbedarf nötig. Deshalb ist die Arbeitsbreite dieser Geräte immer geringer als die Baubreite (NAWROTH 1997) [151].

Der vertikale Antrieb ⑤ des Schlegelrotors benötigt wenig Platz und ermöglicht einen hohen Rahmendurchgang (Abbildung 83). Somit ist der Einsatz bis zum Reihenschluß der Kulturpflanze, der bei Mais mit einem Reihenabstand von 75 cm ab etwa 80 cm Wuchshöhe erfolgt, ohne große Blattverletzungen möglich. Wie Abbildung 84 zeigt, wurden die drei Schlegelrotoren des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes, das in der Front-Dreipunkthydraulik eines Pflegeschleppers (45 kW) angebaut war, mechanisch über die Frontzapfwelle ⑧ mittels Gelenkwelle und ein

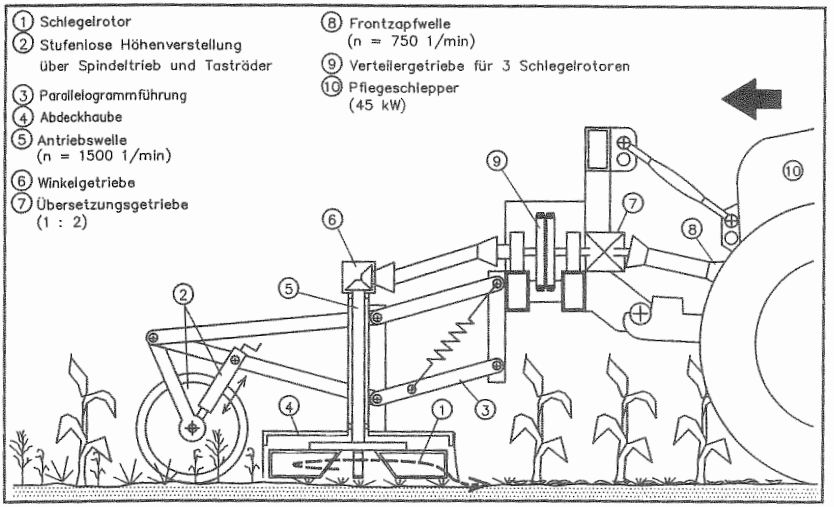


Abb. 84: Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM), 3-reihiges Versuchsgerät (Seitenansicht)

Übersetzungsgetriebe ⑦ angetrieben. Der Antrieb des jeweiligen Schlegelrotors erfolgte über ein nachfolgendes Verteilergetriebe ⑨. Von dort wurde die Antriebskraft mit einer Gelenkwelle über ein Winkelgetriebe ⑥ auf die vertikale Antriebswelle ⑤ des Schlegelrotors weitergeleitet (Abbildung 84).

Die exakte Einstellung und Einhaltung der Schnitthöhe von 20 mm über der mittleren Bodenoberfläche erfolgte durch die stufenlose Höhenverstellung über einen Spindeltrieb ②, die Tasträder ② und die Parallelogrammführung ③. Das Versuchsgerät wurde 3-reihig angefertigt, um den Einfluß dieses neuen Konzepts der Unkrautregulierung auf den Ertrag anhand der zwei eingeschlossenen Kulturpflanzenreihen ermitteln zu können. Als Schlegelrotor ① wurde ein Rotor mit vier gekröpften Flacheisen, die als abschlegelnde Werkzeuge fungierten, verwendet (Abbildung 83 und Abbildung 84). Für eine größere Verwindungssteifigkeit wurde die Form eines geschlossenen Bügels gewählt, da der Einsatz auch in Mulchsaatbeständen mit sehr festem Boden erfolgte und ein etwaiger Bodenkontakt bei Bodenunebenheiten nicht ganz ausgeschlossen werden konnte.

Die Ermittlung der Umfangsgeschwindigkeit an der Werkzeugspitze erfolgte über Drehzahlmessungen an der vertikalen Antriebswelle, die mit dem Drehzahlmeßgerät „Deumo" der Firma Hoffmann vorgenommen wurden. Zur Absicherung des Meßergebnisses wurden die Messungen dreimal wiederholt und der arithmetische Mittelwert gebildet. Die Rotordrehzahl des Schlegelrotors betrug 1500 1/min ± 5 1/min, dies entspricht einer Umfangsgeschwindigkeit von 43,2 m/s an der Werkzeugspitze bei einem Außendurchmesser des Rotors von 550 mm. Damit sind nach WIENEKE (1972) [207] die Bedingungen von mindestens 25 m/s für den freien Schnitt ohne Gegenschneide erfüllt. Die Vorfahrtsgeschwindigkeit betrug bei allen Behandlungsvarianten 6,0 km/h. Bei der gegebenen Rotordrehzahl von 1500 1/min und der genannten Vorfahrtsgeschwindigkeit von 6,0 km/h erfolgte alle 16 mm eine neue Zykloidenbahn. Damit reichte die wirksame Schlegellänge von über 100 mm gut aus. Der Geschwindigkeitskennwert der Zykloidenbahn $\varkappa$ lag bei einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 6 km/h bei 0,039. Damit wurde fast der gleiche Zykloidenkennwert $\varkappa$ erreicht, der in den Prüfstandsversuchen bei der höheren Umfangsgeschwindigkeit von 56,2 m/s und einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 8 km/h 0,040 betrug.

5.1.2 Versuchsflächen

Die Versuche wurden in der Reihenkultur Mais (*Zea mays* L.) auf vier verschiedenen Standorten in der Umgebung von Freising (Südbayern) durchgeführt (Abbildung 85). Das neue Verfahren der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge wurde deshalb in der Kultur Mais getestet, da dort aufgrund des weiten Reihenabstandes von 75 cm große Einsparungen an Herbiziden möglich sind. Die vier Versuchsstandorte Dürnast, Freising-Süd, Eittingermoos und Großenviecht wurden so ausgewählt, daß verschiedenartige Unkrautspektren erfaßt wurden (Tabelle 17). Die einzelnen Versuchsflächen wiesen einen gleichmäßig über die Fläche verteilten Unkrautbesatz auf. Dieser lag vor der Herbizidbehandlung je nach Standort bei einem Unkrautdeckungsgrad von etwa 5 % bis 10 %.

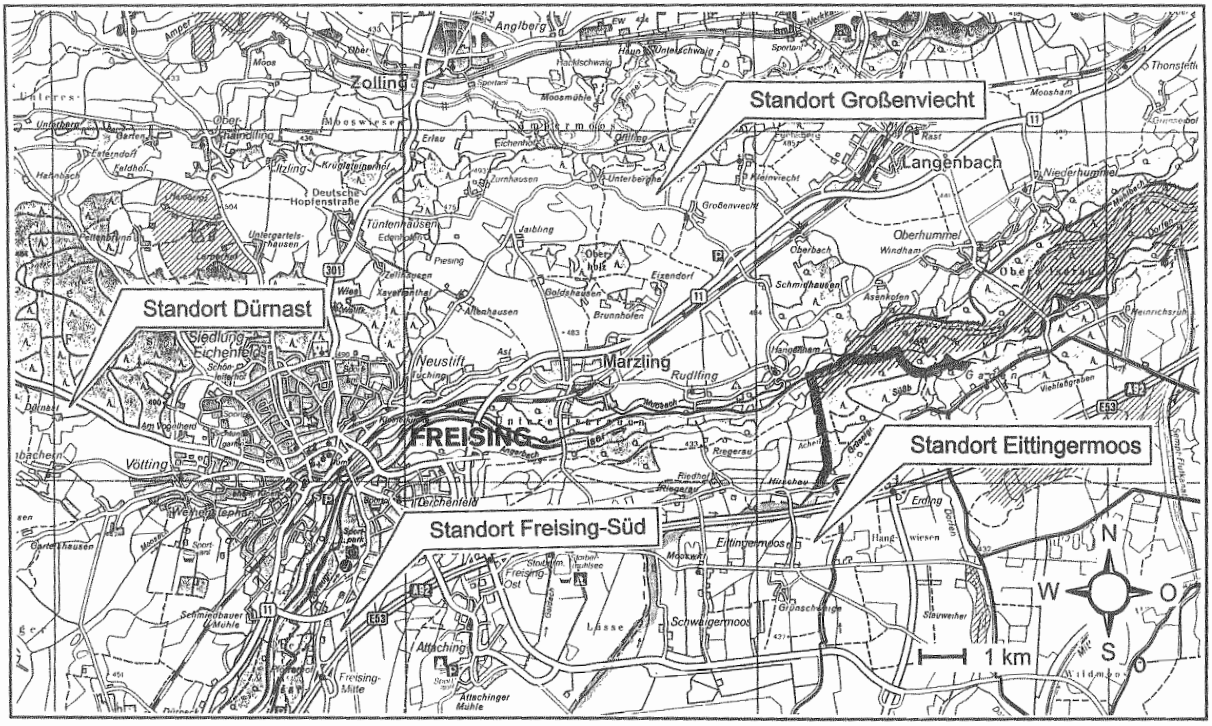


Abb. 85: Geographische Lage der Versuchsstandorte (Maßstab: 1 : 75000)

Tab. 17: Beschreibung der Versuchsstandorte

	Standort			
	Dürnast	Freising-Süd	Eittingermoos	Großenviecht
Acker-unkraut-gesell-schaft (nach OBER-DORFER et al. 1993, HOFMEI-STER und GARVE 1986 und 1998) [158, 85, 86]	Gem. Erdrauch-Assoziation (*Thlaspio-Fumarietum officinalis*) Rasse von Stechendem Hohlzahn (*Galeopsis tetrahit* L.)	Gem. Erdrauch-Assoziation (*Thlaspio-Fumarietum officinalis*) Rasse von Stechendem Hohlzahn (*Galeopsis tetrahit* L.)	Glanzehren-preis-Assoziation (*Thlaspio-Veronicetum politae*) Fazies: zurück-gebogener Amarant (*Amaranthus retroflexus* L.)	Kleinblütige Franzosen-kraut-Assoziation (*Setario-Galinso-getum parviflorae*) Fazies: Hühnerhirse (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.)
Leit-unkräuter	ATXPA, CHESS, KKKGY, POAAN, RUMOB	AGRRE, CHEAL, GALAP, GALTE, PLAME, VERSS	AMARE, CAPBP, CHEAL, ECHCR, GASPA, STEME	CHEAL, ECHCR, GASPA, VIOAR
Bodentyp [27]	Parabraunerde aus Lößlehm	Braunerde über Kalkschotter	Niedermoor auf Kalkschotter	Parabraunerde aus Löß
Bodenart [27]	Ls2	Ls3	AMO/Sl2	Lt2

In der Tabelle 17 sind zudem die Leitunkräuter des jeweiligen Standortes sowie der Bodentyp und die Bodenart angegeben. Die Höhenlage der Versuchsstandorte erstreckte sich von ca. 430 m NN in den Niederungen der Isar im Osten (Standorte Freising-Süd und Eittingermoos) bis zu ca. 500 m NN im tertiären Hügelland im Westen und Norden (Standorte Dürnast und Großenviecht) von Freising. Nach den Angaben der Meßstelle des Deutschen Wetterdienstes in Weihenstephan (Freising) beträgt der langjährige Mittelwert der Niederschlagssumme 814 mm; die Jahresmitteltemperatur liegt im langjährigen Durchschnitt bei 7,7 °C (VAN EIMERN 1981) [47]. WITTMANN 1983 und 1991 [210, 211] beschreibt das Klima dieser Region als mäßig feucht und mild bis mäßig kühl.

Die Versuchsflächen waren in Praxisschlägen von Landwirten integriert. Die Bodenbearbeitung, die Saatbettbereitung und die Saat sowie die Flächenbehandlung mit Herbizid der Vergleichsvariante „Herbizid" wurden von dem jeweiligen Landwirt durchgeführt. Der Mais (*Zea mays* L.) war auf allen Standorten im Reihenabstand von 75 cm ausgesät worden. Auf dem Standort Dürnast erfolgte die Maissaat als Mulchsaat ohne Saatbettbereitung in die abgefrorene Zwischenfrucht Senf (*Sinapis alba* L.). Die genauen Anbaudaten der Versuchsflächen (Tabelle A2) und der Wachstumsverlauf des Mais der Versuchsflächen der betriebsüblichen Variante mit flächigem Herbizideinsatz (Tabelle A3) sowie eine Übersicht der Entwicklungsstadien von Mais (Abbildung A8) sind im Anhang zu finden.

5.1.3 Versuchsplanung

Zu Beginn sollten die Erkenntnisse der Prüfstandsversuche in den Feldversuchen auf den vier vorgestellten Standorten in der Kultur Mais überprüft werden. Anhand der Beurteilung des Unkrautaufwuchses im Zwischenreihenbereich, des Wachstumsverlaufs des Mais und der erzielten Erträge wurde geklärt, ob mit dieser neuen Methode der Unkrautregulierung die Verunkrautung in konventionell bestellten und auch in Mulchsaat-Beständen auf einem tolerierbaren Niveau gehalten werden kann. Im folgenden werden die Versuchsanlage sowie die Versuchsdurchführung und -auswertung vorgestellt.

Da die erosionsvermindernde Bodenbedeckung im Fall der konventionellen Maissaat von der Zersetzungszeit der abgemulchten Unkräuter abhängt, ist auch der Zerkleinerungsgrad der abgeschlegelten Unkräuter von Bedeutung, denn je länger die verbleibende Stengellänge ist, desto langsamer ist der mikrobielle Abbau. Bei einer Zerkleinerung in kürzere Stengelstücke kann jedoch das abgeschlegelte Pflanzenmaterial gleichmäßiger über die Fläche verteilt bzw. mit einer entsprechenden Vorrichtung in die Pflanzenreihe eingebracht werden. Deshalb wurde die Zerkleinerungswirkung von drei ausgewählten Schneid- bzw. Schlegelrotoren getestet. Die Untersuchungen wurden an *Amaranthus retroflexus* L. vorgenommen, da auf dem Standort Eittingermoos dieses Unkraut für eine statistische Absicherung der Ergebnisse in einer ausreichend hohen Dichte vorkam. Nachfolgend werden die verwendeten Schädigungswerkzeuge und Testpflanzen sowie die Versuchsanlage, -durchführung und -auswertung erläutert.

Im Hinblick auf die verfahrenstechnische Einordnung und Bewertung des neuen Unkrautregulierungsverfahrens wurden an einem Schlegelaggregat zur Berechnung des erforderlichen Leistungsbedarfs eines Reihen-Unkraut-Mulch-Gerätes, das der Bauart eines horizontal rotierenden Schlegel- bzw. Sichelmulchers entspricht, maximale Drehmomente unter verschiedenen Einsatzbedingungen ermittelt.

5.1.4 Versuch mit 3-reihigem Reihen-Unkraut-Mulchgerät

Der Unkrautregulierungsversuch im Mais mit dem 3-reihigen Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM) erfolgte mit der Zielsetzung, daß unter verschiedenen Praxisbedingungen die Erkenntnisse der Prüfstandsversuche umgesetzt und statistisch abgesicherte Ergebnisse erzielt werden. Nachfolgend werden die Versuchsanlage, -durchführung und -auswertung detailliert beschrieben.

5.1.4.1 Versuchsanlage

Da die Versuche auf Praxisschlägen von Landwirten durchgeführt wurden, wurde als Anlageform eine einfaktorielle Blockanlage (BÄTZ et al. 1987) [11] in vierfacher Wiederholung gewählt. Dabei wurden bezogen auf den Zwischenreihenbereich die vier Varianten Kontrolle (unbehandelt), Herbizid (ganzflächiger, betriebsüblicher Herbizideinsatz), RWM 1x (einmaliger Einsatz des Reihenmulchgerätes) und RWM 2x (zweimaliger Einsatz des Reihenmulchgerätes) untersucht (Abbildung 86). Eine Versuchsvariante mit mehr als zwei Einsätzen des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes wurde aus Gründen der verfügbaren Feldarbeitstage und aus ökonomischen Gesichtspunkten nicht in die Versuchsplanung aufgenommen.

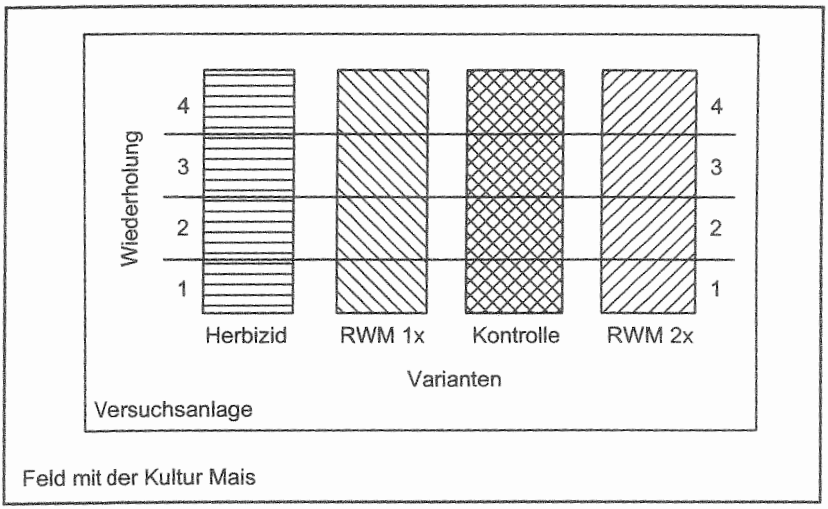


Abb. 86: Versuchsanlage der Feldversuche in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

5.1.4.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Herbizidbehandlung der Variante Herbizid wurde je nach Standort im 2- bis 4-Blatt-Stadium des Mais durchgeführt. Die verwendeten Präparate sowie die genauen Zeitpunkte sind in Tabelle A2 im Anhang zu finden. In den Versuchsvarianten RWM 1x und RWM 2x wurde eine kombinierte Unkrautregulierung durchgeführt. In der Reihe erfolgte die Unkrautregulierung chemisch mit einer Bandspritzung. Zwischen den Reihen wurde das in Kapitel 5.1.1. beschriebene Reihenmulchgerät eingesetzt (Abbildung 87).

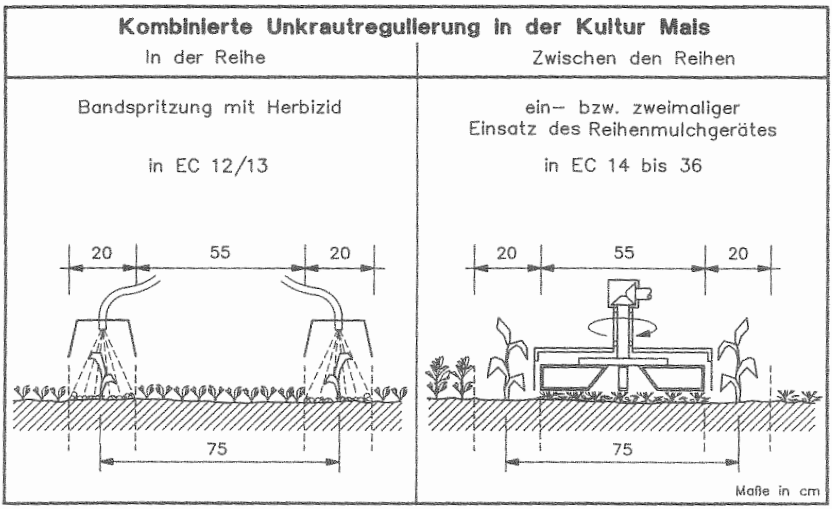


Abb. 87: Ablauf der kombinierten Unkrautregulierung der Feldversuche in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

Die Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM) erfolgte in den Varianten RWM 1x und RWM 2x im 4- bis 6-Blatt-Stadium des Mais bei 20 cm bis 40 cm Wuchshöhe. Die zweite Behandlung der Variante RWM 2x fand je nach Standort im 6- bis 10-Blatt-Stadium bei 40 cm bis 80 cm Wuchshöhe des Mais statt. Die Bandspritzung in der Maisreihe wurde im 2- bis 4-Blatt-Stadium des Mais bei 10 cm bis 15 cm Wuchshöhe mit einer

Bandbreite von 20 cm durchgeführt. Auf allen vier Standorten wurde bei der Bandspritzung das Herbizid „Zintan Pack" (4,5 l/ha Gardoprim Plus (333 g/l Metolachlor, 167 g/l Terbutylazin) + 2,0 kg/ha Lentagran (45 % Pyridate)) in der vollen Aufwandmenge verwendet, da damit zum einen alle vorkommenden Unkrautarten - insbesondere die Hirsearten - erfaßt wurden und zum anderen durch die Kombination von Blatt- und Bodenwirkung eine sichere, langanhaltende Unkrautbekämpfung gewährleistet ist. Zudem zeichnet sich das Präparat durch eine gute Verträglichkeit des Mais aus. Die Bandspritzung erreichte auf allen vier Standorten einen Wirkungsgrad von 100 %.

Datenerfassung

Um den Regulierungserfolg ermitteln zu können, wurde in wöchentlichem Abstand bis zum Reihenschluß und nochmals kurz vor der Ernte der Unkrautdeckungsgrad in % mit dem Göttinger Schätzrahmen (0,1 m^2), die aufgewachsene Unkrautpflanzenmasse in g TM/m^2 mit einem Probennahmerahmen, der dem Göttinger Schätzrahmen (0,1 m^2) angepaßt war, und die Pflanzenwuchshöhe von Unkräutern und Mais in cm bestimmt. Da bei der mechanischen Unkrautregulierung die Anzahl der Fahrspuren bedingt durch die geringere Arbeitsbreite gegenüber einer Pflanzenschutzspritze meist höher ist, wurde auch der Effekt der Schlepperfahrspuren auf den Unkrautaufwuchs beobachtet. Für die Parameter Unkrautdeckungsgrad und Unkrauttrockenmasse wurden für die Fahrspur und für einen unbefahrenen Zwischenreihenbereich separat Werte ermittelt. Zudem wurde zu jedem Boniturzeitpunkt die Unkrautartenzusammensetzung und der Anteil der Leitunkräuter am Unkrautdeckungsgrad in % erfaßt. Zur Dokumentation des Regulierungserfolges wurden bei jeder Bonitur photographische Aufnahmen der vier untersuchten Varianten angefertigt.

Um den Erfolg der verschiedenen Varianten der Unkrautregulierung festzustellen und eine Beurteilung der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge zu ermöglichen, wurde neben den Bonituren mit den oben genannten Parametern der Kornertrag in dt TM/ha ermittelt. Dafür wurden bei der Ernte zehn

Kolben pro Parzelle von Hand entnommen. Die geernteten Maiskolben wurden nach einer manuellen Entlieschung einem Laborrebler zur Trennung von Korn und Spindel zugeführt. Die Ermittlung des Trockenmasseertrages der gewonnenen Maiskörner erfolgte durch Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz in einem Trockenschrank (DIN 50 011) [39] und anschließender Wiegung mit einer digitalen Analysenwaage (DIN 81 20) [38], die eine Genauigkeit von $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ kg aufwies, in Anlehnung an DIN 10 360 [37].

Statistische Auswertungsverfahren

Die Durchführung der statistischen Auswertung erfolgte wie bei den Prüfstandsversuchen mit dem PC-Statistikprogramm SPSS® 7.5 [187]. Die Ertragsdaten wurden vor der varianzanalytischen Verrechnung auf Normalverteilung geprüft. Sowohl der Homogenitätstest nach DAVID et al. 1954 [32] und PEARSON und STEPHENS 1964 [160] als auch der exaktere Kolmogoroff-Smirnoff-Test in der Lilliefors-Modifikation (DALLAL und WILKINSON 1986, SACHS 1992) [31, 168] zeigten, daß die Bedingungen für die Normalverteilung signifikant erfüllt wurden. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 5 % lagen alle Quotienten „Spannweite/Standardabweichung" für den einzelnen Versuchsstandort bei einem Stichprobenumfang von $n = 4$ (bzw. 3 (Standort Dürnast)) je Variante innerhalb der kritischen Grenzen von 1,98 (1,76) und 2,43 (1,99) wie auch bei einer Verrechnung über alle vier Standorte innerhalb der kritischen Grenzen von 2,97 und 4,17. Die varianzanalytische Verrechnung der Daten erfolgte mit der Prozedur ANOVA (Analysis of Variance) bei $\alpha = 5$ % für den F-Test. Nachfolgend wurden die Daten einem Mittelwertsvergleich mit dem Student-Newman-Keuls-Signifikanztest bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 5 % unterzogen, wenn zwischen den Prüfgliedern signifikante Unterschiede ermittelt wurden. Der Student-Newman-Keuls-Test wurde aus den im Kapitel 4.1.4.3 genannten Gründen gewählt. Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern sind im Kapitel 5.2 „Feldversuche - Ergebnisse" mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. Neben dem Vergleich der absoluten Maiserträge je nach Standort wurde eine Verrechnung der Relativerträge über alle

vier Standorte vorgenommen. Dabei wurde der Faktor Standort zentriert und die jeweilige Herbizidvariante gleich 100 % gesetzt.

Für die Parameter Unkrautdeckungsgrad, Unkrauttrockenmasse, Anteil der einzelnen Unkrautarten am Gesamtunkrautdeckungsgrad sowie Wuchshöhe der Unkräuter bzw. des Mais wurden je Variante und Boniturzeitpunkt der arithmetische Mittelwert sowie die Spannweite mit den Minimas und Maximas berechnet, da aufgrund der Streuung der Werte innerhalb der Varianten eine varianzanalytische Verrechnung mit nachfolgendem Mittelwertsvergleich wie auch die Anwendung nicht parametrischer Tests nicht sinnvoll war. Zudem waren die Bedingungen für eine Normalverteilung nicht in allen Fällen erfüllt. Eine Verrechnung dieser Daten über die vier Standorte darf nicht erfolgen, da sich die Standorte hinsichtlich der Verunkrautung wie auch der verwendeten Maissorten unterscheiden und somit nicht vergleichbar sind. Ziel der Feldversuche war es, das neue Verfahren der Unkrautregulierung unter verschiedenartigen Einsatzbedingungen zu testen. Zur Veranschaulichung der unkrautregulierenden Wirkung der einzelnen Behandlungen wurde für die Parameter Unkrautdeckungsgrad und Unkrauttrockenmasse der Regulierungserfolg in % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle errechnet.

Die graphische Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte wie bei den Prüfstandsversuchen mit dem PC-Programm Xact® in der Version 5.00f [184]. In den Graphiken sind neben den Mittelwerten der jeweiligen Variante die Minima und Maxima ausgewiesen (Parameter: Unkrautdeckungsgrad, Unkrauttrockenmasse, Regulierungserfolg und absoluter Kornertrag) und die nach dem Student-Newman-Keuls-Test signifikanten Unterschiede der Erträge dargestellt.

5.1.5 Ermittlung der Zerkleinerungswirkung an *Amaranthus retroflexus* L.

Der Zerkleinerungsgrad der abgemulchten Unkräuter entscheidet darüber, wie schnell die Pflanzenmasse mikrobiell abgebaut wird. Die unterschiedliche Zerkleinerungswirkung der Arbeitsprinzipien Abschneiden und Abschlegeln wie auch von verschiedenen Bauformen der Schlegelrotoren wurde geprüft. Die

Schädigungswerkzeuge, die Testpflanzen sowie der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und -auswertung werden im folgenden erläutert.

5.1.5.1 Schädigungswerkzeuge

Als Schädigungswerkzeuge kamen neben dem Scheidrotor C3, die Schlegelrotoren F2 und F3 (Abbildung 20, Kapitel 4.1.7.1.) zum Einsatz, die bereits im Prüfstandsversuch mit *Agropyron repens* (L.) Beauv. verwendet wurden. Die Konstruktion dieser Rotoren ist in Kapitel 4.1.7.1 beschrieben.

5.1.5.2 Testpflanzen und Versuchsanlage

Die Untersuchungen erfolgten 1997 am Standort Eittingermoos in der Kultur Mais (EC 14, 25 cm Wuchshöhe), der vorwiegend mit *Amaranthus retroflexus* L. in einer sehr hohen Dichte (115 Pflanzen/m²) verunkrautet war. Die *Amaranthus retroflexus* L.-Pflanzen (EC_{AMARE} 25/35) waren sehr gut entwickelt und wiesen im Durchschnitt eine Wuchshöhe von 20,2 cm auf. Dafür wurden zur Kontrolle manuell 100 *Amaranthus retroflexus* L.-Pflanzen ebenerdig abgeschnitten.

5.1.5.3 Versuchsdurchführung und -auswertung

Für den Versuch zur Zerkleinerungswirkung wurde das in Kapitel 5.1.1 beschriebene Versuchsgerät für den Feldeinsatz verwendet. Da die Entnahme der abgeschnittenen bzw. abgeschlegelten *Amaranthus retroflexus* L.-Pflanzen nur im unbefahrenen Zwischenachsbereich erfolgen sollte, wurden die beiden seitlichen Schlegelaggregate entfernt und das 3-reihige zu einem 1-reihigen Versuchsgerät umgebaut. Die Vorfahrtsgeschwindigkeit betrug wie in den beschriebenen Feldversuchen (Kapitel 5.1.1) 6,0 km/h. Das Versuchsgerät war bei allen drei verwendeten Rotoren so eingestellt, daß die Abtrennhöhe über der mittleren Bodenoberfläche 20 mm betrug.

Nach der Behandlung mit den drei verschiedenen Schädigungswerkzeugen wurde je Versuchsvariante von viermal 1 m² Bodenfläche das gesamte gemulchte Pflanzenmaterial manuell aufgesammelt und jeweils zu einer Mischprobe vereinigt. Aus der jeweiligen Mischprobe wurden nach dem Zufallsprinzip 100 Stengelbruchstücke von *Amaranthus retroflexus* L. entnommen und in der Länge mit einer Genauigkeit von ± 0,1 cm vermessen. Anschließend wurden die gemessenen Stengelbruchstücke fünf Klassen von Stengellängen zugeordnet und der relative Anteil der Anzahl in den einzelnen Klassen ermittelt. Die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgte, wie in Kapitel 5.1.4.2 beschrieben, mit dem PC-Programm Xact® (Version 5.00f) [184].

5.1.6 Bestimmung des Leistungsbedarfs

Zur verfahrenstechnischen Einordnung und Bewertung des neuen Verfahrens der mechanischen Unkrautregulierung ist die Ermittlung des notwendigen Leistungsbedarfs erforderlich. Da zur Bewertung der maximal benötigte Leistungsbedarf entscheidend ist, wurde der nachfolgend beschriebene Versuchsaufbau so gewählt, daß die maximal möglichen Leistungsspitzen ermittelt wurden.

5.1.6.1 Versuchsaufbau

Die Ermittlung des Leistungsbedarfs erfolgte über eine Drehmomentmessung. Die Drehmomentmessungen wurden an einem Schlegelrotoraggregat des in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Versuchsgerätes, das mit dem Schlegelrotor F2 (Kapitel 4.1.7.1) bestückt war, bei einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 6,0 km/h durchgeführt. Dabei wurden Situationen simuliert, in denen Leistungsspitzen und somit auch Drehmomentspitzen auftreten. Zur Ermittlung der maximalen Drehmomente M_{max} am Schlegelrotor wurden zwei Drehmomentmeßreihen unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Zum einen erfolgte die Drehmomentmessung auf einem abgeernteten Winterweizenfeld, dessen Getreidestoppeln eine Halmlänge von 15 cm ± 3 cm aufwiesen. Die Dichte der Halme betrug im Mittel 530 Halme/m². Zum anderen wurde eine Drehmomentmessung am geneigten Rand eines

wassergebundenen Weges, der mit einer rückverfestigten Schotterauflage versehen war, durchgeführt. Dadurch sollten eine hohe Pflanzendichte, nicht vollständig untergepflügte Getreidestoppeln wie auch sehr fester, dicht lagernder Boden, wie er in Mulch- und Direktsaatbeständen vorkommen kann, simuliert werden. Zudem wurde getestet, wie hoch der Leistungsbedarf beim Durchfahren von Maulwurfshaufen ansteigt.

5.1.6.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Drehmomentmessung erfolgte mit der Drehmomentmeßwelle ZF 2 der Firma ZF-Friedrichshafen, die auf eine statische Nennlast von 1000 Nm und auf eine schwellende Nennlast von 750 Nm ausgelegt war. Diese Drehmomentmeßwelle besitzt ein Drehfrequenzsignal von 10 Impulsen/Umdrehung. Die Messungen erfolgten auf der Getreidestoppel im Meßbereich 0,5, der bis zu einem Drehmoment M_d von 250 Nm reicht, und am Wegrand im Meßbereich 1, mit dem Drehmoment-Messungen bis 500 Nm möglich sind. Die Festlegung der Meßbereiche erfolgte durch Vorversuche. Die Drehmomentmeßwelle wurde zuvor statisch kalibriert.

Die Drehmomentmeßwelle war so gebaut, daß sie auf der einen Seite auf ein Zapfwellenprofil aufsteckbar und auf der anderen Seite eine Gelenkwelle montierbar war. Somit konnte sie zwischen Zapfwellenstummel und Gelenkwelle eingebaut werden. Die Meßwelle wurde auf den schlepperseitigen Zapfwellenstummel aufgesteckt und anschließend die Gelenkwelle für den Antrieb des 1-reihigen Reihenmulchgerätes angesteckt. Die Stromversorgung und die Signalübertragung erfolgte jeweils über ein 25 m langes Kabel von einem Begleitfahrzeug aus. In diesem Begleitfahrzeug war der Trägerfrequenz-Meßverstärker KWS 3072 der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH (Darmstadt), der eine maximale Abweichung von 1 % besaß, und der Linienschreiber DLH 252 der Gebrüder Laumann Meßgeräte und Anlagenbau (Selb) mit einem Meßfehler von 0,3 % untergebracht.

Für die Drehmomentmessungen, die je Einsatzort dreimal wiederholt wurden, waren somit zwei Personen nötig. Eine Person lenkte das Begleitfahrzeug und überwachte

die Aufzeichnung der Drehmomentmessungen. Die zweite Person steuerte den Schlepper mit dem frontseitigen 1-reihigen Reihenmulchgerät, das auf eine Abtrennhöhe von 20 mm über der mittleren Bodenoberfläche eingestellt war.

Die graphische Ergebnisdarstellung der Drehmomentmessungen erfolgte unter Verwendung des PC-Programms Xact® (Version 5.00f) [184] anhand je einer charakteristischen Messung je Einsatzort. Die maximale Leistung P_{max} kann bei gegebener Winkelgeschwindigkeit ω ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 78{,}5$ 1/s; $f = 750$ 1/min bzw. 12,5 1/s) und bekanntem Drehmoment M_d bzw. M_{max} folgendermaßen berechnet werden [117]:

$$\textit{Maximaler Leistungsbedarf } P_{max} = M_{max} \cdot \omega \qquad (3)$$

mit:

P_{max}: maximale Leistung
M_{max}: maximales Drehmoment
ω: Winkelgeschwindigkeit

Anhand der Meßergebnisse der Drehmomentmessungen kann der maximale Drehleistungsbedarf eines einzelnen Schlegelaggregates mit einer Arbeitsbreite von 550 mm bestimmt werden. Der Zapfwellenleistungsbedarf eines mehrreihigen Reihenmulchgerätes kann näherungsweise durch Addition des Leistungsbedarfs der einzelnen Schlegelaggregate ermittelt werden, sofern diese die gleiche Arbeitsbreite aufweisen. Der Gesamtleistungsbedarf für ein frontseitiges Reihenmulchgerät ergibt sich aus dem Zapfwellenleistungsbedarf und der benötigten Schubleistung. Fahrwiderstände, die die Antriebsmaschine Schlepper überwinden muß, sind im Gesamtleistungsbedarf nicht enthalten und müssen bei der Berechnung der erforderlichen Schlepperleistung zusätzlich berücksichtigt werden (KÜHLBORN und STEINKAMPF 1970) [122].

5.2 Ergebnisse

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Feldversuche mit dem 3-reihigen Reihen-Unkraut-Mulchgerät RWM vorgestellt. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der vier Versuchsstandorte erläutert. Nachfolgend sind die Regulierungserfolge und die Ertragsergebnisse der Versuchsvarianten über alle Standorte zusammengefaßt dargestellt. Anschließend folgen die Ergebnisse zum Zerkleinerungseffekt bei *Amaranthus retroflexus* L. und die Ergebnisse der Drehmomentmessungen mit der Ermittlung des Leistungsbedarfs.

5.2.1 Versuch mit 3-reihigem Reihen-Unkraut-Mulchgerät

In allen durchgeführten Versuchen leistete der speziell angefertigte 3-reihige Reihen-Unkraut-Mulcher RWM eine erfolgreiche Arbeit. Mit den horizontal abschlegelnden Werkzeugen wurde die gewünschte Schädigung der Unkräuter zuverlässig erreicht. Abbildung 88 zeigt den aufgespleisten Stengel eines Weißen Gänsefußes (*Chenopodium album* L.) nach Einsatz des Reihenmulchgerätes bei der eingestellten Schnitthöhe von 20 mm. Durch die große Wundoberfläche der optimal mechanisch geschädigten Unkrautpflanze ist deren Regenerationsfähigkeit sehr stark eingeschränkt.

Für jeden der in Kapitel 5.1.2 beschriebenen vier Standorte (Dürnast (Mulchsaat von Mais), Freising-Süd, Eittingermoos und Großenviecht) werden die Ergebnisse hinsichtlich des Unkrautdeckungsgrades, der Unkrauttrockenmasse, des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG), der Entwicklung der Wuchshöhe des Mais und der Unkräuter und des prozentualen Regulierungserfolges für den Unkrautdeckungsgrad bzw. die Unkrauttrockenmasse nach der Behandlung sowie in EC 35/36 des Mais (Reihenschluß) beschrieben. Dabei wird für die Parameter Unkrautdeckungsgrad, Unkrauttrockenmasse, Anteil der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) und für die Entwicklung der Wuchshöhe des Mais sowie der Unkräuter die Zeitreihe von der ersten Behandlung, die je nach Standort in EC 14 bis EC 17 durchgeführt wurde, bis zum Reihenschluß (EC 35/36) bzw. Beginn Rispenschieben (EC 51) des Mais dargestellt. Zudem sind

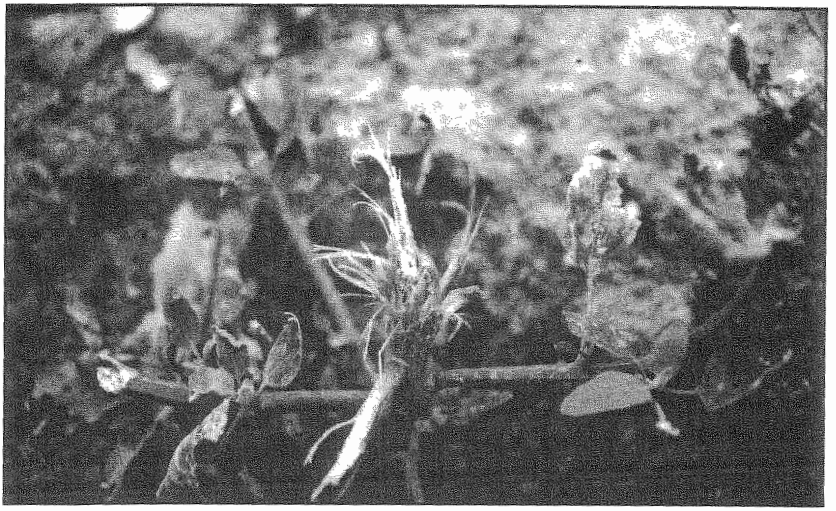


Abb. 88: Aufgespleister Stengel von *Chenopodium album* L.: optimales Ergebnis nach Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgeräts (RWM) mit abschlegelnden Werkzeugen bei 20 mm Abtrennhöhe

in der jeweiligen Abbildung die ermittelten Werte dieser Parameter zum Zeitpunkt „vor der Ernte" integriert, damit der nachhaltige Erfolg über die gesamte Vegetationsperiode sichtbar wird. Danach werden die Ergebnisse der Regulierungserfolge aller Standorte zusammengefaßt und die Maiserträge der einzelnen Standorte sowie die über alle Standorte verrechneten relativen Maiserträge vorgestellt.

5.2.1.1 Standort Dürnast

Auf dem Standort Dürnast wurde der Einsatz des Reihenmulchgerätes unter Mulchsaatbedingungen getestet. Die Verunkrautung bestand vorwiegend aus *Rumex obtusifolius* L. (RUMOB) und *Atriplex patula* L. (ATXPA). Wie Abbildung 89 zeigt, konnte der Unkrautdeckungsgrad, der bei der ersten Behandlung knapp 52 % erreichte, durch das Abmulchen der Unkräuter im Zwischenreihenbereich (ohne Schlepperspur) im Durchschnitt um 53 % gesenkt werden. Im Bereich der Schlepperspur wurde der Unkrautdeckungsgrad sogar um 60 % vermindert.

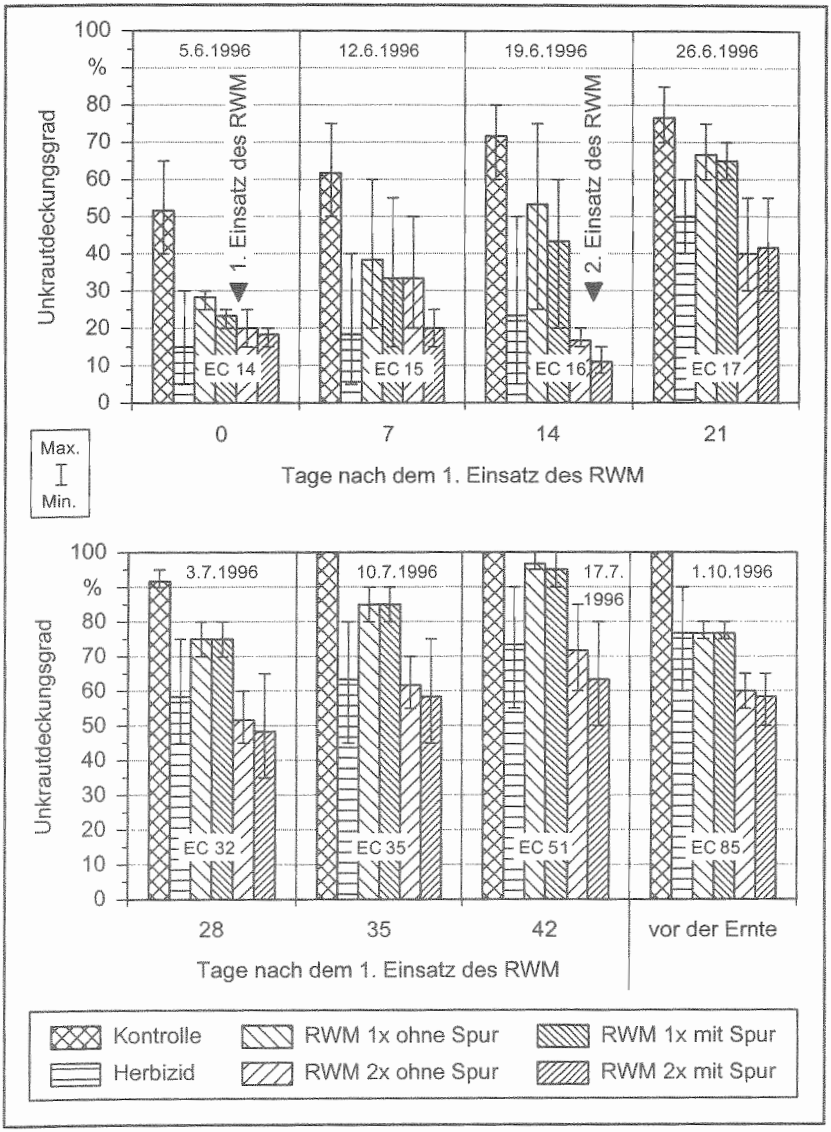


Abb. 89: Standort Dürnast: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

Die zweite Behandlung reduzierte den Unkrautdeckungsgrad, der nach vierzehn Tagen erneut auf 53 % angestiegen war, um 50 % bzw. um 59 % im Bereich der Schlepperspur. Die Kontrollvariante wies zu diesem Zeitpunkt einen Unkrautdeckungsgrad von 72 % auf. Beim Reihenschluß (EC 35) des Mais betrug der Unkrautdeckungsgrad der Kontrolle 100 % und der Herbizidvariante 63 %. Dies verdeutlicht den großen Unkrautdruck insbesondere durch *Rumex obtusifolius* L., der selbst durch einen einmaligen Herbizideinsatz nicht optimal bekämpft werden konnte. Die Variante RWM 1x besaß einen Unkrautdeckungsgrad von 85 %, während hingegen die Variante RWM 2x im Mittel mit 60 % Unkrautdeckungsgrad genauso gut wie die Herbizidbehandlung abschnitt. Die Bonitur kurz vor der Ernte zeigte, daß die Variante RWM 2x mit etwa 60 % Unkrautdeckungsgrad den niedrigsten Wert aufwies.

Hinsichtlich der Unkrauttrockenmasse konnte der vor dem ersten Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes ermittelte Wert von 65 g TM/m² im Bereich ohne Schlepperspur im Durchschnitt um 56 % und im Bereich mit Spur um 70 % reduziert werden (Abbildung 90). Die zweite Behandlung konnte die Unkrauttrockenmasse, die das Ausgangsniveau wieder erreicht hatte, um 46 % bis 60 % reduzieren. Zum Zeitpunkt des Reihenschlusses (EC 35) sowie in EC 85 erreichte die Variante RWM 2x analog der Ermittlung des Unkrautdeckungsgrades die niedrigsten Werte.

Abbildung 91 zeigt den Anteil der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad UKDG über den gesamten Beobachtungszeitraum. In der Kontrollvariante wurde das Artenspektrum durch *Atriplex patula* L. mit ca. 30 % des UKDG und durch *Rumex obtusifolius* L. mit guten 40 % des UKDG bestimmt. Bis zur Ernte stieg der Anteil an *Rumex obtusifolius* L. auf 60 % zu Lasten der anderen Unkräuter an. In der Herbizidvariante dominierte ebenfalls *Rumex obtusifolius* L., dessen Anteil von anfänglich 43 % auf 58 % bis zum Reihenschluß des Mais zunahm. Zudem waren die Herbizidparzellen durch einen hohen Anteil an *Poa annua* L. mit ca. 40 % gekennzeichnet. Der Anteil des Ausfallgetreides (KKKGY) nahm innerhalb der Vegetationsperiode kontinuierlich ab und wurde bis zur Ernte vollständig durch *Atriplex patula* L. abgelöst.

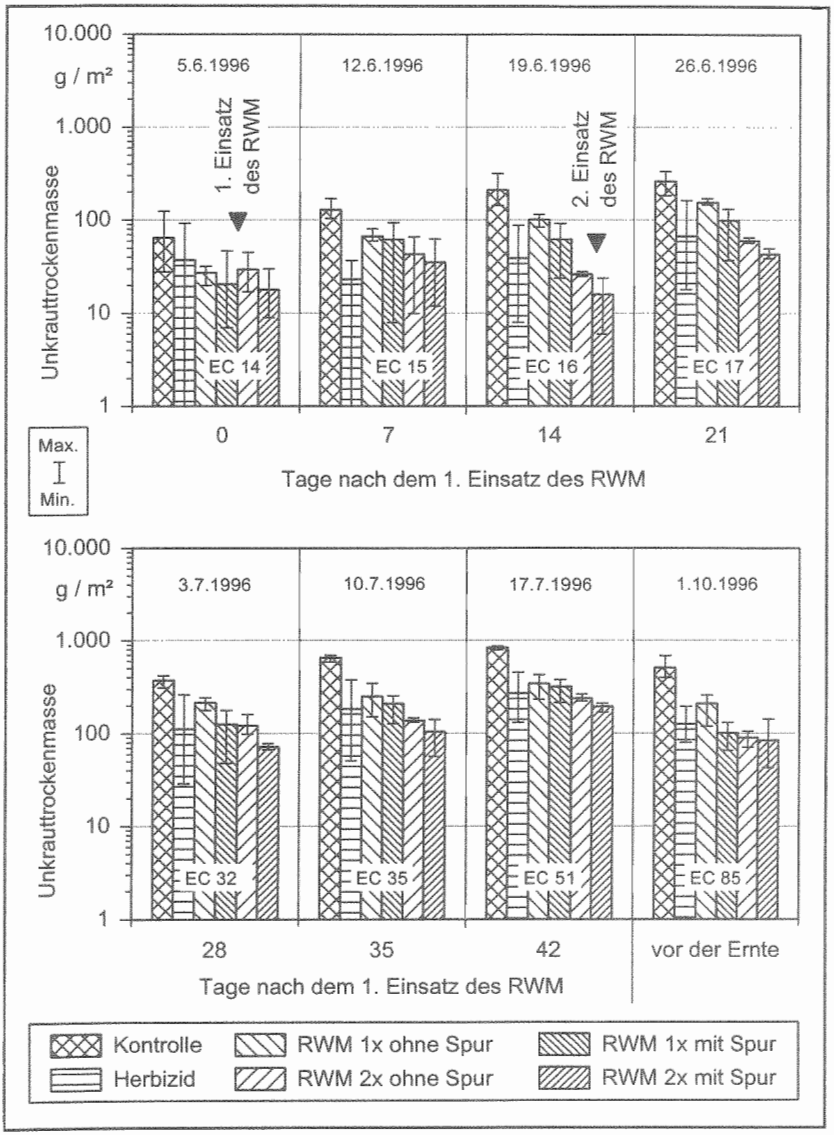


Abb. 90: Standort Dürnast: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

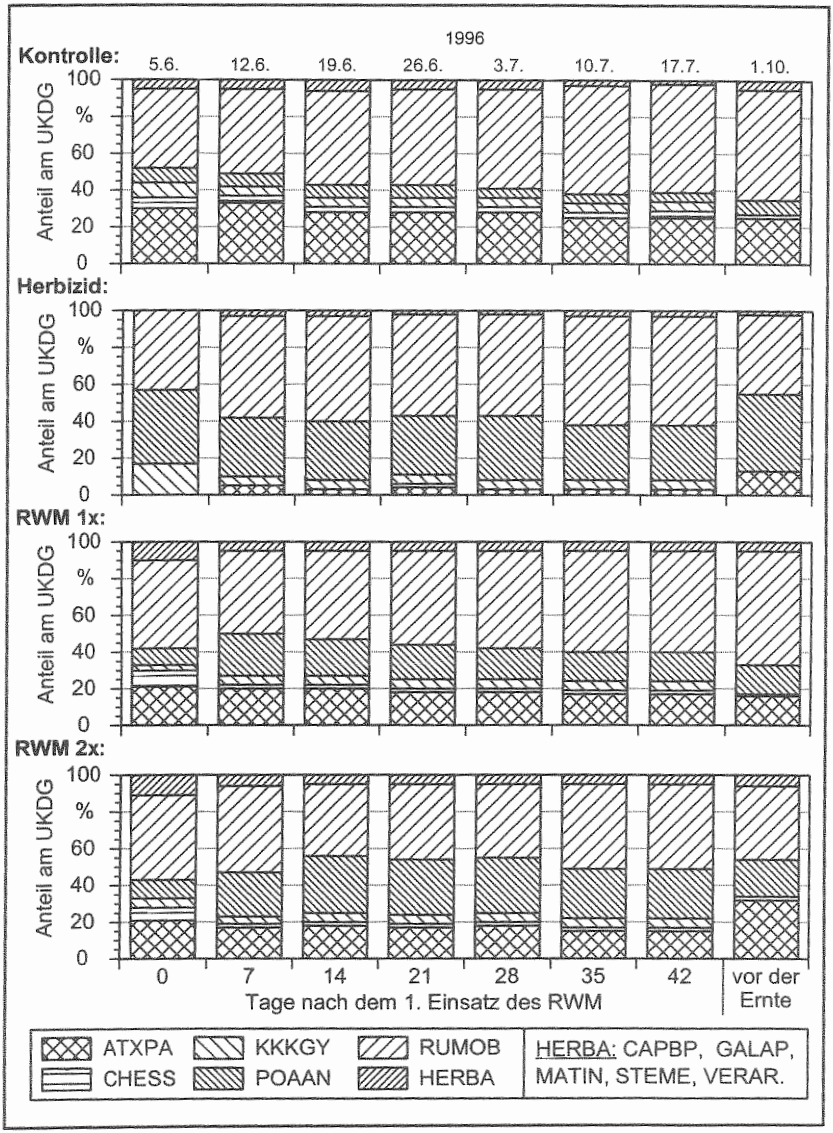


Abb. 91: Standort Dürnast: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

Die Varianten RWM 1x und RWM 2x zeichneten sich im Gegensatz zur Herbizidvariante durch einen etwas höheren Anteil an HERBA aus. Der einmalige Einsatz des Reihenmulchgerätes (RWM 1x) reichte nicht aus, um den Anteil von *Rumex obtusifolius* L. zu senken. Nur mit der Variante RWM 2x konnte der Anteil an *Rumex obtusifolius* L. bei 40 % bis 45 % gehalten werden. Zudem trat in der Variante RWM 2x *Poa annua* L. mit bis zu 25 % des UKDG stärker auf als in der Variante RWM 1x. Der Anteil an *Atriplex patula* L. lag durchgehend bei etwa 20 % und stieg nur in der Variante RWM 2x kurz vor der Ernte auf 32 % des UKDG an.

Hinsichtlich der Entwicklung der Wuchshöhe des Mais konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten Herbizid und RWM 2x festgestellt werden (Abbildung 92). Die Variante RWM 1x blieb ab EC 42 etwas zurück und erreichte eine 10 cm geringere Wuchshöhe. Die im Zwischenreihenbereich unbehandelte Kontrolle erreichte mit 210 cm eine 30 cm geringere Wuchshöhe. Entsprechend verhielt sich die Wuchshöhe der Unkräuter. In der Kontrollparzelle überschritt der Unkrautbestand die Höhe von 1 m. Zum Zeitpunkt des Reihenschlusses hatten die Unkräuter

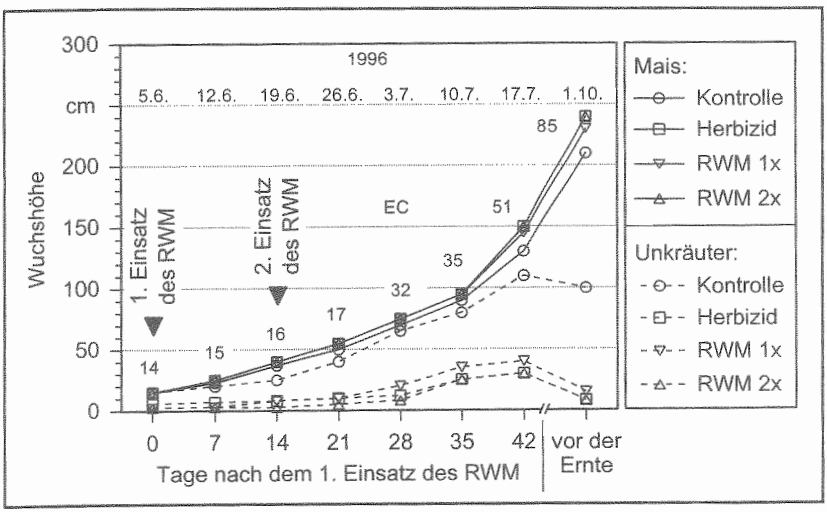


Abb. 92: Standort Dürnast: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter

in den Varianten Herbizid und RWM 2x eine Wuchshöhe von 25 cm und in der Variante RWM 1x betrug die Wuchshöhe 35 cm.

In Abbildung 93 sind die Regulierungserfolge für den Unkrautdeckungsgrad und die Unkrauttrockenmasse gegenübergestellt. Die Herbizidvariante erzielte für den Parameter Unkrautdeckungsgrad den höchsten Regulierungserfolg von 71 % nach der Behandlung bzw. von 38 % zum Reihenschluß (EC 35/36). Die Variante RWM 2x erreichte mit etwa 60 % bis 65 % bzw. 38 % bis 42 % in EC 35/36 nahezu die Werte der Herbizidvariante. Hinsichtlich der Unkrauttrockenmasse zeigte sich jedoch ein anderes Bild. Hier wurden direkt nach der Behandlung bei den Varianten RWM 1x und RWM 2x Werte von 54 % bis 72 % erzielt. Im Gegensatz dazu lag der Regulierungserfolg der Herbizidvariante nur bei 43 %.

Zum Reihenschluß erreichte die Herbizidvariante im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle einen Regulierungserfolg von 72 %. Die Variante RWM 1x konnte mit 62 % bis 68 % das Niveau der Herbizidvariante nicht realisieren. Die Variante RWM 2x schnitt mit 79 % bis 84 % Regulierungserfolg bei der aufgewachsenen Unkrauttrockenmasse am besten ab. Zudem war zu beobachten, daß bei den Varianten RWM im Bereich der Schlepperspuren der Regulierungserfolg tendenziell um einige Prozentpunkte höher ausfiel.

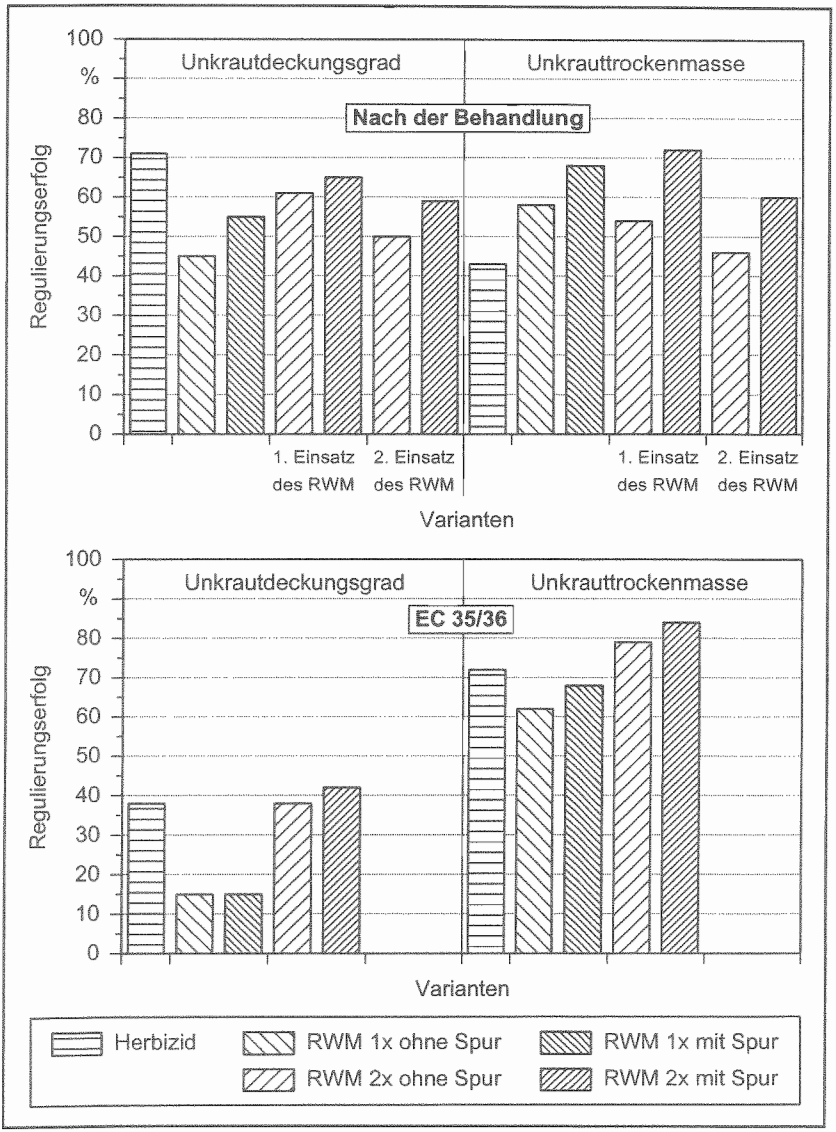


Abb. 93: Standort Dürnast: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36)

5.2.1.2 Standort Freising-Süd

Der Standort Freising-Süd wies zum Zeitpunkt der ersten Behandlung eine höhere Abundanz der Verunkrautung als der Standort Dürnast auf. In den Kontrollparzellen wurde ein Unkrautdeckungsgrad von 83 % ermittelt (Abbildung 94), der vorwiegend durch die Arten *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medicus, *Chenopodium spec.*, *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Rumex obtusifolius* L., *Stellaria media* (L.) Vill., *Tussilago farfara* L. und *Veronica arvensis* L. gekennzeichnet war.

Durch den Einsatz des Reihenmulchgerätes wurde der Unkrautdeckungsgrad je nach Variante auf 5 % bis 10 % UKDG gesenkt. Der Unkrautdeckungsgrad in der Herbizidvariante betrug zu diesem Zeitpunkt 38 %. Nach vierzehn Tagen erreichte der Unkrautdeckungsgrad in den gemulchten Parzellen mit 73 % bis 78 % erneut nahezu die Höhe des Ausgangsniveaus. Die zweite Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (Variante RWM 2x) verringerte den Unkrautdeckungsgrad nur noch auf 21 % bis 25 %. In EC 35 (Reihenschluß des Mais) betrug der Unkrautdeckungsgrad in der Herbizidvariante mit 95 % nur 5 % weniger als in der Kontrollvariante. Die Varianten RWM erzielten deutlich niedrigere Werte. Dabei wies die Variante RWM 1x etwa 83 % UKDG und die Variante RWM 2x 67 % bis 73 % UKDG auf. Kurz vor der Ernte zeigte wiederum die Variante RWM 2x die niedrigsten Werte mit unter 10 % UKDG.

Aus Abbildung 95 geht hervor, daß für den Parameter Unkrauttrockenmasse ähnliche Ergebnisse wie für den Unkrautdeckungsgrad ermittelt wurden. Insbesondere in EC 16 und EC 17 war in den Varianten RWM der Unterschied zwischen den Bereichen mit und ohne Spur des Schleppers groß. Ab EC 32 erzielte die Variante RWM 2x immer den niedrigsten Trockenmasseaufwuchs. Dies hielt bis zur Ernte des Mais an.

Hinsichtlich der Unkrautartenzusammensetzung der untersuchten Varianten gibt Abbildung 96 Aufschluß. In der Kontrolle war *Rumex obtusifolius* L. (RUMOB) mit einem Anteil von 31 % am UKDG zu Beginn bis 55 % in EC 51 (28 Tage nach dem 1. Einsatz des RWM) dominierend. Daneben bestimmte *Veronica arvensis* L.

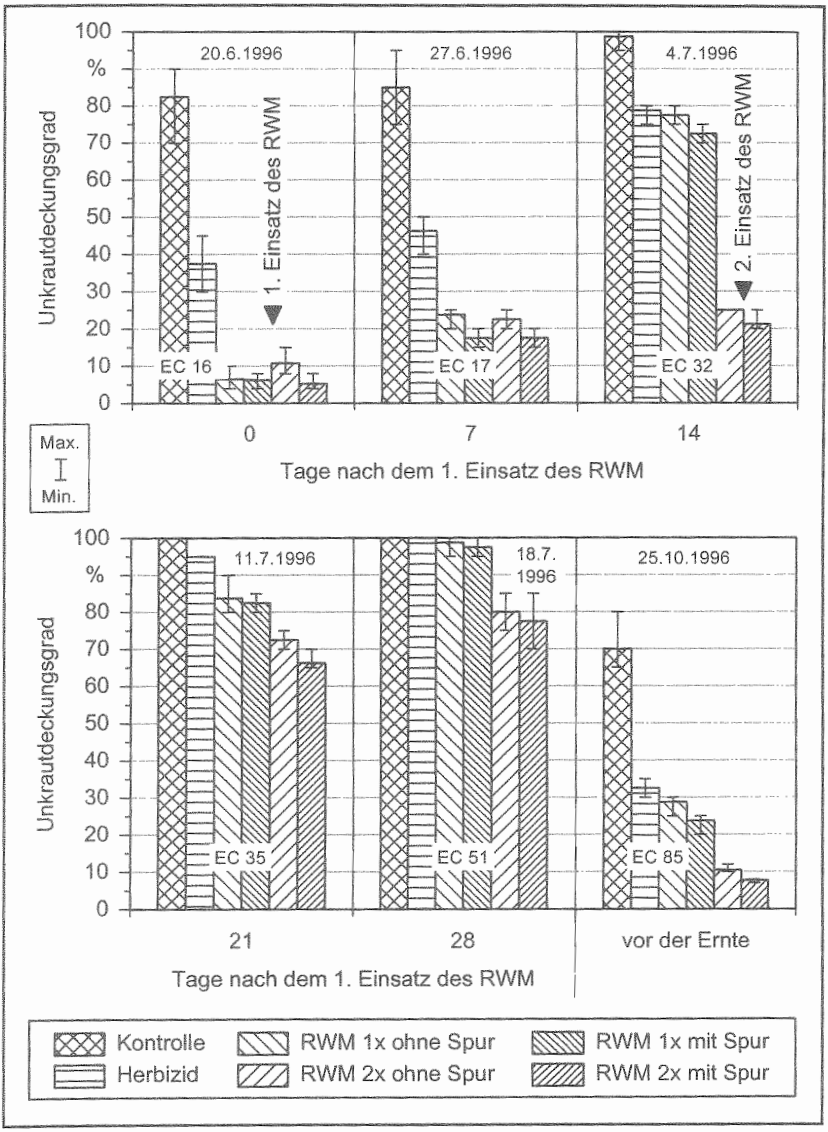


Abb. 94: Standort Freising-Süd: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

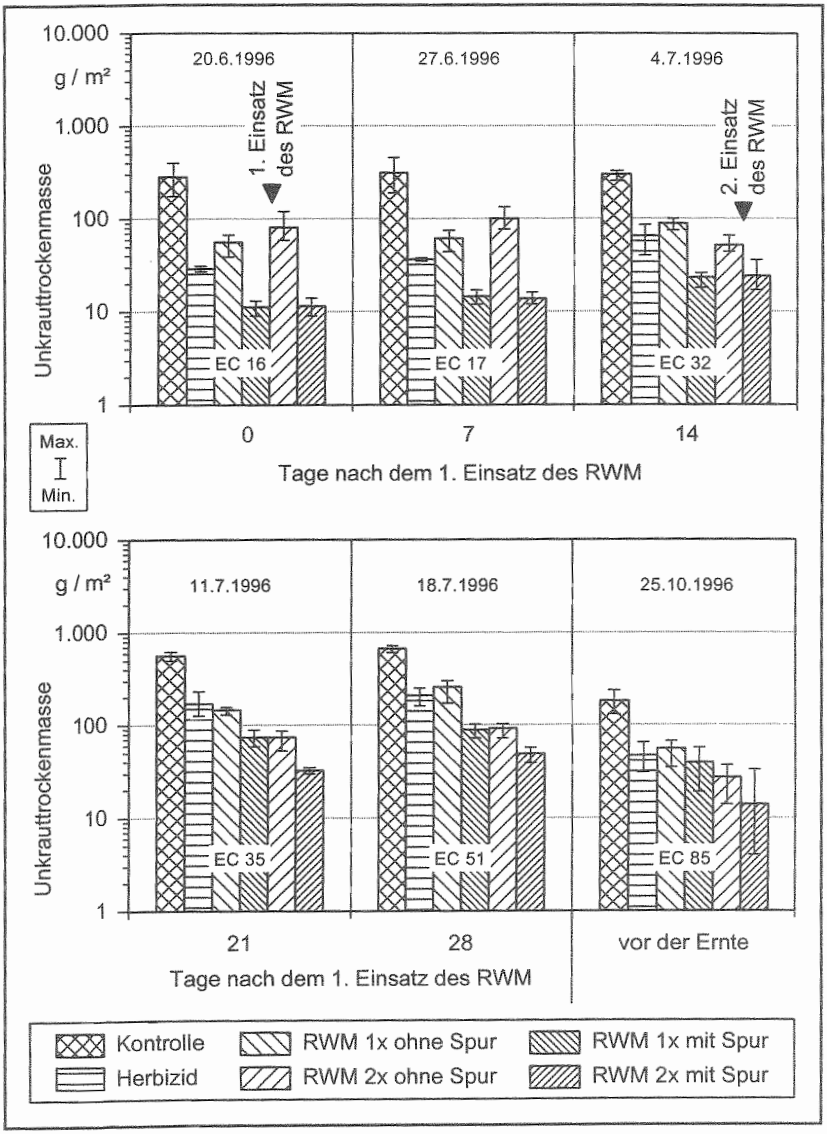


Abb. 95: Standort Freising-Süd: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

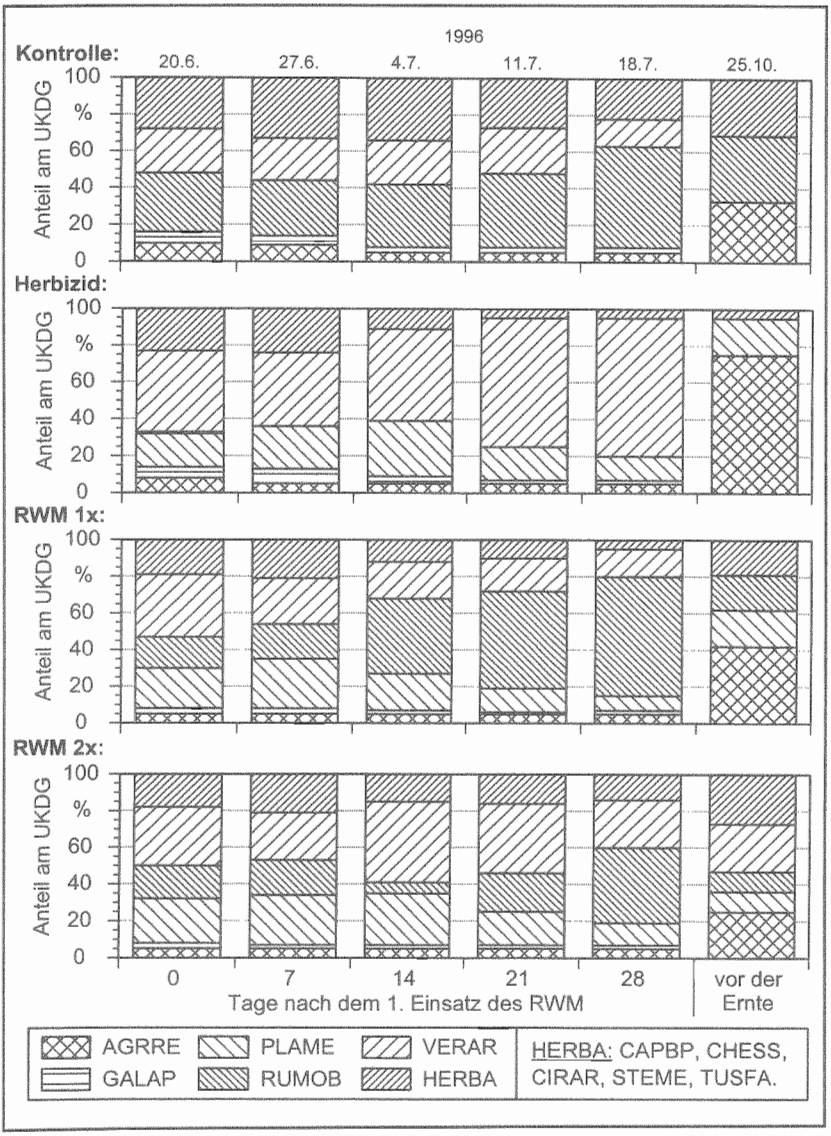


Abb. 96: Standort Freising-Süd: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

mit etwa 25 % Anteil relativ stark das Bild der Verunkrautung. Innerhalb der Gruppe HERBA traten auch Problemunkräuter wie *Cirsium arvense* (L.) Scop. (CIRAR) und *Tussilago farfara* L. (TUSFA) nesterweise stärker auf. Die Nester mit den beiden genannten Problemunkräutern waren gleichmäßig über die gesamte Versuchsfläche verteilt. Zur Ernte des Mais kam *Agropyron repens* (L.) Beauv. (AGRRE) stärker auf.

Die Herbizidvariante war stark geprägt durch *Plantago media* L. (PLAME) mit ca. 20 % bis 30 % Anteil am UKDG und besonders durch *Veronica arvensis* L. (VERAR), dessen Anteil von 45 % auf 75 % anstieg. Auch in der Herbizidvariante war zum Zeitpunkt der Ernte trotz Einsatz des speziellen Gräsermittels Cato (Wirkstoff: Rimsulfuron) eine massive Zunahme von AGRRE mit einem Anteil von 75 % am UKDG zu beobachten.

Die Varianten RWM wiesen eine vielfältigere Verunkrautung auf. Die einmalige Behandlung mit dem Reihenmulchgerät (Variante RWM 1x) konnte die Zunahme von *Rumex obtusifolius* L. (RUMOB) nicht verhindern. Der Anteil von RUMOB stieg von 18 % auf 66 % an. Unmittelbar vor der Ernte wurde die Dominanz von RUMOB nicht mehr festgestellt. Wie in der Herbizidvariante nahm AGRRE in EC 85 mit etwa 40 % einen großen Anteil am UKDG ein. Die Variante RWM 2x konnte durch den zweiten Einsatz des Reihenmulchgerätes den Anteil von *Rumex obtusifolius* L. in der kritischen Phase der Maisentwicklung mit 5 % bis 20 % Anteil am UKDG in Grenzen halten. Dadurch wurde *Veronica arvensis* L., das einen Anteil von 25 % bis 45 % einnahm, stärker gefördert. Auch in den Parzellen der Variante RWM 2x wurde zur Ernte ein stärkeres Auftreten von *Agropyron repens* (L.) Beauv. beobachtet, das jedoch im Vergleich zu den anderen Varianten der Unkrautregulierung mit 25 % Anteil am UKDG den niedrigsten Wert aufwies.

Hinsichtlich des Maiswachstums wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten Herbizid und RWM 2x festgestellt (Abbildung 97). Der Mais wies in beiden Varianten eine Wuchshöhe von 300 cm auf. In der Variante RWM 2x wurde ab EC 35 (Reihenschluß) sogar eine 8 cm niedrigere Wuchshöhe der Unkräuter und Ungräser ermittelt. Die Variante RWM 1x erreichte mit 290 cm Wuchshöhe die Maiswuchshöhe der Herbizidvariante nicht ganz, da die Wuchshöhe der Unkräuter

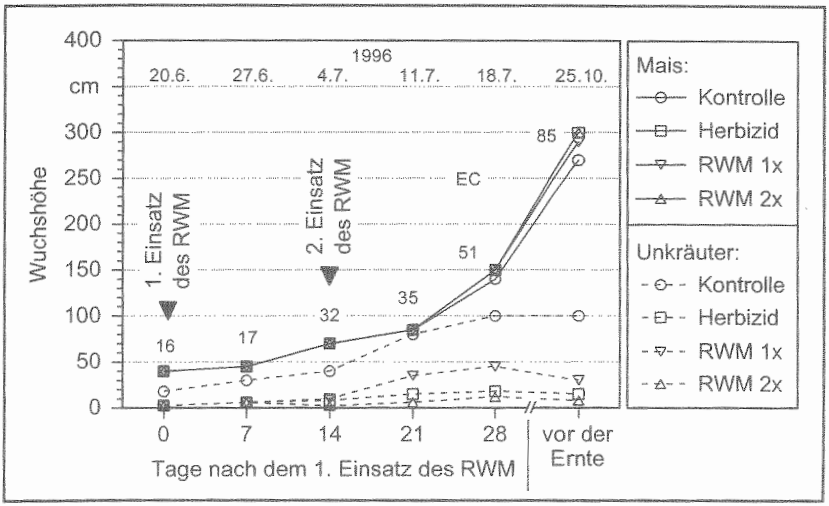


Abb. 97: Standort Freising-Süd: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter

bereits zum Zeitpunkt des Reihenschlusses 35 cm betrug. Die Kontrolle fiel mit einer Endwuchshöhe von 270 cm bei einem Unkrautaufwuchs, der auf eine Höhe von 100 cm angewachsen war, deutlich ab.

Der Regulierungserfolg für den Parameter Unkrautdeckungsgrad lag bei der Herbizidvariante zu Beginn nur bei 55 % und sank zum Reihenschluß (EC 35/36) durch die starke Ausbreitung von *Veronica arvensis* L. auf 5 % ab (Abbildung 98). Dagegen zeigten die Varianten RWM nach der Behandlung sehr gute Regulierungserfolge in Höhe von 87 % bis 94 %. Der zweite Einsatz des Reihenmulchers fiel auf etwa 70 % Regulierungserfolg ab. Der Regulierungserfolg hinsichtlich des Unkrautdeckungsgrades war in EC 35/36 mit 16 % bis 34 % deutlich reduziert. Für den Parameter Unkrauttrockenmasse waren die prozentualen Regulierungserfolge deutlich besser. Die Herbizidvariante erzielte nach der Behandlung 90 % und in EC 35/36 70 %. Innerhalb der Varianten RWM waren in den Bereichen mit Spur zum Teil wesentlich höhere Regulierungserfolge zu verbuchen. Der Regulierungserfolg nach der Behandlung reichte von 72 % bis 96 % und zum Reihenschluß 74 % bis 94 % und übertraf somit das Ergebnis der Herbizidvariante von 70 % in EC 35/36.

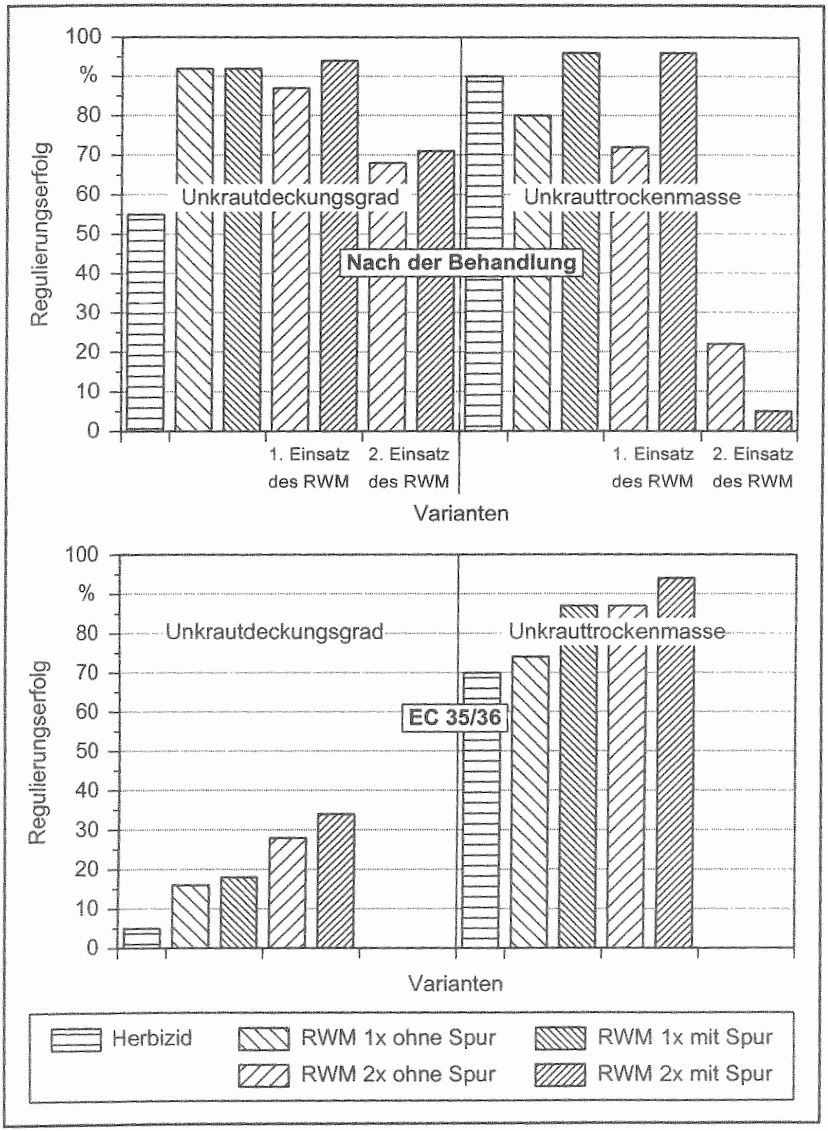


Abb. 98: Standort Freising-Süd: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36)

5.2.1.3 Standort Eittingermoos

Durch den dunkelbraunen bis schwarzen Boden waren auf dem anmoorigen Standort Eittingermoos besonders die wärmeliebenden und konkurrenzstarken Unkrautarten wie *Amaranthus retroflexus* L. (AMARE) und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (ECHCR) in hoher Abundanz zu finden. Der erste Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes erfolgte in EC 14 bei einem mittleren Unkrautdeckungsgrad (UKDG) von 55 %. Durch das Abschlegeln der Unkräuter konnte der UKDG auf 20 % bis 23 % abgesenkt werden (Abbildung 99). Der ganzflächige Herbizideinsatz drückte den UKDG auf 2 %. Vierzehn Tage nach der ersten Behandlung (EC 17) mit dem Reihenmulcher war der UKDG erneut auf das Ausgangsniveau von etwa 50 % angestiegen (Variante RWM 1x). Die Kontrollvariante wies zu diesem Zeitpunkt bereits einen UKDG von 93 % auf. Mit dem zweiten Einsatz des Reihenmulchers wurde der UKDG auf 9 % reduziert. Dies entsprach dem Niveau der Herbizidvariante.

Zum Reihenschluß des Mais (EC 36) betrug der UKDG in der Kontrollvariante 98 %, in der Variante RWM 1x 68 % bis 74 % und in der Variante RWM 2x 29 % bis 35 %. Die Herbizidvariante wies mit 11 % UKDG den niedrigsten Wert auf. In EC 85 verschob sich die Reihenfolge, so daß die Variante RWM 2x mit 14 % bis 18 % vor der Herbizidvariante mit 25 % den kleinsten Unkrautdeckungsgrad hatte.

Die Entwicklung der Unkrauttrockenmasse der einzelnen Prüfvarianten verlief ähnlich wie die Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades (Abbildung 100). Zu Beginn des Untersuchungszeitraumes wurde die unterschiedliche Auswirkung des Einsatzes des Mulchers auf die Bereiche mit und ohne Spur deutlicher. Hierbei konnte der Massenaufwuchs der Unkräuter im Bereich der Schlepperspur stärker reduziert werden. Im Gegensatz zur Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades wies die Variante RWM 2x bereits ab EC 32 bis hin zur Ernte die niedrigsten Werte auf.

Abbildung 101 zeigt die Auswirkungen der unterschiedlichen Behandlungen auf das Unkrautartenspektrum. In der Kontrollvariante dominierte neben AMARE mit etwa 30 % Anteil ECHCR mit 50 % bis 55 % Anteil am UKDG. Zum Zeitpunkt der

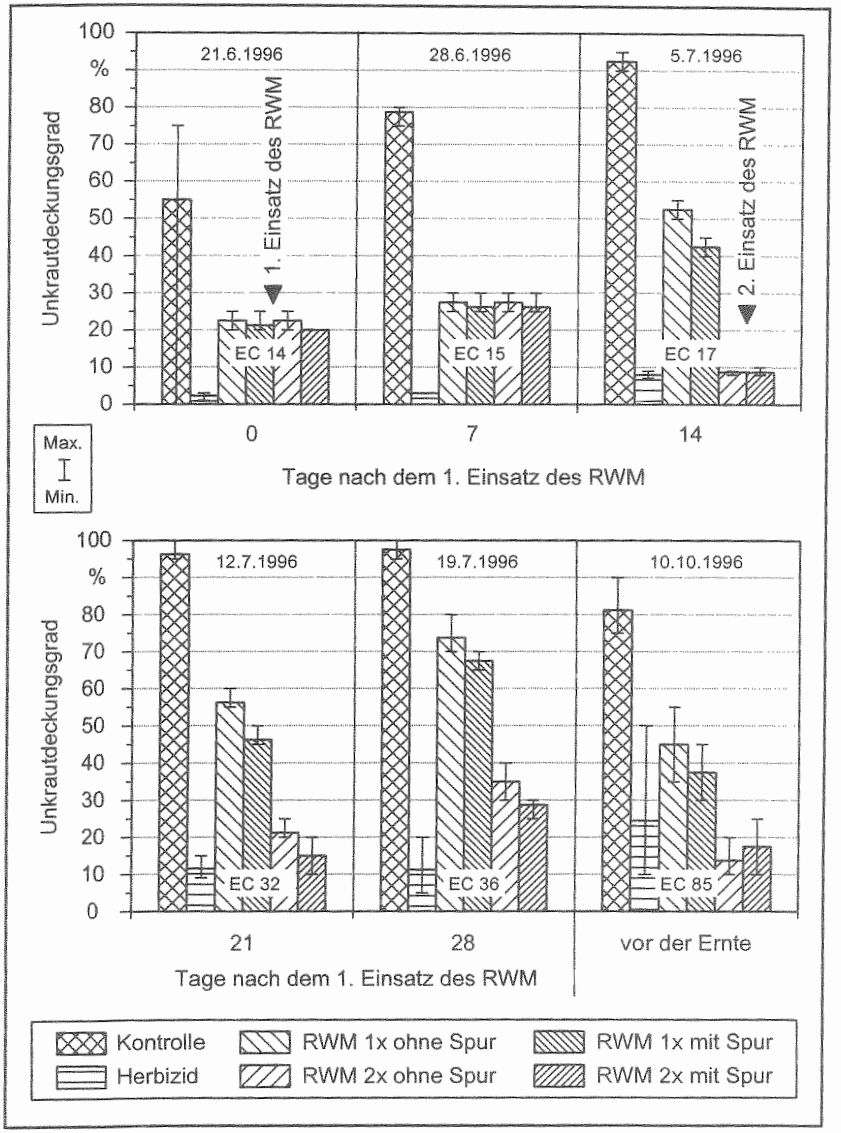


Abb. 99: Standort Eittingermoos: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

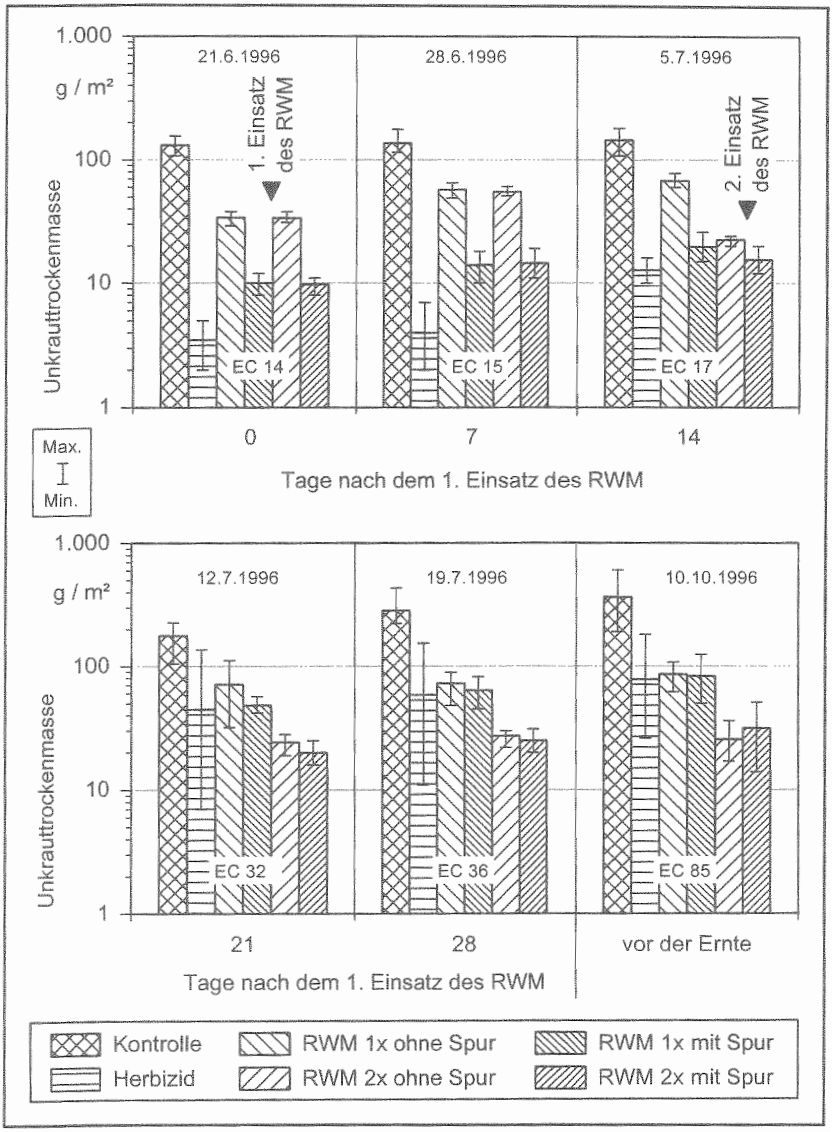


Abb. 100: Standort Eittingermoos: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

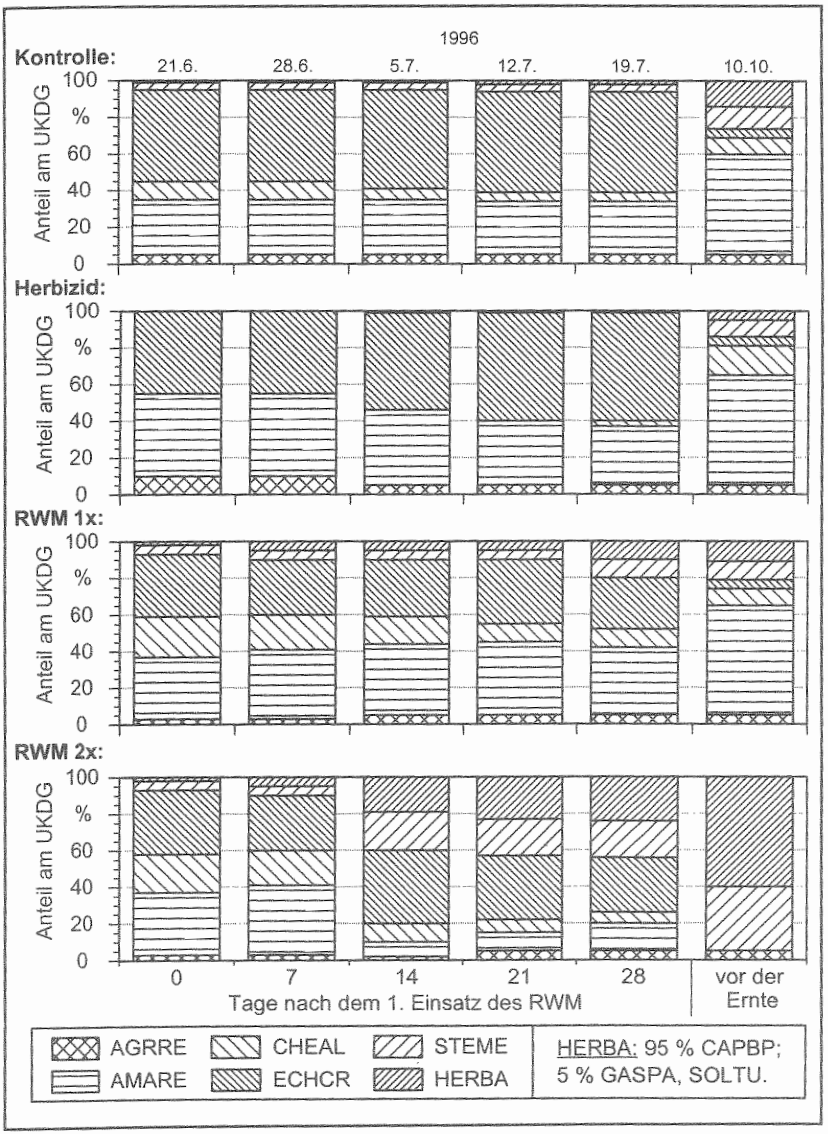


Abb. 101: Standort Eittingermoos: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

Ernte war das Bild geprägt durch AMARE (55 % Anteil) und die niedrigwachsenden Arten wie *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medicus (CAPBP) und *Stellaria media* (L.) Vill. (STEME). Mit dem ganzflächigen Herbizideinsatz wurde der Anteil von AMARE bis zum Reihenschluß von 45 % auf 33 % Anteil am UKDG gesenkt. Der Anteil von ECHCR stieg aufgrund der Nachkeimer von 45 % auf nahezu 60 % des UKDG. In EC 85 war die Artenzusammensetzung ähnlich wie in der Kontrollvariante mit einer starken Dominanz von AMARE (60 % Anteil am UKDG).

In den Varianten RWM trat neben den Hauptunkräutern AMARE und ECHCR mit je 35 % Anteil besonders *Chenopodium album* L. (CHEAL) mit etwa 20 % am UKDG auf. Bis zum Reihenschluß des Mais änderte sich in der Variante RWM 1x die Unkrautartenzusammensetzung kaum. Kurz vor dem Reihenschluß stieg der Anteil von *Stellaria media* (L.) Vill. (STEME) und HERBA zu Lasten von ECHCR und CHEAL an. Zum Zeitpunkt der Ernte unterschied sich das Artenspektrum der Variante RWM 1x kaum von der Herbizidvariante. Der zweimalige Einsatz des Reihenmulchers veränderte das Bild deutlich. Nach dem zweiten Einsatz des Mulchers stieg der Anteil an STEME und HERBA auf je etwa 20 % am UKDG an. Der Anteil von AMARE und CHEAL reduzierte sich im Gegenzug auf einen gemeinsamen Anteil von 20 % am UKDG. Bis EC 36 verringerte sich der Anteil von ECHCR von 40 % auf unter 30 %. Im Gegensatz zu den anderen Varianten traten in der Variante RWM 2x vor der Maisernte die Hauptunkrautarten AMARE und ECHCR nicht mehr auf. Die Verunkrautung bestand vorwiegend aus den kriechenden Arten *Stellaria media* (L.) Vill. mit 33 % und *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medicus mit etwa 60 % Anteil am UKDG.

Durch den hohen Unkrautdruck der konkurrenzstarken Arten ECHCR und AMARE sowie CHEAL wurde bereits ab EC 15 in der unbehandelten Kontrolle das Maiswachstum beeinträchtigt, so daß der Mais in der Kontrollvariante (Abbildung 102) im Vergleich zur Variante Herbizid um 30 cm kleiner blieb. Die Variante RWM 1x fiel ab EC 36 zurück und erreichte eine 15 cm geringere Wuchshöhe im Vergleich zur ganzflächigen Herbizidbehandlung. Die Varianten Herbizid und RWM 2x unterschieden sich hinsichtlich des Maiswachstums zu keiner Zeit. Analog dazu waren die Beobachtungen bei der Unkrautwuchshöhe.

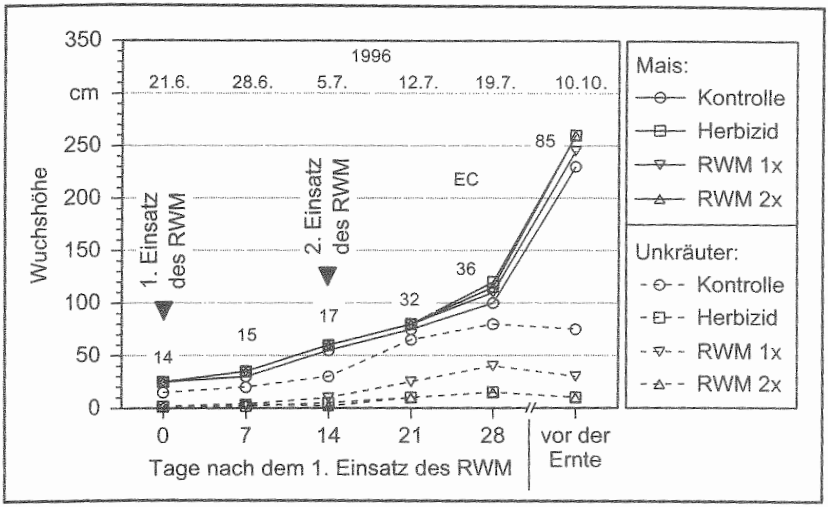


Abb. 102: Standort Eittingermoos: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Herbizidvariante für den Parameter Unkrautdeckungsgrad sowohl direkt nach der Behandlung als auch in EC 35/36 mit 96 % bzw. 88 % den höchsten Regulierungserfolg erzielte (Abbildung 103). Die Varianten RWM erreichten hinsichtlich des Unkrautdeckungsgrades Regulierungserfolge von etwa 60 % beim ersten Einsatz des Reihenmulchers und 79 % bis 84 % beim zweiten Einsatz. Der nachhaltige Regulierungserfolg zum Zeitpunkt des Reihenschlusses war nur in der Variante RWM 2x mit 78 % bis 84 % ausreichend. Die Variante RWM 1x kam auf 42 % bis 52 %.

Hinsichtlich des Regulierungserfolges der aufgewachsenen Unkrauttrockenmasse schnitt direkt nach der Behandlung wiederum die Herbizidvariante mit 97 % am besten ab. Mit 74 % bis 93 % war der Regulierungserfolg der Varianten RWM für die Unkrauttrockenmasse höher als für den Unkrautdeckungsgrad. In EC 35/36 wies die Variante RWM 2x mit 86 % bis 89 % höhere Werte als die Herbizidvariante mit 75 % auf. Die Variante RWM 1x lag bei 60 % bis 73 % Regulierungserfolg. In der Regel konnte bei den Varianten RWM im Bereich mit Spur ein deutlich höherer Regulierungserfolg erzielt werden.

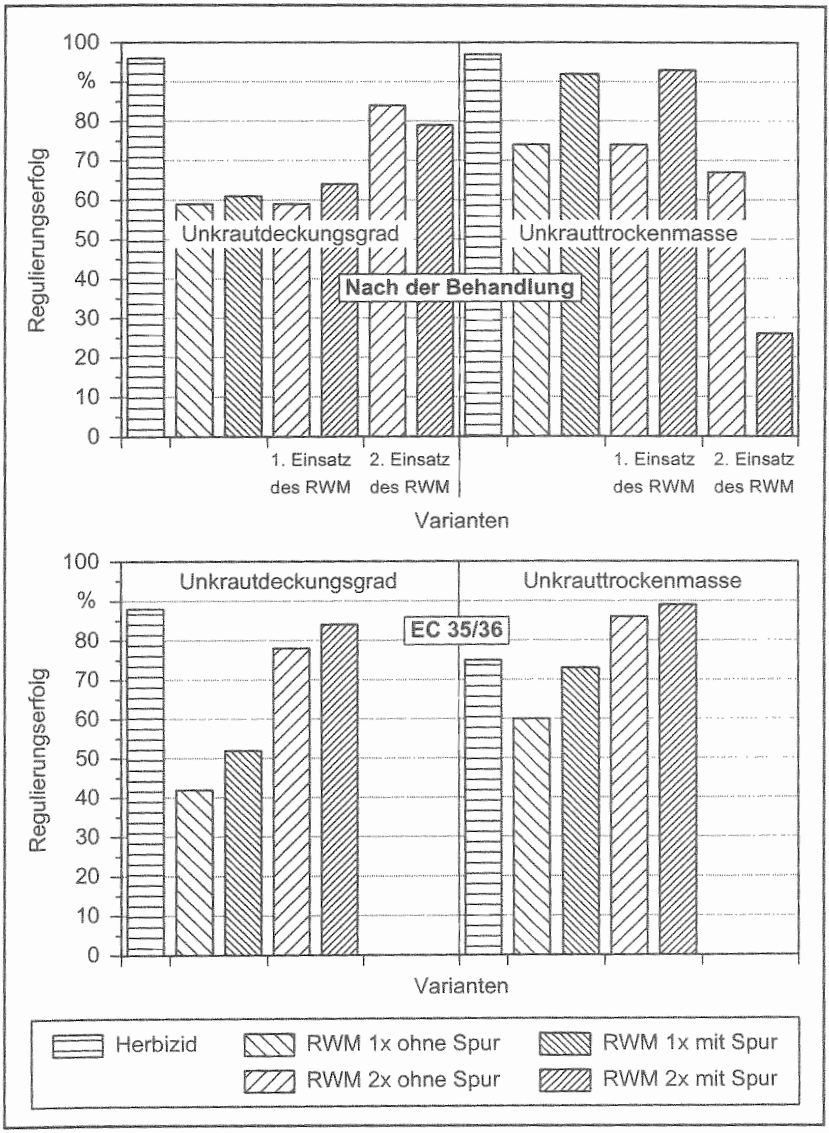


Abb. 103: Standort Eittingermoos: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36)

5.2.1.4 Standort Großenviecht

Die Untersuchungen auf dem erosionsgefährdeten Lößlehm-Standort Großenviecht im tertiären Hügelland, dessen Verunkrautung vorwiegend durch die Spezies *Chenopodium album* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. und *Galinsoga parviflora* Cav. gekennzeichnet war, zeigten, daß durch den Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes der Unkrautdeckungsgrad (UKDG) deutlich reduziert werden konnte (Abbildung 104). In den Varianten RWM wurde der UKDG von 73 % (Kontrolle) auf 11 % bis 15 % gesenkt. Die Herbizidvariante wies in EC 17 nur 1 % Unkrautdeckungsgrad auf.

Nach vierzehn Tagen erreichte der UKDG in den Varianten RWM etwa 50 %. Die zweite Behandlung mit dem Reihenmulcher reduzierte diesen UKDG auf 8 %. In der Kontrollvariante betrug der UKDG bereits 89 %. Die Herbizidvariante hatte weiterhin einen sehr geringen UKDG von 2 %, der bis zur Ernte hin nur unwesentlich auf 4 % anstieg. Nach dem Reihenschluß ab EC 36 blieb der UKDG in der Variante RWM 1x nahezu unverändert bei 45 % bis 50 %. Der UKDG der Variante RWM 2x stieg nach dem zweiten Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchers von 8 % auf ca. 20 % UKDG kurz vor der Maisernte an.

Abbildung 105 zeigt, daß hinsichtlich der Unkrauttrockenmasse die zeitliche Entwicklung fast genauso wie für den Unkrautdeckungsgrad verlief. Die Differenzierung der Varianten RWM 1x und RWM 2x ab EC 36 wurde für die Unkrauttrockenmasse nicht so deutlich wie beim Unkrautdeckungsgrad beobachtet. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Schlepperspuren. Hier lag das Niveau der Variante RWM 1x auf der gleichen Höhe wie in der Variante RWM 2x. Im Bereich ohne Spur wurde durch den zweimaligen Einsatz des Reihenmulchers eine deutliche Reduzierung der Unkrauttrockenmasse gegenüber der Variante RWM 1x erzielt. Die Herbizidvariante wies zu jeder Zeit die niedrigsten Werte für die aufgewachsene Unkrautmasse auf.

Das Artenspektrum der Kontrolle wurde vorwiegend bestimmt durch *Chenopodium album* L. (CHEAL) mit 55 % und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. (ECHCR) mit 30 % Anteil am UKDG (Abbildung 106). Daneben kamen die Unkräuter *Galinsoga*

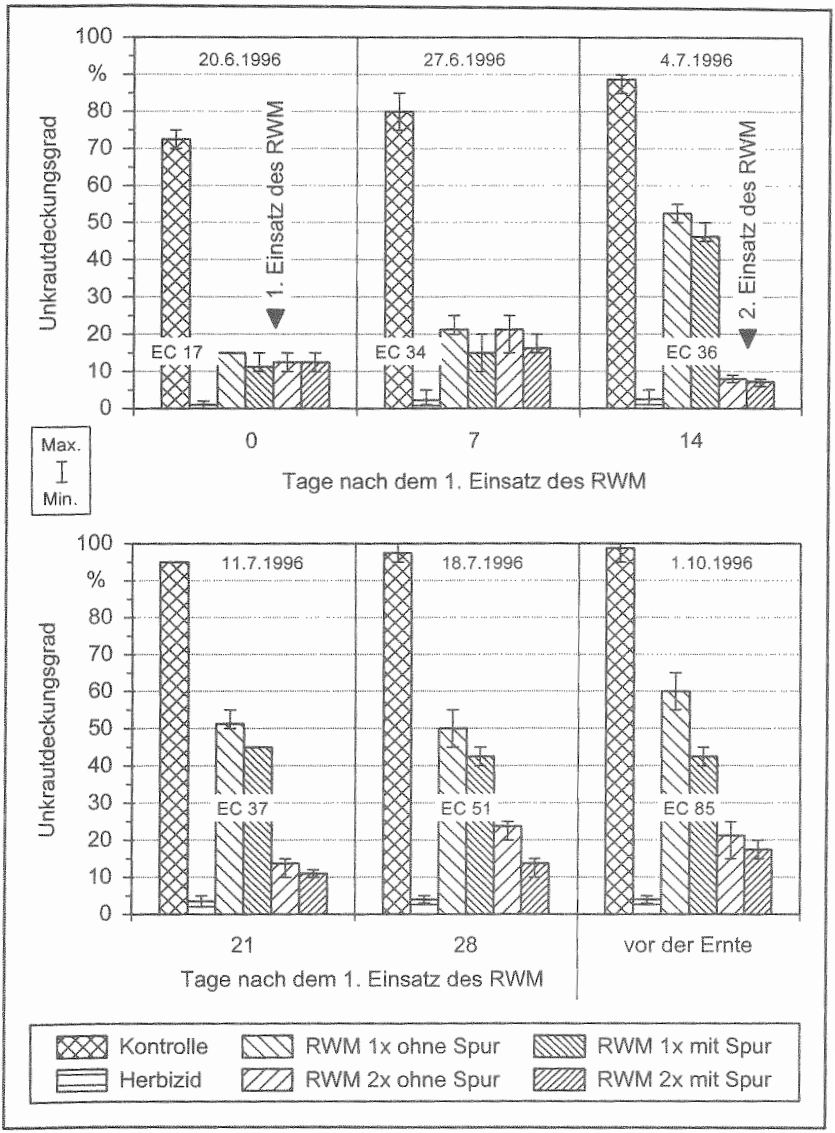


Abb. 104: Standort Großenviecht: Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

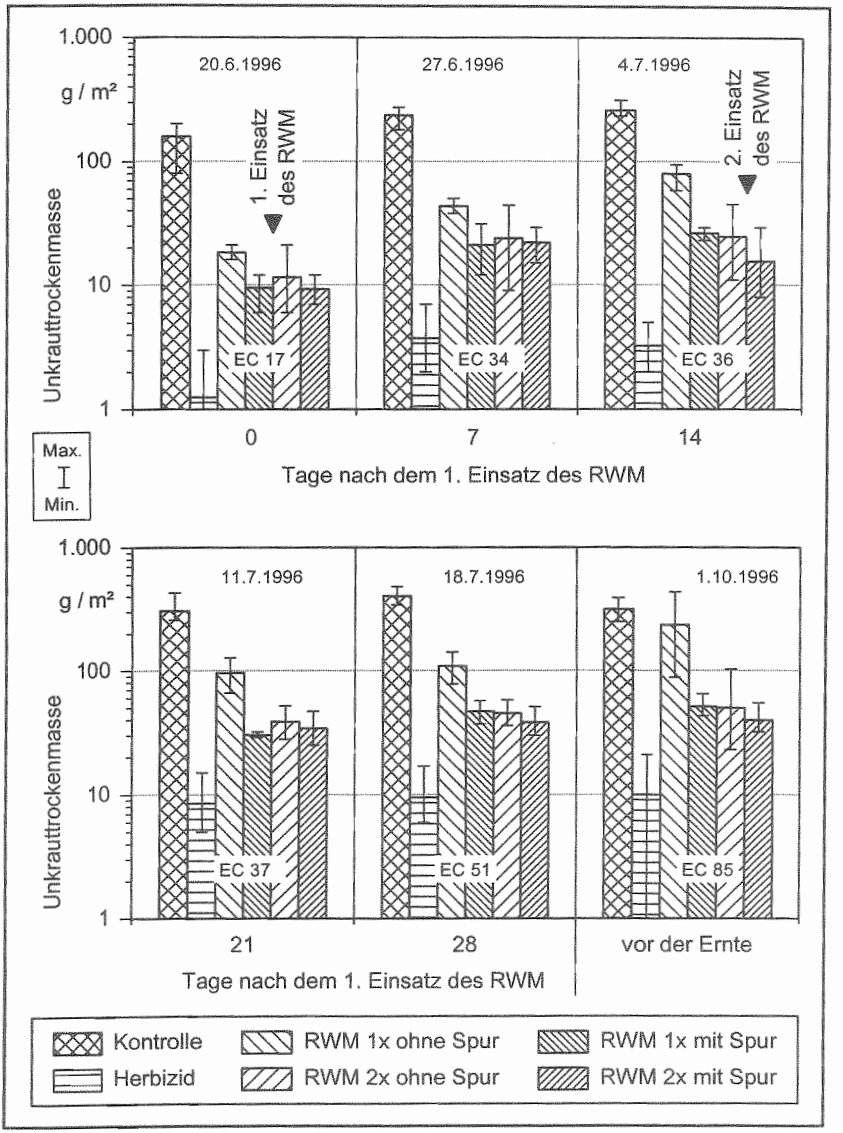


Abb. 105: Standort Großenviecht: Entwicklung der Unkrauttrockenmasse in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

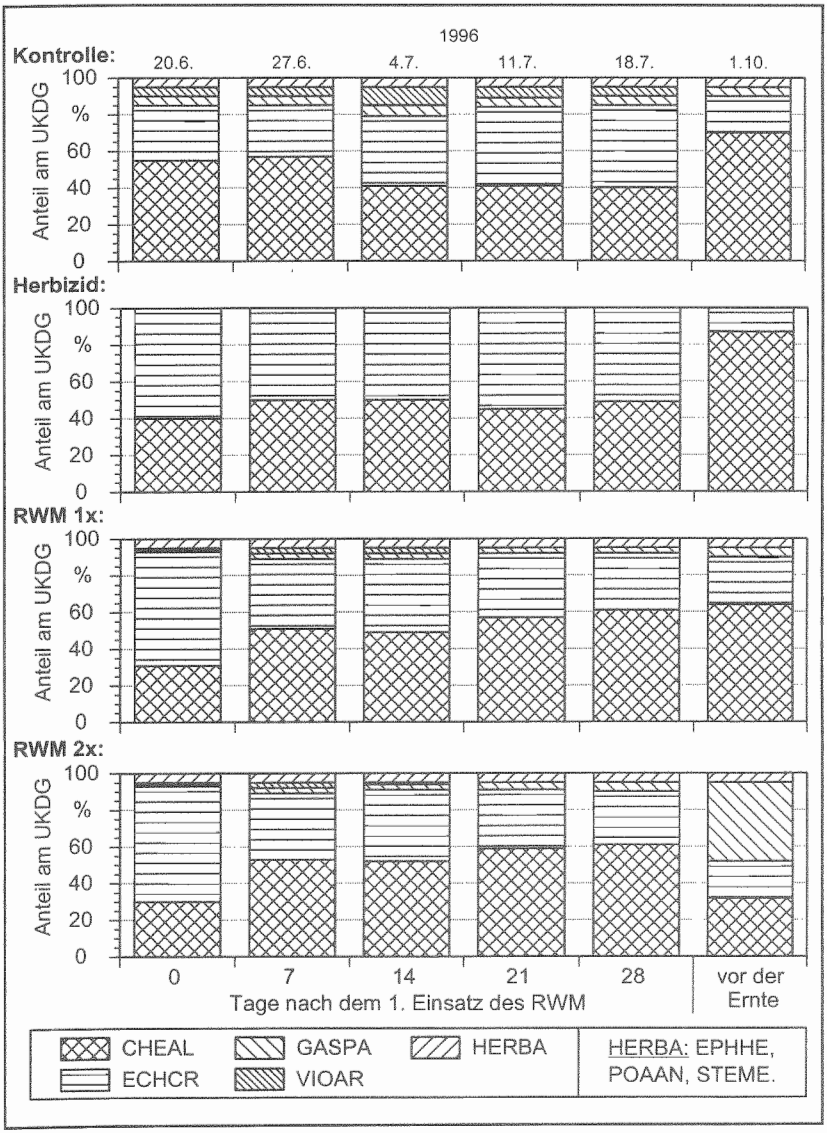


Abb. 106: Standort Großenviecht: Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten am Unkrautdeckungsgrad (UKDG) in der Kultur Mais (*Zea mays* L.)

parviflora Cav. (GASPA) und *Viola arvensis* Murray (VIOAR) mit je 5 % des UKDG vor. Der Anteil an HERBA betrug ebenfalls 5 %. Im Verlauf des Untersuchungszeitraumes blieb der Anteil von GASPA, VIOAR und HERBA mit insgesamt 15 % bis 20 % konstant. Zum Zeitpunkt der Ernte wurden keine Individuen von VIOAR mehr gezählt, da sie bereits abgestorben waren. Ab dem Reihenschluß, der vierzehn Tage nach dem ersten Einsatz des Reihenmulchers erfolgte, war das Verhältnis der beiden dominierenden Spezies CHEAL und ECHCR mit je 40 % Anteil am UKDG ausgeglichen. Kurz vor der Ernte hatte wiederum CHEAL mit 70 % des UKDG den größten Anteil an den vorkommenden Unkräutern.

Das Bild der Herbizidvariante war nur durch CHEAL und ECHCR bestimmt. Dabei nahm ECHCR einen Anteil von etwa 55 % und CHEAL von 45 % am UKDG ein. Vor der Ernte dominierte CHEAL mit 88 %. Die restlichen 12 % wurden durch ECHCR abgedeckt.

In der Variante RWM 1x war CHEAL die Hauptunkrautart, die im Laufe des Beobachtungszeitraumes ihren Anteil von etwa 30 % auf 66 % steigerte. Die zweite Hauptunkrautart ECHCR verringerte sich entsprechend von anfangs 62 % auf 25 % Anteil am UKDG. Über die gesamte Zeit verblieben im Gegensatz zur Herbizidvariante weitere Unkrautarten wie *Euphorbia helioscopia* L. (EPHHE), *Galinsoga parviflora* Cav. (GASPA), *Poa annua* L. (POAAN), *Stellaria media* (L.) Vill. (STEME) und *Viola arvensis* Murray (VIOAR) mit etwa 10 % des UKDG.

Die Entwicklung des Anteils der einzelnen Unkrautarten verlief in der Variante RWM 2x nahezu identisch wie in der Variante RWM 1x. Nur vor der Ernte unterschied sich das Bild deutlich, da in den Parzellen der Variante RWM 2x *Galinsoga parviflora* Cav. mit ca. 45 % einen wesentlich größeren Anteil am UKDG besaß. Dadurch reduzierte sich der Anteil von ECHCR auf 20 % und von CHEAL auf 33 % des UKDG.

Die in den Varianten RWM verbliebene Verunkrautung beeinträchtigte das Längenwachstum des Mais nicht. Wie in Abbildung 107 ersichtlich ist, erreichten die Varianten RWM 1x und RWM 2x mit 290 cm Wuchshöhe die gleiche Wuchshöhe wie die Herbizidvariante, obwohl die Unkräuter und Ungräser bis zur Ernte auf 20 cm (Variante RWM 2x) bzw. 35 cm (Variante RWM 1x) Höhe angewachsen waren.

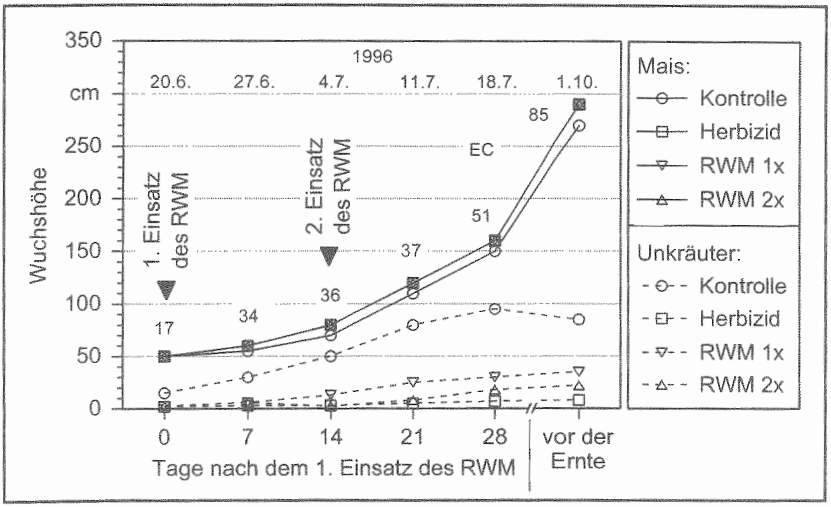


Abb. 107: Standort Großenviecht: Entwicklung der Wuchshöhe des Mais (*Zea mays* L.) und der Wuchshöhe der Unkräuter

Nur die Kontrollvariante blieb bereits ab Ende Juni (EC 34) im Wachstum zurück. Dort wurde der Mais aufgrund des hohen Unkrautbesatzes nur 270 cm hoch.

Die Regulierungserfolge der einzelnen Varianten lagen für den Unkrautdeckungsgrad und die Unkrauttrockenmasse nach der Behandlung auf gleichem Niveau. Der ganzflächige Herbizideinsatz erreichte für beide Parameter einen Regulierungserfolg von 99 % (Abbildung 108). Die Varianten RWM erzielten beim Unkrautdeckungsgrad 79 % bis 85 % und bei der Unkrauttrockenmasse 89 % bis 94 %. Der zweite Einsatz des Reihenmulchers bewirkte bei der Unkrauttrockenmasse nur eine Reduzierung um 53 % bis 68 %. Zum Zeitpunkt des Reihenschlusses lag wiederum die Herbizidvariante sowohl beim Unkrautdeckungsgrad als auch bei der Unkrauttrockenmasse mit 97 % bzw. 99 % Regulierungserfolg an der Spitze. Die Variante RWM 1x fiel mit etwa 45 % für den Unkrautdeckungsgrad und 69 % bis 90 % für die Unkrauttrockenmasse deutlich ab. Der zweimalige Einsatz des Reihenmulchers führte dazu, daß mit 91 % bis 94 % Regulierungserfolg für beide gemessenen Parameter das Niveau der Herbizidvariante nahezu erreicht wurde. Dabei unterschied sich der Bereich mit Schlepperspur von dem ohne Spur kaum.

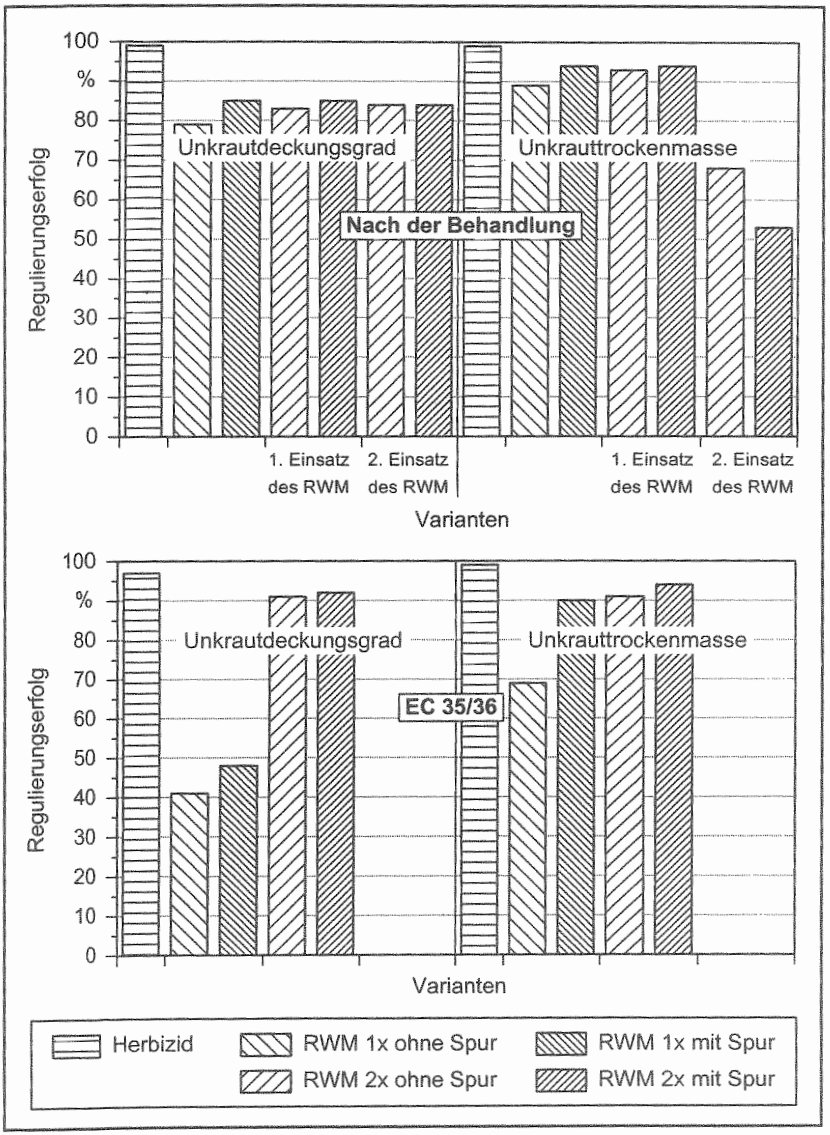


Abb. 108: Standort Großenviecht: Regulierungserfolg nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36)

5.2.1.5 Alle Standorte - Mittelwert der Regulierungserfolge und Maiserträge

Nach der Darstellung der Detailergebnisse der einzelnen Versuchsstandorte sind im Folgenden die Regulierungserfolge für die Parameter Unkrautdeckungsgrad und Unkrauttrockenmasse als Mittelwerte aller Standorte zu einer Gesamtübersicht zusammengefaßt. Zur Bewertung und Einordnung des neuen Verfahrens der Unkrautregulierung sind Ertragsergebnisse unbedingt erforderlich. Deshalb werden anschließend sowohl die realen Maiserträge der vier Versuchsstandorte als auch die relativen Kornerträge gemittelt über alle Standorte vorgestellt.

Regulierungserfolge - Mittelwert aller Standorte

In den Feldversuchen wurden in dem sehr regenreichen und unkrautwüchsigen Sommer mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät direkt nach der Behandlung für den Unkrautdeckungsgrad Regulierungserfolge von 69 % bis 73 % im Bereich ohne Spur und von 73 % bis 77 % im Bereich mit Spur ermittelt (Abbildung 109). Der Unkrautdeckungsgrad lag nach der Behandlung meist bei 10 % bis 20 %. Für den Parameter Unkrauttrockenmasse wurden in Bezug auf die Kontrolle Regulierungserfolge von 73 % bis 75 % im Bereich ohne Spur und etwa 88 % im Bereich mit Spur erreicht. Die aufgewachsene Unkrautmasse konnte von anfangs 30 g TM/m^2 bis 400 g TM/m^2 auf 7 g TM/m^2 bis 45 g TM/m^2 gesenkt werden. Der zweite Einsatz des Reihenmulchers erzielte im Mittel der Standorte bei der Unkrauttrockenmasse nur Regulierungserfolge von 36 % bis 51 %.

Die Herbizidvariante erzielte zu diesem Zeitpunkt im Durchschnitt der vier Standorte einen Regulierungserfolg von 80 % für den Unkrautdeckungsgrad und von 82 % für die Unkrauttrockenmasse. Die Angabe der Minimum- und Maximumwerte zeigt die große Spannweite der Regulierungserfolge, die auch in der Herbizidvariante beobachtet wurden, auf. Die Spannweite für den Unkrautdeckungsgrad des ganzflächigen Herbizideinsatzes reichte von 55 % bis 99 % und die der Varianten RWM von 45 % bis 94 %, wenn der zweite Einsatztermin des Reihenmulchers unberücksichtigt bleibt. Die Spannweite der Ergebnisse bei der Unkrauttrockenmasse war ähnlich.

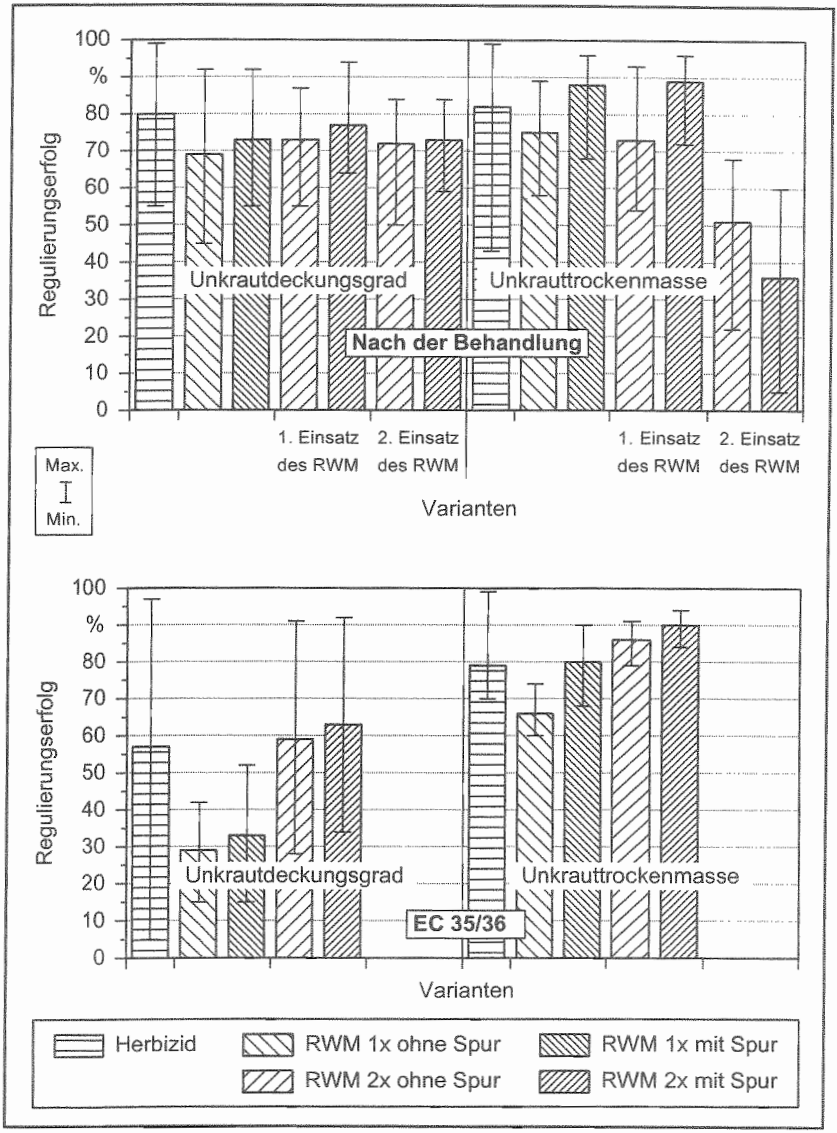


Abb. 109: Regulierungserfolge nach der Behandlung und beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) - Mittelwert aller Standorte

Beim Reihenschluß des Mais (EC 35/36) differenzierte sich das Bild hinsichtlich der Regulierungserfolge. Der einmalige Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes konnte im Durchschnitt den Unkrautdeckungsgrad nur um ca. 30 % reduzieren. Die Variante RWM 2x übertraf mit etwa 60 % Regulierungserfolg die Herbizidvariante, die 57 % erreichte. Zu berücksichtigen ist wiederum die sehr große Spannweite, wobei die größten Abweichungen in der Herbizidvariante festgestellt wurden.

Für die Unkrauttrockenmasse erreichte die Herbizidvariante in EC 35/36 im Mittel einen Regulierungserfolg von 79 %. Die Variante RWM 1x konnte mit 66 % im Bereich ohne Spur und 80 % im Bereich mit Spur insgesamt das Niveau nicht realisieren. Der zweimalige Einsatz des Reihenmulchers erzielte mit 86 % bis 90 % im Durchschnitt der vier Standorte das beste Ergebnis und bewirkte eine nachhaltige Unkrautregulierung.

Maiserträge der einzelnen Standorte

Da das neue Verfahren der Unkrautbekämpfung nur dann Akzeptanz finden wird, wenn das Ertragsniveau der Herbizidvariante erzielt werden kann, wurden die Maiserträge ermittelt. Die in den Feldversuchen erzielten Kornerträge sind in Abbildung 110 dargestellt. Auf den vier Versuchsstandorten Dürnast, Freising-Süd, Eittingermoos und Großenviecht erreichten die Varianten Herbizid, RWM 1x und RWM 2x annähernd gleiche Naturalerträge. Signifikante Unterschiede zwischen diesen Varianten wurden nicht gefunden. Nur die Kontrollvariante, bei der keine Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich durchgeführt wurde, wies deutlich geringere, meist signifikante Unterschiede zu den drei weiteren Prüfvarianten auf.

Maiserträge - Mittelwert aller Standorte

Das Ergebnis der varianzanalytischen Verrechnung der Erträge aller Prüfvarianten und aller Standorte zeigt Abbildung 111. Hier sind relative Kornerträge ausgewiesen, wobei die Herbizidvariante als praxisüblicher Standard auf 100 % festgesetzt wurde.

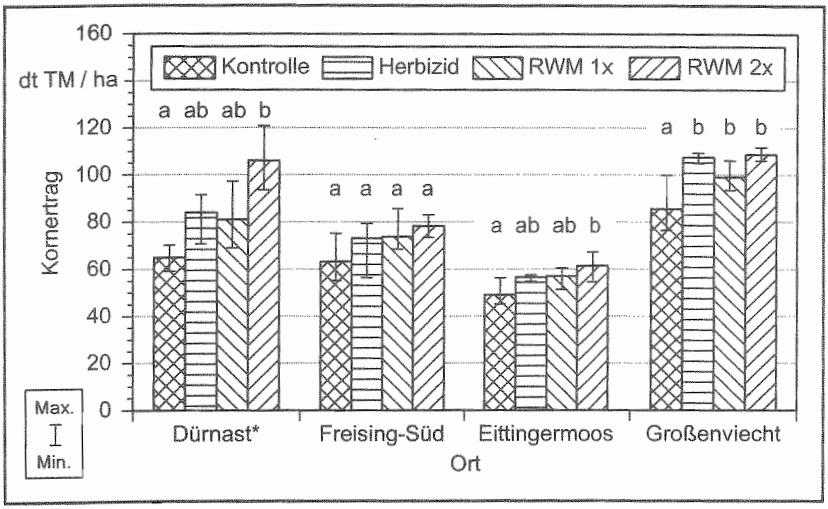


Abb. 110: Kornerträge von Mais der 4 Versuchsstandorte
(arithmetische Mittelwerte von 4 bzw. 3* Wiederholungen)

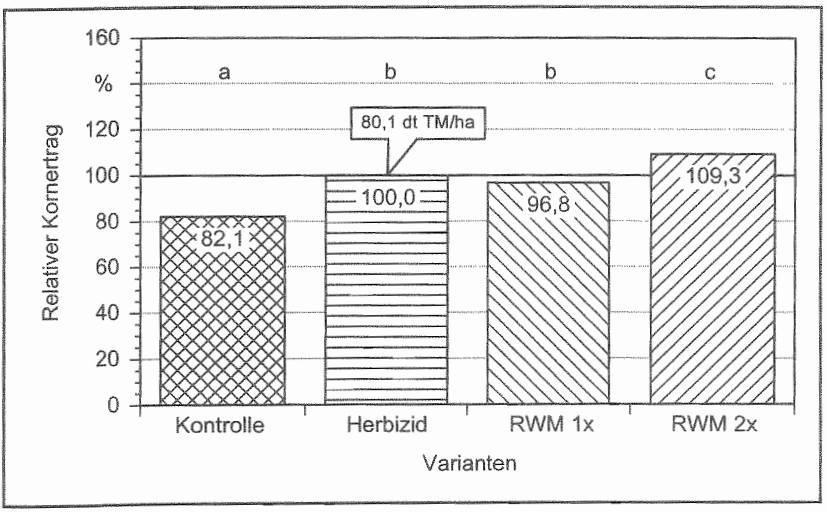


Abb. 111: Relativer Kornertrag von Mais
(4 Standorte, je 4 bzw. 3* Wiederholungen)

Mit einem relativen Kornertrag von 82,1 % erzielte die Kontrolle den signifikant niedrigsten Ertrag. Dies äußerte sich auch in der gegenüber der Herbizidvariante um 20 cm bis 30 cm geringeren Wuchshöhe. Zwischen den Varianten Herbizid und RWM 1x wurden hinsichtlich des Kornertrages keine signifikanten Unterschiede errechnet, obwohl die Variante RWM 1x im Durchschnitt um 10 cm bis 15 cm kleiner geblieben war und sie das Ertragsniveau der Herbizidvariante mit relativ 96,8 % nicht ganz erreichte. Bei zweimaligem Einsatz des Reihenmulchgerätes wurde in den Feldversuchen mit 109,3 % relativem Kornertrag ein signifikant höherer Ertrag im Vergleich zur Herbizidvariante (100 %) ermittelt. Dies zeigt, daß die Unkrautregulierung im Zwischenreihenbereich mit dem Reihenmulchgerät in Kombination mit einer 20 cm breiten Bandspritzung keine Ertragseinbußen zur Folge hatte und in der Variante RWM 2x sogar Mehrerträge festgestellt wurden.

5.2.2 Zerkleinerungseffekt bei *Amaranthus retroflexus* L.

Am Standort Eittingermoos wurde im Praxiseinsatz des Reihenmulchers die Zerkleinerungswirkung von verschiedenen Schädigungswerkzeugen an *Amaranthus retroflexus* L. (AMARE), der im Durchschnitt eine Wuchshöhe von 20,2 cm hatte, getestet. Der Schneidrotor C3 mit den umlaufend gezahnten Messern führte einen exakten Schnitt aus, so daß sich die Stengellänge von AMARE um die 20 mm der eingestellten Schnitthöhe verringerte. Demnach waren 63 % der Stengelstücke in der Größenklasse von 14,1 cm bis 18,0 cm und 37 % der Stengel besaßen eine Länge von 18,1 cm bis 22,0 cm (Abbildung 112). Eine ähnliche Wirkung hatte der Schlegelrotor F3. Hier wurden 73 % der abgeschlegelten Stengel der Stengellängenklasse von 14,1 cm bis 18,0 cm und 27 % der Klasse von 18,1 cm bis 22,0 cm zugeordnet. Die abgeschnittenen bzw. abgeschlegelten *Amaranthus retroflexus* L.-Pflanzen wurden somit als Langgut entsprechend der gewählten Schnitthöhe abgelegt.

Im Gegensatz dazu wurde mit dem Schlegelrotor F2, der Schlegel in Form von geschlossenen Bügeln besaß, ein Zerkleinerungseffekt erzielt. 73 % der abgeschlegelten Stengel von AMARE wiesen eine Länge von 7,1 cm bis 10,0 cm auf. Weitere 20 % lagen im Bereich von 10,1 cm bis 14,0 cm und die restlichen 7 %

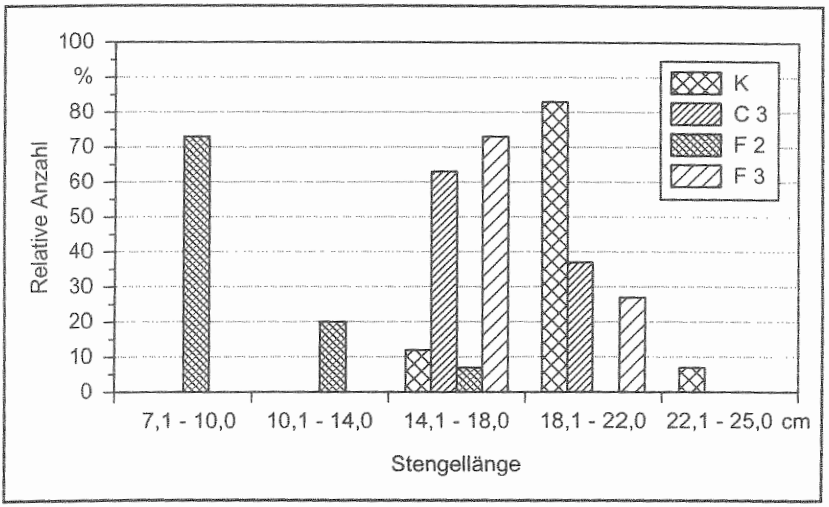


Abb. 112: Zerkleinerungseffekt verschiedener Schneid- bzw. Schlegelrotoren an *Amaranthus retroflexus* L. ($\bar{x}_{\text{Wuchshöhe}} = 20$ cm)

wurden in die Klasse von 14,1 cm bis 18,0 cm eingeordnet. Dies zeigt, daß die Ausformung der Abtrennwerkzeuge den Zerkleinerungsgrad beeinflußt.

5.2.3 Leistungsbedarf

Die Ermittlung der maximal möglichen Drehmomente erfolgte zum einen auf einem Winterweizenstoppelfeld und zum anderen auf einem wassergebundenen Feldweg, der einen extrem harten Boden, wie er unter Mulchsaatbedingungen vorkommen kann, simulieren soll.

Im Weizenstoppelfeld wurden an dem Rotor mit 550 mm Durchmesser maximale Drehmomente von etwa 65 Nm und bei dem Durchfahren von Maulwurfshügeln von 100 Nm registriert (Abbildung 113). Auf dem wassergebundenen Feldweg traten bei vollständigem Bodenkontakt Drehmomentspitzen von bis zu 270 Nm auf. Bei teilweisem Bodenkontakt der Abtrennwerkzeuge wurden Drehmomente von 150 Nm bis 200 Nm gemessen.

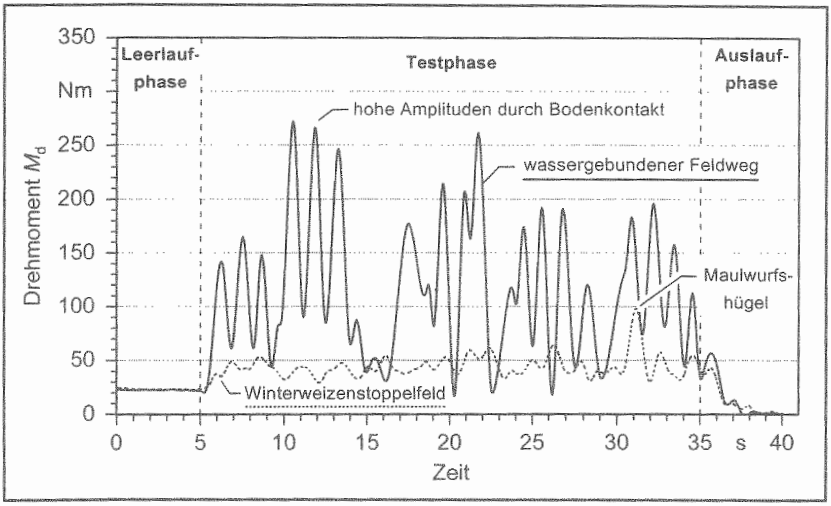


Abb. 113: Drehmomentverlauf von einem Schlegelrotor unter verschiedenen Bedingungen: wassergebundener Feldweg, Winterweizenstoppelfeld mit Maulwurfshügel

Demnach beträgt unter normalen Einsatzbedingungen der Leistungsbedarf für ein Schlegelrotoraggregat mit einer Arbeitsbreite (AB) von 550 mm maximal 5,1 kW (Getreidestoppelfeld). Ein Reihenmulchgerät mit einer Gesamtarbeitsbreite von 3,0 m benötigt mit vier Aggregaten zu je 550 mm Arbeitsbreite für die Drehleistung 20,4 kW bzw. bei einem starken Besatz mit Maulwurfshügeln maximal 31,6 kW. Durch Kontakt der Schädigungswerkzeuge mit einem extrem harten Boden, wie er in Mulchsaatbeständen vorhanden sein kann, kann ein Spitzendrehleistungsbedarf von 21,2 kW pro Schlegelaggregat mit 550 mm AB auftreten. Der Schutz vor diesen Spitzenbelastungen kann nur durch eine Überlastrutschkupplung und andere geeignete Überlastsicherungen, wie drehbar gelagerte Schlegel, erfolgen.

Bei einem durchschnittlichen Pflegeschlepperleergewicht von etwa 4000 kg und einem Gewicht von etwa 1000 kg für ein 3 m-Reihenmulchgerät beträgt der Zugleistungsbedarf bei einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 6 km/h bis 8 km/h an einem Hang mit 10 %iger Steigung ca. 20 kW bis 30 kW. Insgesamt unter Einbeziehung einer 10 %igen Leistungsreserve ist je nach Einsatzverhältnissen eine

Schleppermotorleistung von 45 kW bis 65 kW für ein 3 m-Reihenmulchgerät mit 2,20 m effektiver Arbeitsbreite erforderlich. Pflegeschlepper dieser Leistungsklasse sind auf den meisten landwirtschaftlichen Betrieben verfügbar, da über 50 % aller Pflegeschlepper den Leistungsklassen von 45 kW bis 74 kW angehören (DEMMEL 1997) [33]. Der spezifische Leistungsbedarf zum Betreiben eines Reihenmulchgerätes beträgt demnach unter den genannten Bedingungen 15 kW/m AB bis 22 kW/m AB unter erschwerten Verhältnissen. Die untere Grenze entspricht dem in Kapitel 2.4.1 angegebenen Wert für den flächendeckend arbeitenden Sichelmulcher. Der oberere Wert liegt in dem von DEMMEL 1997 [33] mit 20 kW/m AB bis 25 kW/m AB genannten Bereich des Leistungsbedarfs für Mulchgeräte.

6 Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Diskussion der vorgestellten Untersuchungen und der gewonnenen Ergebnisse teilt sich nach den zwei Fragen in der Zielstellung (Kapitel 3) in zwei Unterkapitel auf. Zuerst werden die Prüfstandsversuche und danach die Feldversuche zur mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge diskutiert.

6.1 Prüfstandsversuche

In den grundlegenden Prüfstandsversuchen mit *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. zeigte sich, daß nur bei Einsatz des Schneid- (C) bzw. Schlegelrotors (F) mit der Abtrennhöhe 2 cm eine nachhaltige Wirkung auf das Unkrautwachstum möglich ist (NAWROTH und ESTLER 1996) [153]. Um eine nachhaltige Schädigung zu bewirken, sollte zudem mit dem Schädigungswerkzeug eine möglichst große Wundoberfläche geschaffen werden (Abbildung A5). Diese führt zu einem erhöhten Zellwasseraustritt und bietet für parasitäre bzw. saprophytische Mikroorganismen eine große Angriffsfläche.

Für die Testpflanze *Chenopodium album* L. ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten C und F hinsichtlich der Wuchsstadien bei einer Abtrennhöhe von 2 cm. Bei einer Abtrennhöhe von 5 cm ist hinsichtlich des Wiederaufwuchses nach 20 Tagen das Wuchsstadium 10 cm zum Behandlungszeitpunkt zu bevorzugen.

Bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. ergab sich bei der Abtrennhöhe von 2 cm auch kein signifikanter Unterschied zwischen den Werkzeugarten C und F. Das Wuchsstadium 10 cm wirkte sich positiv auf den Regulierungserfolg aus, jedoch ist bei einer Betrachtung des Wiederaufwuchses nach 20 Tagen bei einer Abtrennhöhe von 2 cm das Wuchsstadium 20 cm zu bevorzugen, da weniger Biomasse aufgewachsen war. Denn für diese Varianten wurde eine geringere Anzahl von Bestockungstrieben gezählt. Diese Beobachtung wurde auch bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. gemacht. Deshalb ist zur Regulierung von Ungräsern das Wuchsstadium von 20 cm Wuchshöhe sinnvoller, da ansonsten die Bestockung eher

gefördert und somit der Biomassezuwachs erhöht wird. Unter Feldbedingungen ist für die mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge deshalb der Einsatzzeitpunkt des Reihenmulchgerätes auf die dominierenden Unkräuter und Ungräser der Mischverunkrautung abzustimmen.

Im Vergleich zu *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. war das Arbeitsprinzip Abschneiden bei *Agropyron repens* (L.) Beauv. erfolgreicher, denn aufgrund der geringeren Masse der Blätter von *Agropyron repens* (L.) Beauv. konnte die Abtrennhöhe bei den Varianten F unter den gegebenen Bedingungen nicht exakt eingehalten werden. Dies ist jedoch notwendig, wenn der Wiederaufwuchs für eine ausreichend lange Zeit in verträglichen Grenzen gehalten werden soll. Zur Einhaltung der Abtrennhöhe sind deshalb für das Abschlegeln höhere Umfangsgeschwindigkeiten an der Werkzeugspitze nötig. Die Geschwindigkeit von 56,2 m/s an der Werkzeugspitze, die zwar die von SCHEUFLER 1984 [172] für Gras mindestens geforderten 50 m/s übertraf, war für eine exakte Einhaltung der vorgegebenen Abtrennhöhe nicht ausreichend. Bei jungem Gras und bei jungen Unkräutern, die noch wenig verholzt sind, sind demnach Umfangsgeschwindigkeiten oberhalb von 55 m/s bis 60 m/s nötig. Bei anzustrebenden Vorfahrtsgeschwindigkeiten von 8 km/h und mehr sind Umfangsgeschwindigkeiten von 70 m/s bis 80 m/s erforderlich. Dies entspricht dem von SCHEUFLER 1984 [172] genannten oberen Wert der erforderlichen Geschwindigkeiten für Gras. Für diese hohen Umfangsgeschwindigkeiten der Werkzeuge war der vorhandene Prüfstand nicht ausgelegt.

In den Versuchen mit den drei weiteren dicotylen Unkrautarten *Amaranthus retroflexus* L., *Solanum nigrum* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. waren die Varianten C hinsichtlich eines nachhaltigen Regulierungserfolges signifikant am besten, jedoch erreichten die Varianten F, die etwas höhere Werte bei der aufgewachsenen Trockenmasse erzielten, ein akzeptables Ergebnis. Nur bei *Stellaria media* (L.) Vill. war der Abstand zwischen den Varianten C und F deutlicher. Im Wein- und Obstbau ist *Stellaria media* (L.) Vill. als kriechendes Unkraut sogar als Bodendecker erwünscht (WALTER 1990) [197], so daß für *Stellaria media* (L.) Vill. eine geringere Reduzierung des Biomasseaufwuchses toleriert werden kann. JONES, BLAIR und ORSON 1995 und 1996 [97, 98] haben

in Versuchen bei *Stellaria media* (L.) Vill., aber auch bei Ungräsern wie *Poa annua* L. und *Poa trivialis* L., mit dem Abschneiden 1 cm oberhalb der Bodenoberfläche im Gegensatz zu 1 cm unterhalb der Bodenoberfläche, das etwa einem Hackvorgang ohne Verschütten vergleichbar ist, gleich hohe bzw. meist bessere Regulierungserfolge erzielt. Dies zeigt, daß durch eine Unkrautregulierung, die nicht in den Oberboden eingreift und nur den Sproß der Unkräuter schädigt, eine erfolgreiche Unkrautregulierung möglich ist.

Durch die Versuche zur Handentlaubung von *Chenopodium album* L. und *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. wird deutlich, daß mit dem Arbeitsprinzip „Entlauben" eine nachhaltige Unkrautregulierung erreichbar ist. Beim Einsatz des Entlaubungsrotors werden jedoch die jungen Unkrautpflanzen durch die Luftbewegung, die die rotierende Entlaubungsbürste verursacht, auf den Boden und zur Seite gedrückt, wie eine Videofilmanalyse zeigte. Die Pflanzen im Randbereich der Multitopfplatte hatten während der Behandlung die Möglichkeit, seitlich auszuweichen, und konnten sich an anderen Nachbarpflanzen nicht abstützen. Dieser Randeffekt machte sich besonders bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. bemerkbar. Im Vergleich zu der Dicotylen *Chenopodium album* L., die zu den Behandlungszeitpunkten bereits einen ausgeprägten Stengel besaß, bestand die Monocotyle *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. überwiegend aus Blättern, deren geringerer Biegewiderstand zudem eine höhere Umfangsgeschwindigkeit der Werkzeuge erfordert (WIENEKE 1972) [207].

Die Luft in der unmittelbaren Nähe des Entlaubungsrotors wies nahezu die gleiche Geschwindigkeit wie die Umfangsgeschwindigkeit an der Werkzeugspitze auf, da der Rotor bei der Umdrehung und gleichzeitiger Vorfahrt die umgebende Luft verdrängen muß. Dies bedeutet, daß hier Luftgeschwindigkeiten von 29,4 m/s bzw. 105,8 km/h herrschten, die der Windstärke 11 Beaufort-Grad (orkanartiger Sturm) entsprechen (HÄCKEL 1990) [74]. Deshalb ist eine technische Realisierung der Entlaubung für hohe Flächenleistungen, die eine hohe Vorfahrtsgeschwindigkeit bedingen, kaum möglich. Die Unkrautpflanzen müßten zuvor nach oben angesaugt und anschließend entblättert werden. Jedoch würde dies einen sehr hohen technischen Aufwand erfordern, der ökonomisch nicht zu rechtfertigen ist.

6.2 Feldversuche

Unkrautregulierende Wirkung

Die Ergebnisse der Feldversuche in der Kultur Mais zur mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge zeigen, daß mit dem Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes Unkräuter und Ungräser erfolgreich reguliert werden können. Das Konzept der kombinierten Unkrautregulierung mit dem Einsatz eines Reihenmulchgerätes im Zwischenreihenbereich und einer Bandspritzung in der Reihe mit einer Breite von 20 cm gewährleistet eine wirkungsvolle und nachhaltige Unterdrückung der Unkräuter und Ungräser, da schon bei einmaligem Einsatz des Reihenmulchgerätes ein nahezu gleicher Ertrag im Vergleich zur ganzflächigen Herbizidausbringung realisiert werden konnte. Die Variante RWM 2x mit zweimaligem Einsatz des Reihenmulchers erzielte zum Zeitpunkt des Reihenschlusses (EC 35/36) die höchsten Regulierungserfolge hinsichtlich der Reduzierung der aufgewachsenen Unkrauttrockenmasse und führte im Durchschnitt sogar zu signifikant höheren Erträgen. Mit einem Relativ-Ertrag von 109,3 % übertraf sie die Herbizidvariante, die als Vergleichsbasis auf 100 % festgesetzt wurde, deutlich. Dies konnte in der Vegetationsperiode 1996, die durch ein starkes Unkrautwachstum aufgrund der häufigen Niederschläge (DEUTSCHER WETTERDIENST 1996) [36] geprägt war, in der Kultur Mais bei unterschiedlichen Unkrautfloren gezeigt werden. Die Zielstellung des neuen Konzeptes der Unkrautregulierung wurde somit erreicht.

Für eine weitergehende statistische Absicherung der Ergebnisse sind mehrjährige Untersuchungen notwendig. Hierbei sollte geprüft werden, ob in Trockenjahren bzw. in Trockengebieten mit einem ariden Klima die verbleibende Verunkrautung eine größere Konkurrenzwirkung in Bezug auf eine ausreichende Wasserversorgung der Kulturpflanze besitzt. In diesem Zusammenhang sollte geklärt werden, ob sich der Einsatz eines Reihenmulchgerätes im Vergleich zu den im Boden arbeitenden Geräten zur mechanischen Unkrautregulierung günstiger auf die Entwicklung der Reihenkultur auswirkt, da durch das Bedecken des Oberbodens mit dem Unkrautmulch eine geringere Verdunstung von wertvollem Bodenwasser durch Senkung der Bodentemperatur und Schaffung turbulenzarmer Zonen an der Bodenoberfläche

erwartet wird (TÜRKE 1976) [193]. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Erkenntnisse der Prüfstandsversuche unter praktischen Feldbedingungen zu überprüfen.

Im Vergleich zur herkömmlichen mechanischen Unkrautregulierung mit dem Einsatz eines Hackstriegels oder Scharhackgerätes, die zwischen den Pflanzenreihen eine Unkrautminderung von 50 % bis 99 % bewirken (ESTLER et al. 1992, SCHÖN, ESTLER und RESCH 1992) [58, 177], konnten im Mittel ähnlich hohe Wirkungsgrade von 69 % bis 77 % für den Unkrautdeckungsgrad und von 73 % bis 88 % für die Unkrauttrockenmasse erreicht werden. Die Wirkungsdauer ist etwas kürzer als bei Geräten, die im Boden arbeiten. Deshalb sollte bei wüchsiger Witterung der zweite Einsatztermin des Reihenmulchgerätes rechtzeitig eingeplant werden. Im Bereich der Schlepperspur wurden tendenziell höhere Regulierungserfolge beobachtet, da durch den Schlupf der Antriebsräder des Schleppers die abgeschlegelten Unkräuter zusätzlich Scherkräften ausgesetzt waren. Nach ESTLER et al. 1992, SCHÖN, ESTLER und RESCH 1992 [58, 177] liegen die Wirkungsgrade einer Herbizidbehandlung meistens höher als 90 %. In den unter Praxisbedingungen durchgeführten Feldversuchen konnten in den Varianten Herbizid nicht auf allen Standorten diese hohen Wirkungsgrade bei der Unkrautregulierung realisiert werden. Im Mittel wurden bei der Variante Herbizid Regulierungserfolge von etwa 80 % erzielt. Neben den positiven Auswirkungen der Unkräuter in den Varianten RWM ist dies ein ursächlicher Faktor für den geringeren Ertrag in der Variante Herbizid.

Um das gleiche Ertragsniveau wie bei der praxisüblichen flächendeckenden Herbizidanwendung zu erreichen, ist es im Rahmen dieses neuen kombinierten Verfahrens der Unkrautregulierung entscheidend, daß die Jugendentwicklung der Kulturpflanzen sowohl durch eine geeignete Sortenwahl als auch durch eine frühzeitige Unkrautregulierung in der Reihe gefördert wird. Deshalb sollte die Herbizid-Bandspritzung im Nachauflauf in EC 12/EC 13 erfolgen, da nach HURLE und KEMMER 1988 [91] und ESTLER et al. 1992 [58] die Verunkrautung in den Reihen einen größeren Einfluß auf den Maisertrag und damit auch auf das Maiswachstum besitzt als die Verunkrautung zwischen den Reihen.

Die Regenerationsfähigkeit der gemulchten Unkräuter ist abhängig von der spezifischen Oberfläche der Wunde, der verbleibenden Assimilationsfläche, den nachfolgenden Witterungsbedingungen und von der Besiedelung mit parasitären oder saprophytischen Pilzen und Bakterien. Neben dem Wiederaustrieb der abgeschlegelten Unkräuter hängt das Ausmaß der Verunkrautung nach dem Einsatz des Reihenmulchers zudem von dem im Boden vorhandenen keimfähigen Unkrautsamenpotential ab. Durch den guten Regulierungserfolg des neuen Verfahrens der Unkrautregulierung bei Arten mit einem aufrechten Sproß ist es möglich, die Auffüllung des Unkrautsamenpotentials im Boden deutlich zu reduzieren. Arten mit einer sehr hohen Samenproduktion pro Pflanze wie *Amaranthus retroflexus* L. oder *Chenopodium album* L. (STEVENS 1932) [189] können dadurch in ihrer Ausbreitung eingeschränkt werden. Das Abschneiden bzw. Abschlegeln muß jedoch unbedingt vor oder spätestens im Knospenstadium erfolgen (ZIMDAHL 1993) [212]. Im Gegensatz dazu werden Arten mit einem kriechenden Habitus wie *Stellaria media* (L.) Vill. und *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medicus weitestgehend geschont. Bei *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. und *Galium aparine* L. ist der Regulierungserfolg gering. Die Anzahl der gebildeten Samen wird jedoch deutlich reduziert. Eine Samenbildung an den dicht auf dem Boden aufliegenden Trieben kann nicht in jedem Fall verhindert werden. Zudem läuft *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. in mehreren Keimwellen auf.

Bei Ungräsern kann die mechanische Entfernung der oberirdischen Pflanzenteile ebenfalls die Samenbildung verhindern; allerdings kann sie auch die Bestockung anregen. Wenn die Blattmasse zum richtigen Zeitpunkt entfernt wird, können die Reservestoffe in den Überdauerungsorganen von Geophyten (Wurzelunkräutern) vermindert bzw. nicht wieder aufgefüllt werden. Ungräser wie *Poa annua* L. oder *Agropyron repens* (L.) Beauv., aber auch das Problemunkraut *Rumex obtusifolius* L. sind durch ein- bzw. zweimaliges Abschlegeln nur unzureichend in ihrem Wachstum regulierbar. Der optimale Einsatztermin des Reihenmulchers ist abhängig von der Abundanz der Unkräuter, der Unkrautartenzusammensetzung und dem Entwicklungszustand der Reihenkultur. Unter Praxisbedingungen werden meist zwei Behandlungen mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät RWM erforderlich sein.

Optimierung der Gerätetechnik

Da im Feld die Bodenoberfläche Höhenunterschiede von mehreren Zentimetern aufwies, konnte die vorgewählte Abtrennhöhe von 20 mm über der mittleren Bodenoberfläche trotz Werkzeug-Höhenführung mit einem speziellen Tastrad nicht überall eingehalten werden. Unkrautpflanzen, die in kleinen Senken wuchsen, konnten nur oberhalb von etwa 40 mm bis 50 mm abgeschlegelt werden. Anderenfalls wurden die Unkräuter, die auf kleinen Erhebungen, wie beispielsweise Maulwurfshügel oder großen Kluten, wuchsen, mit einem Teil ihrer Wurzeln entfernt, da bedingt durch die horizontale Abtrennebene des Sichelmulchers die Werkzeuge nicht auf kleinräumige Bodenunebenheiten reagieren konnten. Die Bauweise des Schlegelmulchers mit vertikal rotierenden Schlegeln könnte diese Bodenunebenheiten ausgleichen, jedoch wäre dann ein häufiger Eingriff der Schlegel in die obere Schicht des Oberbodens die Folge. Auch der unvermeidbare gelegentliche Bodenkontakt des horizontal rotierenden Schlegelrotors erfordert unbedingt verschleißfeste gehärtete Werkzeuge.

Das in den Feldversuchen verwendete dreireihige Versuchsgerät diente der Erprobung des neuen Schädigungsprinzips. Aus den umfangreichen Erfahrungen beim Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes lassen sich die folgenden Anforderungen formulieren, die bei der Herstellung eines verkaufsfähigen Gerätes erfüllt sein müßten: Der Abstand von der Mitte des Schlepperlenkrades bis zur Vorderkante des Frontgerätes darf maximal nur 3,50 m betragen [142]. Demnach ist die Baulänge des Frontreihenmulchers unter diesen Wert zu verringern. Die Verkürzung der Baulänge besitzt den Vorteil, daß das Gerät überschaubarer und leichter lenkbar wird, da geringe Lenkausschläge nicht so große seitliche Abweichungen des Schlegelaggregates zur Folge haben und die Gefahr möglicher Schäden an der Kulturpflanze verringert wird. Vorrichtungen zur automatischen Führung der Arbeitswerkzeuge entlang von Pflanzenreihen, die bereits z. B. bei Zuckerrüben-Erntemaschinen im Einsatz sowie in anderen Kulturen in Erprobung sind, wären zu einer exakteren Geräteführung und Entlastung des Schlepperfahrers erforderlich. Da sich die Reihenfrüchte in der Zeitspanne der Unkrautregulierung noch in einem für mechanische Belastungen empfindlichen Stadium befinden, ist eine berührungslose automatische Reihenführung anzustreben. Zudem benötigen

Geräte mit einer Arbeitsbreite von mehr als 3 m für den Straßentransport eine hydraulische Einklappvorrichtung der seitlichen Schlegelaggregate [142, 191].

Für eine optimale Bodenanpassung ist die Parallelogrammaufhängung eines jeden Schlegelrotoraggregates unbedingt erforderlich. Die Höheneinstellung des Schlegelrotors kann entweder über eine nachlaufende Stützwalze (Abbildung 114) oder - wie in Abbildung 115 dargestellt - mittels eines Tastrades, dessen Höhe über einen Spindeltrieb variierbar ist, erfolgen. Damit der seitliche Bodendruck des Tastrades bei Kurvenfahrten so gering wie möglich gehalten wird, sollte das Tastrad mit einem Drehgelenk am Rahmen des Schlegelaggregates befestigt sein. Zudem ist die Aufstandsfläche des Tastrades so groß wie möglich zu bemessen, da sonst durch das Gewicht des Schlegelaggregates der Boden zu sehr rückverdichtet und das erneute Keimen und Auflaufen von Unkräutern gefördert wird. Um die bodennahe Fauna weitestgehend zu schonen, ist eine Tiefenführung mit Führungsrädern besser zu bewerten als mit einer Stützwalze (EHLERT und KRAUT 1994) [46].

Für Schlepper mit Frontkraftheber und Frontzapfwelle bietet sich der mechanische Antrieb über eine Gelenkwelle, wie auch beim Versuchsgerät realisiert, an. Abbildung 114 zeigt ein Konzept eines Reihensichelmulchgerätes mit mechanischem Antrieb. Durch die hohen erforderlichen Umfangsgeschwindigkeiten von mehr als 55 m/s am Rotor sind hohe Drehzahlen der Antriebswellen und entsprechend robuste Übersetzungs- und Winkelgetriebe nötig. Für die Realisierung von größeren Arbeitsbreiten mit mehr als 3 m, die für eine höhere Flächenleistung nötig sind, wäre trotz etwas höherer Leistungsverluste der hydraulische Antrieb eine Alternative zum mechanischen Antriebskonzept (Abbildung 115). Dadurch würden auch die hohen Laufgeräusche der Getriebe bedingt durch die hohen Drehzahlen der Antriebswellen entfallen. Der ölhydraulische Antrieb des Schlegelrotors erfolgt über einen direkt auf die Antriebswelle aufgeflanschten Hydraulik-Motor. Dieses Antriebskonzept hat den Vorteil, daß die Konstruktion des Reihensichelmulchers vereinfacht und das Gerät auch an Schlepper, die nur eine Heckzapfwelle besitzen, einsetzbar wäre. Der Hydrauliköltank und die zapfwellengetriebene Ölpumpe sind im Schlepperheck untergebracht und tragen zur gleichmäßigeren Gewichtsverteilung auf die Schlepperräder bei. Mit dem hydraulischen Antriebskonzept kann das Gerätegewicht des Reihenmulchgerätes reduziert werden, da die mechanischen

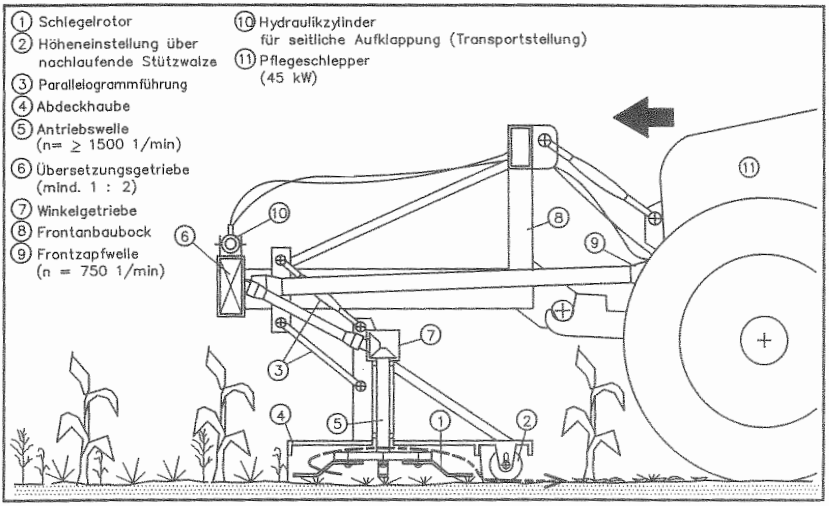


Abb. 114: Konzept Reihensichelmulchgerät für den Schlepperfrontanbau - mechanischer Antrieb über Gelenkwelle

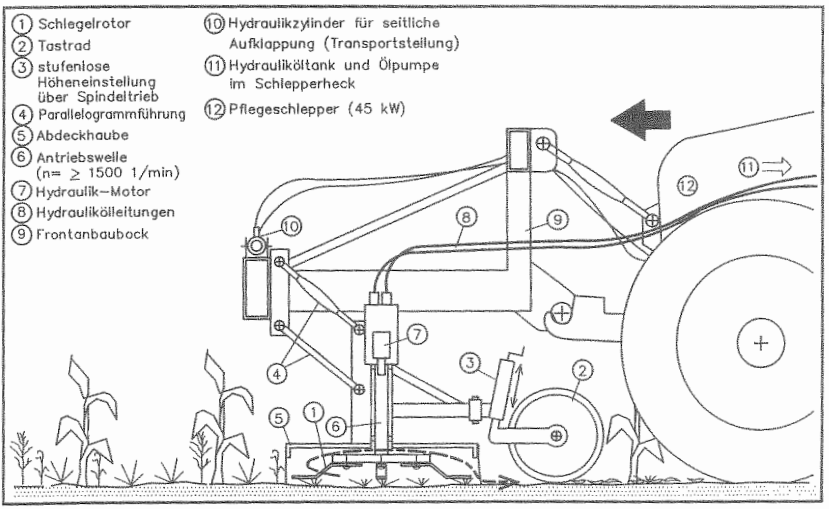


Abb. 115: Konzept Reihensichelmulchgerät für den Schlepperfrontanbau - hydraulischer Antrieb über Ölpumpe im Schlepperheck

Übersetzungs- und Winkelgetriebe sowie die Gelenkwellen nicht mehr erforderlich sind. Zudem wird bei diesem Konzept die Konstruktion des Klappmechanismus für die Transportstellung der seitlichen Aggregate vereinfacht, da die Anbindung des mechanischen Antriebs der seitlichen Schlegelaggregate an das Übersetzungsgetriebe entfällt.

Im Gegensatz zu einem vertikal rotierenden Schlegelmulcher erfährt das abgeschlegelte Mulchmaterial durch die horizontale Rotation der Schlegelwerkzeuge eine Seitwärtsbewegung, die eine Einbringung des Mulchmaterials in die Kulturpflanzenreihe mit geeigneten Schwadblechen ermöglicht. Dort kann durch den Unkrautmulch sowohl der bearbeitete Boden vor Erosion geschützt als auch kleine Unkrautpflanzen abgedeckt und somit das Unkrautwachstum spätkeimender Unkräuter unterdrückt werden. Dazu sind geeignete Schlegelwerkzeuge erforderlich, die die für eine gleichmäßige Einbringung des Mulchmaterials ausreichende Zerkleinerung der Unkrautpflanzen gewährleisten. Damit jedoch auch im Zwischenreihenraum eine ausreichende Bodenbedeckung durch Mulch vorhanden ist, wäre ein Mulchverteiler mit oszillierenden Leitblechen, wie er in Versuchen von SCHÄFER, JAAKKOLA und GRANSTEDT 1996 [171] im Rahmen der Entwicklung einer Grünmulchverteilmaschine getestet wurde, sinnvoll. Eine solche Einrichtung an einem Sichelmulchgerät bedarf einer sicherheitstechnischen Prüfung und Abnahme durch den Unfallversicherungsträger. Der seit Ende 1997 erstmalig für den Frontanbau am Markt vorhandene vertikal rotierende Reihenschlegelmulcher der Firma Althaus & Co. AG (Ersingen, Schweiz), der im Rahmen des Konzepts „Maiswiese" (AMMON et al. 1990, ANKEN et al. 1993) [1, 3] entwickelt wurde, gewährleistet nur eine Breitverteilung der Unkräuter im Bereich zwischen den Kulturpflanzenreihen.

Da die Schädigungsrate der Fauna im Pflanzenbestand schwierig zu erfassen ist, haben LÖBBERT, KROMER und WIELAND 1994 [133] bei Untersuchungen zur Faunaschädigung verschiedener Mähwerke für den Lebensraum „Grünland" an Modellkörpern nachgewiesen, daß Scheibenmähwerke weniger schädigen als Schlegelhäcksler. Aus diesem Grund ist der Sichelmulcher, der einem Kreiselmähwerk in der Bauweise verwandt ist, gegenüber einem Schlegelmulcher zu bevorzugen. Andererseits werden Raupen durch Scheibenmäher stärker

geschädigt. In Labortests von EHLERT und KRAUT 1994 [46], die den Einfluß der Sogwirkung von Schlegelhäckslern auf die Schädigungsrate der Fauna prüften, wurde kein Auf- oder Ansaugen von Kleinstlebewesen festgestellt. Es wurden nur tangential stark verwirbelte Luftströme gemessen. Die Versuche von LÖBBERT, KROMER und WIELAND 1994 [133] zeigten zudem, daß die Schädigungsrate von der Schnitthöhe und der Schlegelform abhängig ist. Bei einem tiefen Schnitt von 5 cm war die Schädigung höher als bei einem hohen Schnitt von 10 cm. Im Gegensatz dazu war insbesondere bei Schlegelmulchern ein tiefer Schitt besser, da mehr Biomasse durch das Gehäuse bewegt wurde und somit die Pufferwirkung gegenüber der Fauna zunahm. Gezahnte Schlegelformen verursachten die größten Schäden an den Modellkörpern, die Insekten imitierten. Da auch in den Prüfstandsversuchen mit gezahnten Werkzeugen keine bessere unkrautregulierende Wirkung durch ein stärkeres Aufspleißen der Unkraut- bzw. Ungrasstoppel erzielt wurde, ist ein Einsatz gezahnter Schlegelformen nicht sinnvoll.

Herbizideinsparung

Auf eine Unkrautregulierung kann nicht verzichtet werden, da ansonsten in Reihenkulturen wie Zuckerrüben oder Mais mit erheblichen Ertragsausfällen von 30 % bis 80 % gerechnet werden muß (KEES 1993) [100]. Für eine deutliche Entlastung der Umwelt ist jedoch eine erhebliche Reduzierung des Herbizideinsatzes auf das nötige Maß erforderlich (NACHTIGALL 1994) [148]. Der Absatz von Herbiziden mit etwa 14000 t/a in Deutschland entspricht ca. 50 % der Gesamtsumme des Absatzes von Pflanzenschutzmitteln (IVA 2000) [93]. Durch das neue kombinierte Verfahren der Unkrautregulierung mit Einsatz eines Reihenmulchers im Zwischenreihenbereich kann der nötige Herbizidaufwand gegenüber der praxisüblichen flächigen Herbizidanwendung z. B. in der Kultur Mais um 73 % verringert werden. Dies stellt eine deutliche Entlastung der Umwelt dar, da insbesondere Herbizide zum Teil erhebliche wasserwirtschaftliche Probleme (IRMER, WOLTER und KUSSATZ 1993) [94] durch ihre Stoffeigenschaften (hohe Persistenz, Mobilität) bereiten sowie durch ihre weitverbreitete und großflächige Anwendung charakterisiert sind. In der Kritik der Wasserwirtschaft stehen viele Herbizide, insbesondere die verbotenen triazinhaltigen sowie die terbuthylazin- und

bentazonhaltigen Produkte, die in der landwirtschaftlichen Reihenkultur Mais häufig zum Einsatz kommen.

Als Hauptursachen des Eintrages von chemischen Pflanzenschutzmitteln in Gewässer sind der Eintrag über Erosion und Oberflächenabfluß, der Direkteintrag, der Eintrag über Auswaschung und Dränagen sowie der bislang weniger beachtete Eintrag über die Hofabläufe landwirtschaftlicher Betriebe herauszustellen (BRAUTLECHT 1992, FREDE und BACH 1993, HOOF und SCHLETT 1995) [24, 63, 88]. Neben den stoffbezogenen Faktoren (Wirkstoff und Metabolite) begünstigen Boden- und Klimafaktoren sowie anwendungstechnische Faktoren eine Gewässerkontamination durch Pflanzenschutzmittel. Hierbei sind ein geringes Sorptionsvermögen des Bodens bedingt durch einen geringen Humusgehalt und der geringe Bedeckungsgrad durch die Kultur zum Anwendungszeitpunkt von besonderer Bedeutung (CEYNOVA 1989, LEISTRA und GREEN 1990) [29, 131]. Das neue Verfahren der Unkrautregulierung kann die möglichen Gewässerbelastungen mit Herbiziden zum einen durch die deutlich geringere Herbizidmenge pro Flächeneinheit und zum anderen durch den bodenschützenden Unkrautbestand bzw. Unkrautmulch verringern.

Nährstoff-Fixierung

Hauptsächliche Einflußfaktoren auf die Sickerwasserbildung und Mineralstoffauswaschungen sind die Menge und Verteilung der Niederschläge, der Wasserverbrauch durch Evaporation, der Nährstoffgehalt und die Mineralstoffbilanz des Standortes und die Bodeneigenschaften, die das Wasserhaltevermögen bestimmen, wie das Sorptionsvermögen und insbesondere der Grad der Durchwurzelung sowie pflanzenbauliche Maßnahmen (Bodenbedeckung, Kulturart, Menge und zeitliche Aufteilung der Düngung) (BRAMM 1981, LÜTKE ENTRUP et al. 1998) [23, 135]. Nach Berichten der LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) 1995 [128] weisen etwa 25 % der Grundwässer deutliche bis stark erhöhte Nitratgehalte auf, die in der Regel auf Auswirkungen der landwirtschaftlichen Nutzung besonders auf auswaschungsgefährdeten Standorten zurückgeführt werden (KÖNIG 1989) [111]. Neben Stickstoff und Phosphat können auch Kalium,

Natrium, Calcium und Magnesium zu Belastungen der Gewässer führen. Die Auswaschungsgefahr hängt in entscheidendem Maße von der Kationenaustauschkapazität ab (BOYSEN 1981) [22]. Die im Zwischenreihenbereich aufwachsenden Unkräuter können überschüssigen Nitrat-Stickstoff sowie weitere auswaschungsgefährdete Mineralstoffe fixieren und nach dem Entfernen der oberirdischen Pflanzenteile durch den Einsatz des Reihenmulchers die organische Substanz im Oberboden anreichern (GLIESSMAN 1988) [69]. Dadurch wird das Sorptions- und Wasserhaltevermögen des Bodens verbessert. Nach Untersuchungen von MERBACH 1993 [141] mit *Chenopodium album* L. kann zudem der Mais bis zur Teigreife (Siloreife, EC 85) etwa ein Drittel des unkrautbürtigen Stickstoffs aufnehmen, wenn das Unkraut bei einer Wuchshöhe des Mais von 40 cm gemulcht wird.

Erosionsschutz

Die Gründe für die Zunahme der Bodenerosion sind nach SCHMIDTLEIN 1990 [174] in der Umgestaltung des Kleinreliefs, in der Veränderung der Flächennutzung mit der Ausweitung erosionsfördernder Kulturen, wie z. B. Mais oder Zuckerrüben, und der Bearbeitung der Felder in der Fallinie sowie in der zunehmenden Bodenbeanspruchung zu suchen. Die stärkere Bodenbeanspruchung ist auf den verstärkten Anbau von Feldfrüchten mit später Bodenbedeckung, wie z. B. Mais oder Zuckerrüben, die Ausbringung von Gülle zu ungünstigen Zeitpunkten und mit zu hohem Bodendruck, vermehrte Erntearbeiten im Herbst bei zum Teil ungünstigen Boden- und Witterungsbedingungen und auf eine standörtlich nicht angepaßte Bodenbearbeitung zurückzuführen. Generell wird eine Erosion über der Bodenneubildungsrate von 0,1 mm/a bis 1,0 mm/a als problematisch angesehen, zumal immer die Oberkrume als fruchtbarster Teil des Bodenprofils betroffen ist. Besonders kritisch ist die ackerbauliche Nutzung von Mittelhanglagen mit schluffig tonigen Lehmen zu sehen, die bei einseitiger Fruchtfolge mit z. B. Mais mittlere jährliche Bodenabträge von etwa 20 t/ha·a (≙ 1,33 mm/ha Bodenoberfläche) zur Folge haben können. Für Bayern kann mit einem durchschnittlichen theoretischen Potential des Bodenabtrags durch Wasser von 8 t/ha·a gerechnet werden (SCHWERTMANN und VOGL 1985, AUERSWALD und SCHMIDT 1986) [182, 5].

Neben den On-Site-Schäden, die den Bewirtschafter treffen, sind die Off-Site-Schäden der Bodenerosion durch Wasser von zunehmender Bedeutung. Von den Phosphor- bzw. Stickstoffeinträgen in Fließgewässer sind 50 % bzw. 60 % diffuse Einträge, die zu einem beträchtlichen Anteil aus der Landwirtschaft stammen. Während der Haupteintragsweg bei Stickstoff über das Sicker- und Grundwasser bzw. Dränwasser stattfindet, dominieren die Bodenerosion und der Oberflächenabfluß bei dem Eintrag von Phosphat in die Oberflächengewässer (WERNER und OLFS 1989, HAMM 1993, UMWELTBUNDESAMT 1997) [206, 76, 194]. Die Funktion des Bodens ist nicht nur Produktionsfaktor im landwirtschaftlichen System, sondern seine Beschaffenheit beeinflußt den Wasserkreislauf in verschiedener Weise. Intakte Böden wirken gegenüber Wasser und dessen Inhaltsstoffe als Speicher, Puffer, Filter und Austauschmedium (LÜTKE ENTRUP et al. 1998) [135].

Das neue Verfahren der Unkrautregulierung bietet im Zwischenreihenbereich durch das Belassen der Unkräuter bis EC 14 oder sogar EC 17 des Mais bei entsprechender Verunkrautung einen guten Erosionsschutz. Der Unkrautdeckungsgrad, der die durch Unkräuter und Ungräser bedeckte Bodenoberfläche beschreibt, lag vor dem ersten Einsatz des Reihenmulchers, der Anfang bis Mitte Juni erforderlich wurde, bei etwa 50 % bis 83 %. Bei diesen Unkrautdeckungsgraden, die nahezu vergleichbar sind mit den Bodenbedeckungsgraden mit Mulch, da die Unkräuter bei einer maximalen Wuchshöhe von 15 cm den Boden noch relativ nahe der Bodenoberfläche abdecken, beträgt auf dieser Fläche der mögliche relative Bodenabtrag nur ca. 10 % bis 30 %. Nach dem Einsatz des Reihenmulchers sinkt zwar der Unkrautdeckungsgrad auf etwa 10 % bis 20 % ab, jedoch ist die Bodenoberfläche neben den verbleibenden lebenden Unkräutern und den Unkrautstoppeln ($\hat{=}$ Unkrautdeckungsgrad) weitgehend durch den Unkrautmulch abgedeckt. Die abgeschlegelten oberirdischen Pflanzenteile der Unkräuter tragen als Pflanzenmulch zur Stabilisierung der Bodenoberfläche bei und vermindern die Bodenerosion, da die Bedeckung direkt dem Boden aufliegt (AUERSWALD und KAINZ 1989) [6]. Der Blick in den Zwischenreihenbereich vor und nach der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät sowohl für einen Mulchsaatbestand als auch für einen konventionell gesäten Maisbestand verdeutlicht dies (Abbildungen A9 und A10 sowie Abbildungen A11 und A12).

Da bei diesem Verfahren der Unkrautregulierung der Erosionsschutz bei konventioneller Saat der Reihenfrucht vom jeweiligen Unkrautaufwuchs des Standortes und der Verteilung der Unkräuter abhängig ist, kann ein optimaler flächendeckender Erosionsschutz nicht immer gewährleistet werden. Deshalb ist bei akuter Erosionsgefahr eine gezielt angelegte Bodenbedeckung mit einem Zwischenfruchtmulch und die Anwendung der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung direkt in den Pflanzenmulch unbedingt erforderlich. In den praktischen Einsätzen mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät konnte nachgewiesen werden, daß mit diesem Gerät auch in Mais-Mulchsaatbeständen eine sehr effektive Unkrautregulierung möglich ist.

Artenvielfalt

Die Gesellschaft verlangt seit langem im Rahmen einer umweltgerechten Agrarproduktion eine Erhaltung der floristischen und faunistischen Artenvielfalt. Für das Überleben der wildwachsenden Pflanzenarten ist eine Integration möglichst vieler Lebensräume in die Agrarlandschaft notwendig (KNAUER 1991) [107]. Um die Existenz von begleitenden wildlebenden Pflanzenarten zu ermöglichen; sollen diese, soweit sie Unkräuter darstellen, erst nach Überschreitung von Schadensschwellen und dann, wenn möglich, vorzugsweise nicht-chemisch bekämpft werden (HABER 1991) [70]. Dazu ist im Rahmen des Integrierten Pflanzenschutzes die Festlegung von wirtschaftlichen Schadschwellen für spezielle Unkräuter und Ungräser in den Reihenkulturen Mais und Zuckerrüben erforderlich, um die Anwendung von Herbiziden auf das notwendige Maß zu beschränken. Um eine größtmögliche Artenvielfalt und zudem eine ausreichende Unkrautregulierung zu erreichen, ist ein Konzept ökonomisch-ökologischer Schadschwellen zu entwickeln (HURLE 1997) [90]. Dafür können die vorliegenden Ergebnisse erste Anhaltspunkte liefern.

Die vor und nach der Behandlung mit dem Reihenmulchgerät aufwachsenden Unkräuter und Ungräser bereichern nicht nur die pflanzliche Artenvielfalt des Agrarökosystems (PLAKOLM 1989) [163], sondern sie dienen auch als alternative Nahrungsquelle für Prädatoren und Parasiten, die natürliche Feinde für

Schadorganismen sind. Zur Vollendung ihres Lebenszyklus ist das Vorkommen von Unkräutern in den meisten Fällen notwendig (DIERKS 1989, ANDOW 1988) [42, 2]. Jedoch ist auch zu beachten, daß Unkräuter und Ungräser oft Wirte für viele Schaderreger sind (DIERKS 1986, KEES 1993, BÖRNER 1995, HOFFMANN et al. 1994) [41, 100, 21, 84]. Durch die mechanische Unkrautregulierung mit einem Reihen-Unkraut-Mulchgerät wird die Artenzusammensetzung der Unkrautflora beeinflußt. Es werden neben den Ungräsern niedrigwachsende kriechende Unkrautarten wie beispielsweise *Stellaria media* (L.) Vill. gefördert. Zudem sind Arten, die in Keimwellen oder ganzjährig keimen, gegen dieses Verfahren der Unkrautregulierung weitgehend tolerant.

Bodenfruchtbarkeit

Der Oberflächenmulch durch Unkräuter dient auch der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, deren Schutz und Pflege in der landwirtschaftlichen Produktion erforderlich ist (HABER und SALZWEDEL 1992) [72]. Er bewirkt eine Steigerung der Bioturbation, die eine Lockerung und Stabilisierung des Oberbodens zur Folge hat (BÄUMER 1990) [14]. Durch die Mulchwirtschaft wird bei den meisten Bodentieren die Individuendichte und Artenvielfalt erhöht (BAUCHHENSS 1986, MALKOMES 1994) [12, 137]. Wird ein mäßiger Unkrautbesatz wie bei dem getesteten Verfahren der Unkrautregulierung belassen, so nützt er der Kultur mehr als er schadet. Eine leichte Verunkrautung besitzt sogar günstige Auswirkungen auf die Entwicklung der Kulturpflanze und hat einen positiven Einfluß auf die Verbesserung der Bodenqualität und -güte. Der Oberboden wird durch die Unkrautwurzeln aufgelockert. Die Beschattung durch die Unkrautpflanzen verhindert die Austrocknung durch Sonne und Wind. Damit ergibt sich ein günstiges Mikroklima mit optimalen Bedingungen für die Bodenmikroorganismen, deren Tätigkeit dadurch deutlich ansteigt (FRANZ und KRIEG 1982, HOFMEISTER und GARVE 1998) [62, 86].

Bei der weiteren Entwicklung der Landwirtschaft müssen neben ökonomischen Zielen auch allgemeine Umweltziele und besondere ökologische Ziele bedacht werden. Erreicht werden solche Ziele nur, wenn auch die Produktionsverfahren

zieladäquat entwickelt werden (KNAUER 1991) [107]. Das kombinierte Verfahren der Unkrautregulierung „Bandspritzung plus Einsatz eines Reihenmulchgerätes" dient insbesondere bei Reihenkulturen, die auf erosionsgefährdeten Standorten angebaut werden, der Verminderung von Bodenerosion und Verschlämmung, da der Oberboden durch die Unkrautwurzeln festgehalten und durch den Unkrautmulch bedeckt wird. In welchem Ausmaß der Unkrautmulch eine allelopathische Wirkung im Hinblick auf die Keimhemmung von Unkrautsamen (SCHLEE 1992, HOCK 1995) [173, 82] ausübt, bedarf weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen. Einen weiteren Vorteil dieses Unkrautregulierungskonzeptes stellt die bessere Befahrbarkeit des Bodens bei Pflegemaßnahmen und Erntearbeiten dar, da der Boden im Zwischenreihenbereich durch die aufgewachsenen Unkräuter bedeckt ist. Der Einsatz eines Reihenmulchgerätes stellt eine mechanische Alternative für Mulchsaatbestände dar, die bisher zur Bekämpfung der Unkräuter ganzflächig mit Herbiziden behandelt werden. Somit trägt dieses neue Verfahren der chemisch-mechanischen Unkrautregulierung zur ökologischen Optimierung der Unkrautregulierung im Hinblick auf die Erfüllung der Forderung eines optimalen Boden- und Gewässerschutzes bei und verbessert die standörtliche, systemeigene Nachhaltigkeit (HABER 1994) [71] im Anbau von Reihenkulturen.

7 Verfahrenstechnische Einordnung und Ausblick

Die mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge mit einem Reihenmulchgerät bietet für den Zwischenreihenbereich in landwirtschaftlichen Reihenkulturen eine praktikable Möglichkeit der Unkrautregulierung, verknüpft mit den ökologischen Vorteilen der Minimierung des Herbizidaufwandes auf ein Mindestmaß, der Fixierung von auswaschungsgefährdeten Nährstoffen, der Verminderung der Erosionsgefahr, der Erhöhung der Artenvielfalt sowie einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit. Für eine verfahrenstechnische Einordnung und Beurteilung dieses kombinierten Verfahrens der chemisch-mechanischen Unkrautregulierung sind vor allem arbeitswirtschaftliche und ökonomische Aspekte von Bedeutung.

Die Einsatzgrenzen der Geräte zur Unkrautregulierung sind vom jeweiligen Gerät und von der vorhandenen Bodenart abhängig. Die Bestimmung der verfügbaren Feldarbeitstage erfolgte nach dem von WEBER 1997 [202] beschriebenen Berechnungsmodell, das die Arbeitskategorie „Pflanzen-Pflege" in Anlehnung an AUGTER 1990 [8] und KTBL 2000 [126] differenzierter betrachtet, da sich die Einsatzgrenzen der einzelnen Geräte erheblich voneinander unterscheiden. Dabei ist ein Vergleich des Reihenmulchgerätes mit der bewährten Technik der mechanischen Unkrautregulierung wie der Hackmaschine oder der Reihenfräse und der Weiterentwicklung Trennhacke sowie mit der Pflanzenschutzspritze notwendig. In Tabelle 18 sind die für die Berechnung verwendeten Ober- und Untergrenzen des Feuchtegehalts der obersten Bodenschicht von 0 cm bis 10 cm (Feuchte 10), innerhalb der die Geräte eingesetzt werden können, aufgeführt. Die Obergrenzen orientieren sich an den von AUGTER 1990 [7, 8] festgelegten Obergrenzen für die Durchführbarkeit von Feldarbeiten. Die Untergrenzen für die Hackmaschine, die Reihenfräse und die Trennhacke beruhen auf Erfahrungswerten von WEBER 1992 und 1997 [200, 204]. Da das Reihenmulchgerät mit seinen Werkzeugen nicht im Boden arbeitet, sind ebenso wie bei der Pflanzenschutzspritze nur die Obergrenzen von Bedeutung. Die Obergrenze wurde der der Trennhacke gleichgesetzt, da für den Einsatz eines Reihenmulchgerätes die gleichen Voraussetzungen zutreffend sind.

Tab. 18: Ober- und Untergrenzen des pflanzenverfügbaren Wassers in der Bodenschicht 0 cm bis 10 cm (Feuchte 10) für verschiedene Geräte zur Unkrautregulierung

Boden-klasse	Obergrenze Feuchte 10 in mm				Untergrenze Feuchte 10 in mm			
	Pflanzen-schutz-spritze	Hack-maschine/ Fräse	Trenn-hacke	Reihen-mulch-gerät	Pflanzen-schutz-spritze	Hack-maschine/ Fräse	Trenn-hacke	Reihen-mulch-gerät
leicht	13	10	15	15	0	0	0	0
mittel	20	17	22	22	0	5	5	0
schwer	19	16	21	21	0	8	8	0

Für das Jahr der Feldversuche 1996 sowie auf Basis der Test-Referenzjahre des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES [35] verschiedener Klimaregionen Deutschlands wurde die Anzahl der verfügbaren Feldarbeitstage im Zeitraum der Durchführung der Unkrautregulierung (Monate Mai bis Juli) für die einzelnen Geräte berechnet. Dabei wurden für das Jahr 1996 anhand der Klimadaten der Wetterstation Weihenstephan die Feldarbeitstage, die wegen zu großer Nässe oder wegen zu großer Trockenheit ausgefallen sind, berücksichtigt. In dem sehr regenreichen Frühsommer 1996 (Tabelle A4) sowie in den Referenzjahren des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES [35] für die Region Donaubecken/ Alpenvorland (Tabelle A5), die niederschlagsreiche Region Bodensee (Tabelle A6), die sehr warme Region Oberrheingraben (Tabelle A7) und die trockene Region Franken/Nördliches Baden-Württemberg (Tabelle A8) zeigte sich, daß in den meist sehr niederschlagsreichen Monaten Mai bis Juli die Anzahl der verfügbaren Feldarbeitstage für das Reihenmulchgerät gegenüber der bisherigen Technik zur mechanischen Unkrautregulierung insbesondere auf mittleren bis schweren Böden deutlich erhöht ist. Als Einsatzbedingung muß nur die Befahrbarkeit der Fläche gegeben sein. Wegen zu großer Trockenheit fallen beim Einsatz eines Reihenmulchgerätes keine Feldarbeitstage aus, da die Werkzeuge nicht im Oberboden arbeiten. Somit ist das Verfahren der mechanischen Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge wesentlich witterungsunabhängiger und ermöglicht längere

Einsatzzeiträume und damit eine bessere Auslastung des Reihenmulchgerätes. Dieser längere Einsatzzeitraum ist auch notwendig, da in der Regel zur Erzielung eines optimalen Ertrages der Reihenfrucht ein zweimaliger Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes erforderlich ist. Auch bei der Verwendung von Hackmaschinen, Hackstriegeln und anderen herkömmlichen Geräten zur mechanischen Unkrautregulierung ist dafür ein zwei- oder sogar mehrmaliger Einsatz nötig. Damit in Kombination mit der chemischen Bandspritzung für eine ausreichende Unkrautregulierung nicht drei Arbeitsgänge benötigt werden, sollte aus arbeitswirtschaftlichen Gründen, wie bereits im Zuckerrübenanbau praktiziert, auch im Maisanbau die Bandspritzung mit der Saat zusammengelegt werden. Dadurch kann ein Arbeitsgang eingespart werden. Eine Bandspritzung in Form einer gezielten Herbizidapplikation mittels eines opto-elektronischen Unkrauterkennungssystems (BILLER und SOMMER 1996, HOLLSTEIN und BILLER 1997) [19, 87] - auch wenn dadurch der Aufwand an Herbiziden noch weiter verringert werden könnte - ist wenig sinnvoll, da ein ausreichender Schutz vor Nachkeimern in der Reihe nur durch länger wirkende Bodenherbizide erreicht werden kann.

Bedingt durch die hohen sicherheitstechnischen Anforderungen liegen die Anschaffungskosten für ein 3 m-Reihenmulchgerät (Konzeptstudie Abbildungen 114/115) bei etwa 25000,- DM bis 30000,- DM. Da ein wirtschaftlicher Einsatz eines Reihenmulchgerätes aufgrund der hohen Anschaffungskosten nur in der überbetrieblichen Verwendung liegt, muß der Mindesteinsatzumfang eine bestimmte Einsatzfläche übersteigen. Der erforderliche Mindesteinsatzumfang ME kann auf folgende Weise bestimmt werden:

$$\textit{Mindesteinsatzumfang } ME = fK / [\ddot{u}V - (vK + LA + vSK)] \qquad (4)$$

fK: feste Kosten/Jahr
vK: variable Kosten
üV: Verrechnungssatz für überbetriebliche Maschinenverwendung (z. B. Maschinenring-Verrechnungssatz)
LA: Lohnansatz eigene Arbeit
vSK: variable Kosten des Schleppers

Für ein 3 m-Reihenmulchgerät beträgt bei einer möglichen Flächenleistung am Hang von 1 ha/h der Mindesteinsatzumfang etwa 85 ha/a bis 90 ha/a, wenn für die festen Kosten fK 3900,- DM/a (10 Jahre Nutzungsdauer, Zinssatz: 6 %), die variablen Kosten vK 12,- DM/h, den Lohnansatz LA 25,- DM/h, den überbetrieblichen Verrechnungssatz üV 100,- DM/ha (≙ jährliche Einsatzkosten/ha) und die variablen Kosten des Schleppers vSK 17,- DM/h unterstellt werden. Da meist zwei Behandlungen mit dem Reihenmulchgerät nötig sind, teilt sich diese Einsatzfläche in zweimal 45 ha auf. Bei einer täglichen Einsatzdauer von acht Stunden werden für einen Durchgang fünf bis sechs Tage benötigt. Dies stellt selbst bei Standorten mit sehr schweren Böden hinsichtlich der verfügbaren Feldarbeitstage bei den zwei Einsatzzeiträumen Ende Mai/Anfang Juni und Ende Juni/Anfang Juli (Tabelle A5 bis Tabelle A8) eine ordnungsgemäße Durchführung der Unkrautregulierung mit dem Reihenmulchgerät sicher.

Beim Vergleich der wichtigsten Kenndaten der bewährten Technik zur mechanischen Unkrautregulierung gegenüber der Neuentwicklung Reihenmulchgerät (Tabelle 19) wird deutlich, daß mit dem Einsatz dieses neuen Gerätes ein höherer Investitionsbedarf und auch ein höherer Leistungsbedarf des Schleppers verbunden sind. Zudem sind für das kombinierte Verfahren der Unkrautregulierung im Vergleich zur Flächenspritzung von Herbiziden die Festkosten der Bandspritzeinrichtung von etwa 875,- DM/a bei 5300,- DM Anschaffungskosten (KTBL 1998) [125] zu berücksichtigen. Für eine Praxiseinführung dieses umweltgerechteren Verfahrens der Unkrautregulierung bedarf es deshalb einer Investitionsförderung. Im Rahmen eines Verfahrensvergleichs der Technik der Grünmulchverteilung in Reihenkulturen erwartet sich auch SCHÄFER 1998 [170] von einem modifizierten Kreiselmäher, der wie ein Reihensichelmulchgerät aufgebaut ist, die höchste Schlagkraft und die geringsten Verfahrenskosten. Zudem kann mit dem Arbeitsgang des Mulchens der Unkräuter im Zwischenreihenbereich die Ausbringung der zweiten Stickstoffgabe als Reihendüngung kombiniert werden, so daß sich die Anzahl der Überfahrten zur Bestandesführung nur um eine für den zweiten Einsatz des Reihenmulchers erhöht.

Tab. 19: Kenndaten wichtiger Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen

Eigenschaften	Bewährte Technik				Neuentwicklung
	Hackstriegel	Hackmaschine	Rollhacke	Reihenhackfräse	Reihenmulchgerät
Arbeitsbreite (AB)[1]	3 bis 24 m	3 bis 9 m	3 bis 6 m	3 bis 4,5 m	3 m (bis 4,5 m)
Arbeits-geschwindigkeit	6 bis 9 km/h	4 bis 8 km/h	8 bis 10 km/h	2 bis 5 km/h	5 bis 9 km/h; Zukunft[2]: bis 12 km/h
max. theoretische Flächenleistung (ohne Wende-, Rüst- und Nebenzeiten)	0,9 ha/h·m AB	0,8 ha/h·m AB	0,8 bis 1,0 ha/h·m AB	0,5 ha/h·m AB	0,9 ha/h·m AB Zukunft[2]: bis 1,2 ha/h·m AB
tatsächlich erreichbare Flächenleistung (KTBL 2000) [126]	0,24 bis 0,54 ha/h·m AB	0,24 bis 0,32 ha/h·m AB	0,29 bis 0,53 ha/h·m AB	bis 0,33 ha/h·m AB	0,3 bis 0,5 ha/h·m AB Zukunft[2]: bis 0,8 ha/h·m AB
Rahmenhöhe	50 cm	70 bis 75 cm	70 cm	60 cm	55 bis 75 cm
Verstellung der Arbeitstiefe	Zinkendruck einzeln einstellbar, Stützräder	Stützräder	Stellung der Hacksterne, Stützräder	Fahrgeschwindigkeit, Drehzahl der Fräsrotoren	Schnitthöhe über Stützwalzen oder Stützräder
Arbeitswerkzeuge	halb gefederte Zinken, Gänsefußschare vorschaltbar	gefederte Gänsefußschare, Winkelmesser	abrollende Hacksterne	gewinkelte Fräsmesser	beweglich aufgehängte Schlegel oder Sichelmesser
Schutz der Kultur-pflanzenreihen	Zinken einzeln hochklappbar über Kulturpflanzenreihen	Schutzscheiben oder Schutzbleche	Einstellung der Hacksterne	geschlossene Schutzhaube	geschlossene Schutzhaube
Leistungsbedarf	6 bis 10 kW/m AB	9 bis 10 kW/m AB	12 bis 17 kW/m AB	12 bis 15 kW/m AB	15 bis 22 kW/m AB
Anschaffungspreis * nach Kostenvoranschlag	1300,- bis 2500,- DM/m AB	1700,- bis 3400,- DM/m AB	2600,- bis 3800,- DM/m AB	5000,- bis 6600,- DM/m AB	8500,- bis 10500,- DM/m AB*

[1] Gesamtarbeitsbreite incl. des unbearbeiteten Bereichs in der Kulturpflanzenreihe [2] zukünftig bei berührungsloser automatischer Reihenführung

Derzeit sind mit einem Reihenmulchgerät Vorfahrtsgeschwindigkeiten von 5 km/h bis 9 km/h möglich, so daß hohe Flächenleistungen erbracht werden können. Am Seitenhang wird auch für geübte Fahrer die Geschwindigkeit auf etwa 6 km/h begrenzt bleiben.

Eine Steigerung der Schlagkraft kann über eine größere Arbeitsbreite, die jedoch mit einem wesentlich höheren konstruktiven und damit kostenintensiven Aufwand verbunden ist, oder über eine Steigerung der Vorfahrtsgeschwindigkeit erfolgen. Wenn zukünftig berührungslose automatische Reihenführungssysteme bzw. Lenkeinrichtungen verfügbar werden, kann im Gegensatz zu den Geräten, deren Werkzeuge im Boden arbeiten, die Schlagkraft eines Reihenmulchgerätes noch erheblich gesteigert werden, da bedingt durch das Arbeitsprinzip höhere Vorfahrtsgeschwindigkeiten bis 12 km/h ohne Beeinträchtigung der Arbeitsqualität möglich sind (NAWROTH und ESTLER 1998) [154]. Sie bieten zudem die Möglichkeit, den Fahrer von monotonen und damit ermüdenden Lenkaufgaben bei Pflegearbeiten zumindest über weite Strecken physisch und psychisch zu entlasten (KLEE, RICHTER und HOFMANN 1998) [104] und besonders in Hanglagen die Qualität der geleisteten Arbeit zu erhöhen (VAN ZUYDAM 1992) [215]. Dazu wurden von MEYER und HARTMANN 1999 [144] ein geeigneter Regelkreis und eine Regelungstechnik entwickelt, die eine Bandbreite von ± 1 cm befriedigend einhält. Im Vergleich zu den bisherigen Verfahren führt nach HARTMANN 2000 [78] der Einsatz der automatischen Geräteführung im Modellbetrieb zu ökonomischen Vorteilen. Die Findung von Leitlinien mittels Bildanalyse (MARCHANT 1996) [138] und die Entwicklung eines entsprechenden Steuerprogramms für optoelektronische Systeme (MAUL 2001) [140] stellen für die Einführung berührungsloser Reihenführungssysteme einen vielversprechenden Ansatz im Hinblick auf die Automatisierung der mechanischen Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen dar.

8 Zusammenfassung

In landwirtschaftlichen Reihenkulturen wie Mais oder Zuckerrüben ist aus ökologischen Gründen eine mechanische Unkrautregulierung sinnvoll, da in diesen Kulturen der Anteil der Herbizide an den eingesetzten chemischen Pflanzenschutzmitteln etwa 80 % bis 100 % beträgt. Die bisherigen Geräte zur mechanischen Unkrautregulierung wie z. B. die Hackmaschine arbeiten mit ihren Werkzeugen in der obersten Bodenschicht. Der Eingriff in den Boden hat jedoch zwei Nachteile: Zum einen werden durch die Bodenbearbeitung günstige Keimbedingungen für das Auflaufen neuer Unkräuter geschaffen. Zum anderen wird durch die Lockerung des Oberbodens in Hanglagen die Bodenerosion verstärkt gefördert. Aus diesen Gründen ist eine mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge erforderlich. Hieraus ergaben sich zwei Fragen:

1. Wie können Unkräuter und Ungräser durch eine mechanische Schädigung des Sprosses wirkungsvoll und nachhaltig im Wachstum reguliert werden?
2. Kann durch eine mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge der Unkrautaufwuchs so reguliert werden, daß er nur noch eine tolerierbare Konkurrenz zur Kulturpflanze darstellt und keine Ertragseinbußen zu befürchten sind?

In grundlegenden Prüfstandsversuchen wurden die Arbeitsprinzipien Abschneiden, Abschlegeln und Entlauben, die nur den Sproß der Unkräuter schädigen, auf ihre nachhaltige unkrautregulierende Wirkung getestet. Dazu wurden Original-Leitunkräuter des Hackfruchtanbaus unter Freilandbedingungen in Multitopfplatten kultiviert. Um das Spektrum unterschiedlicher Wuchshöhen abzudecken, wurden die Versuche mit *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Chenopodium album* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., *Solanum nigrum* L. und *Stellaria media* (L.) Vill. durchgeführt. Die Behandlung der Testpflanzen erfolgte in den zwei Wuchsstadien 10 cm und 20 cm Wuchshöhe unter definierten Bedingungen mit einem schienengebundenen Versuchsgerät bei einer Geschwindigkeit von 8 km/h. Die Abtrennhöhe über der Bodenoberfläche betrug 20 mm bzw. 50 mm. Der Regulierungserfolg und der Wiederaufwuchs wurde bis 20 Tage nach der Behandlung beobachtet und anhand der Parameter Wuchshöhe, abgedeckte

Bodenoberfläche, Anzahl der Blätter, Blattfläche, Anzahl der Triebe sowie der aufgewachsenen Trockenmasse bonitiert. Dabei stellte sich heraus, daß nur die Arbeitsprinzipien Abschneiden und Abschlegeln bei einer Schnitthöhe von 20 mm einen nachhaltigen Regulierungserfolg garantieren. Zwischen dem Abschneiden und dem Abschlegeln wurden in der Regel keine signifikanten Unterschiede gefunden. Der Einsatz eines abschlegelnden Werkzeugs mit einer stumpfen Schneide eignet sich besser zur Schaffung einer großen Wundoberfläche. Mit dem Entlaubungsrotor war keine nachhaltige Unkrautregulierung erzielbar. Hinsichtlich des Wuchsstadiums ist bei den dicotylen Unkräutern das frühe Wuchsstadium von 10 cm zu bevorzugen. Monocotyle sind besser im Wuchsstadium 20 cm regulierbar, da sonst die Bestockung zu sehr gefördert wird.

Die Erkenntnisse der Prüfstandsversuche wurden in Feldversuchen im Mais (*Zea mays* L.) an vier Standorten in der Region Freising (Südbayern), die sich durch unterschiedliche Ackerunkrautgesellschaften auszeichneten, überprüft. Bei einem Standort handelte es sich um eine Mulchsaat. Zur Durchführung der Versuche wurde ein Reihen-Unkraut-Mulchgerät RWM als 3-reihiges Versuchsgerät entwickelt und in Kombination mit einer Bandspritzung getestet. Das Reihenmulchgerät war als Sichelmulcher für den Frontanbau konzipiert und mit abschlegelnden Werkzeugen ausgerüstet. Die Einsatzgeschwindigkeit betrug 6 km/h.

Das Verfahren der chemisch-mechanischen Unkrautregulierung bestand aus zwei getrennten Arbeitsgängen. Im 2- bis 4-Blatt-Stadium des Mais erfolgte die Bandspritzung (Bandbreite 20 cm) und im 4- bis 10-Blatt-Stadium wurde im Zwischenreihenbereich die aufgewachsene Verunkrautung einmal bzw. zweimal mit dem Reihenmulchgerät behandelt. Im Vergleich zur Kontrollvariante (nur Bandspritzung) und zur ganzflächigen Herbizidanwendung wurde die Unkraut- und Maisentwicklung anhand der Parameter Unkrautdeckungsgrad (UKDG), Unkrauttrockenmasse, Anteil der einzelnen Unkrautarten am UKDG und Wuchshöhe von Mais und Unkräutern bis zur Ernte untersucht. Zudem wurde der prozentuale Regulierungserfolg für den Unkrautdeckungsgrad und die Unkrauttrockenmasse sowie der Kornertrag des Mais ermittelt.

Die Kombination von Bandspritzung und Reihen-Unkraut-Mulchgerät erreichte bei einmaligem Einsatz des Reihenmulchgerätes (RWM 1x) fast das Ertragsniveau der Herbizidvariante. Bei zweimaligem Einsatz des Reihenmulchgerätes (RWM 2x) wurde sogar ein signifikant höherer Kornertrag erzielt. In den Varianten RWM 1x und RWM 2x ließen sich direkt nach der Behandlung Regulierungserfolge für den Unkrautdeckungsgrad von 69 % bis 77 % und für die Unkrauttrockenmasse von 73 % bis 88 % realisieren. Die zweite Behandlung mit dem Reihenmulchgerät konnte die Unkrauttrockenmasse nur um 36 % bis 51 % reduzieren. Beim Reihenschluß des Mais übertraf die Variante RWM 2x mit 60 % Regulierungserfolg für den Unkrautdeckungsgrad knapp die Herbizidvariante. Die Variante RWM 1x erreichte nur die Hälfte. Hinsichtlich des Regulierungserfolges bei der Unkrauttrockenmasse verzeichnete zu diesem Zeitpunkt die Variante RWM 2x mit etwa 88 % vor der Herbizidvariante mit 80 % das beste Ergebnis. Im Bereich der Schlepperspur wurden tendenziell höhere Regulierungserfolge ermittelt. Nach der Behandlung lag der Unkrautdeckungsgrad meist bei 10 % bis 20 %. Zudem war in den Varianten RWM 1x und RWM 2x die Artenvielfalt der Verunkrautung im Vergleich zur Herbizidvariante deutlich erhöht.

Damit konnte nachgewiesen werden, daß die mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge in landwirtschaftlichen Reihenkulturen eine praktikable Möglichkeit der Unkrautregulierung bietet verknüpft mit ökologischen Vorteilen wie der Reduzierung des Herbizidaufwands um über 70 %, der Verminderung der Erosionsgefahr, der Fixierung von auswaschungsgefährdeten Nährstoffen, der Erhöhung der Artenvielfalt sowie einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und Befahrbarkeit der Flächen. Für erosionsgefährdete Hanglagen und Mulchsaatbestände wurde mit diesem neuen Verfahren eine Alternative zum ganzflächigen Herbizideinsatz geschaffen.

Das Reihenmulchgerät benötigt einen Leistungsbedarf von 15 kW/m AB bis 22 kW/m AB und besitzt einen Investitionsbedarf von etwa 9500,- DM/m AB. Der Mindesteinsatzumfang eines 3 m-Reihenmulchgerätes liegt bei ca. 90 ha/a. Daher ist nur ein überbetrieblicher Einsatz sinnvoll. Da die Arbeit der Werkzeuge nicht von der Bodenfeuchte abhängt, ist der Einsatz im Vergleich zur bisherigen Technik

witterungsunabhängiger. Zukünftig kann durch automatische Reihenführungssysteme die Schlagkraft des Reihenmulchgerätes noch deutlich gesteigert werden, da das Arbeitsprinzip Vorfahrtsgeschwindigkeiten bis 12 km/h bei gleicher Arbeitsqualität ermöglicht. Das neue Verfahren der Unkrautregulierung mit dem hierzu entwickelten Reihenmulchgerät stellt somit eine zukunftsweisende Lösung für eine effektive Regulierung von Unkräutern und Ungräsern dar, die zudem den Anbau von landwirtschaftlichen Reihenfrüchten ökologisch optimiert.

9 Summary

In agricultural row crops as maize or sugar beets a mechanical weed regulation makes good ecological sense, as in these cultures 80 % to 100 % of all chemical pesticides are herbicides. The available implements for the mechanical weed regulation, e. g. the hoe, work with their tools in the topsoil. However, the soil intervention has two negative disadvantages: Optimal conditions are prepared for new weed germination and emergence. In row crops cultivated on slopes the soil erosion by water is very much advanced. A mechanical weed regulation without intervention in soil texture is required. Two questions resulted from this:

1. How can weed growth be suppressed by mechanical damage of shoots effectively and sustainable?
2. Can weeds be thus controlled with a mechanical weed regulation without intervention in the upper soil layer, that it is in a tolerable competition to culture and no loss of yield is to be feared?

Alternative techniques are the exactly cutting, flailing and defoliating by stripping, which only damage the weed shoots. In basic test bench experiments the effects of these damaging principles were tested with a railbound vehicle at a rate of 8 km/h with very important weeds and grass weeds in row crops as *Agropyron repens* (L.) Beauv., *Amaranthus retroflexus* L., *Chenopodium album* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., *Solanum nigrum* L. and *Stellaria media* (L.) Vill. with 10 cm and 20 cm of growth height and at 2 cm and 5 cm separating height, respectively. The success of regulation and regrowth, which was controlled until 20 days after treatment, is shown by different parameters as growth height, covered soil area, number of leaves, leaf area, number of tillers and grown dry matter. The best success was obtained by cutting height of 20 mm in weed cutting or flailing. Between cutting and flailing no significant difference was found as a rule. A blunt cutting edge by flailing is better for a large area of cut wound surface. An effective weed regulation couldn't be achieved by technical stripping. Dicotyledon weeds can be controlled better at 10 cm growth height. Monocotyledons can be regulated preferably at 20 cm growth height, otherwise tillering is too much supported.

The findings of test bench experiments were examined in field trials in *Zea mays* L. at four locations in the region of Freising (South-Bavaria) with different arable weed communities. One location of these was sawn in mulch of *Sinapis alba* L. For the performance of these experiments a row-weed-mulcher RWM as 3-row test implement was developed and tested in combination with herbicide band spraying. The row mulcher was designed as a front-mounted rotor mower with flailing tools. In action the speed was 6 km/h. The technique of chemical-mechanical weed control consisted of two separate work cycles. In BBCH 12/13 of corn band spraying (range 20 cm) was done. The weeds in the interrow space were treated with the row mulcher in BBCH 14 to BBCH 35 once or twice. Compared to the control variant (band spraying only) and to area herbicide spraying growing of maize and weeds was examined by parameters of weed cover, weed dry matter, share of individual weed species of weed cover, growth height of maize and weeds till harvest. Moreover, the percentage regulation success for weed cover and weed dry matter as well as grain yield was determined.

The comparison with area spraying of herbicide showed, that the combination of row spraying and row-weed-mulcher after single use of the row mulcher (RWM 1x) almost reached the yield level and even a significantly higher grain yield could be obtained after repeated use (RWM 2x). Directly after the treatment in the variants RWM 1x and RWM 2x the success of reducing of weed cover was 69 % to 77 % and of weed dry matter 73 % to 88 %. In BBCH 36 the variant RWM 2x got regulation success of weed cover with about 60 % and of weed dry matter with about 88 %, as the best result before herbicide variant. In the area of the wheel mark higher success was determined tendentially. After treatment the weed cover was mostly at 10 % to 20 %. In the variants RWM 1x and RWM 2x a higher rich flora was observed.

This new method is a practical possibility for the ecological optimizing of weed regulation in row crops to reduce the herbicide use by more than 70 %, to diminish the erosion on slopes, to fixing of erosion endangered nutrients by weeds, to increase soil fertility and trafficability of the areas. An alternative to area spraying was made for row crops in conservation tillage systems sowed in mulch. The row mulcher

requires a power rating of 15 kW/m width to 22 kW/m width and approximately 9500,- DM/m width are requested as capital investment. That is why for an economic use of a 3 m-row mulcher an area of about 90 hectare is most suitable. Therefore only an use in cooperation makes sense. As the work of the tools does not depend on soil conditions, use in comparison to the former technique is less dependent from weather. Area work can still be increased in future by automatic guidance systems as the work principle allows a speed up to 12 km/h at same work quality. Therefore this new method of weed control with a row-weed-mulcher is a solution for an effective weed control point to the future and moreover in cultivation of agricultural row crops, it is an ecological improvement.

10 Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] **Ammon, H. U.; C. Bohren und T. Anken**: Breit-Frässaat von Mais in Wiesen und Zwischenfrüchte. - In: Landwirtschaft Schweiz, Band 3 (1990), Nr. 3, S. 121-124.

[2] **Andow, D. A.**: Management of Weeds for Insect Manipulation in Agroecosystems. - In: Altieri, M. A. und M. Liebman (Eds.): Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1988, Chap. 16, S. 265-302.

[3] **Anken, T.; H. U. Ammon; C. Bohren; H. Ryter und W. Sturny**: „Maiswiese" - Konzept für einen umweltschonenden Maisanbau. Lindau (Schweiz): LBL, UFA-Revue 3 (1993), 4 S.

[4] **Ascard, J.**: Inter-row cultivation in carrots: the effect on yield of hoeing and brush weeding. - In: Communications of the fourth international conference I.F.O.A.M.: Non chemical weed control, Dijon, France, July 5-9, 1993, S.321-325.

[5] **Auerswald, K. und F. Schmidt**: Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern - Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. München: Bayerisches Geologisches Landesamt, GLA Fachberichte Nr. 1, 1986, 74 S.

[6] **Auerswald, K. und M. Kainz**: Verminderung der Bodenerosion im Maisanbau. - In: Mais 17 (1989), Nr. 2, S. 24-26.

[7] **Augter, G.**: Ermittlung verfügbarer Feldarbeitstage aus Klimabeobachtungen. Darmstadt: KTBL, 1990, 16 S.

[8] **Augter, G.**: Neue Daten zu verfügbaren Feldarbeitstagen. - In: Landtechnik 45 (1990), S. 305-307.

[9] **Backhaus, K.; B. Erichson; W. Plinke und R. Weiber**: Multivariate Analysemethoden. Berlin: Springer-Verlag, 1990, 6. Auflage, 416 S.

[10] **Barker, V. und L. E. Craker**: Inhibition of Weed Seed Germination by Microwaves. - In: Agronomy Journal 83 (1991), Nr. 2, S. 302-305.

[11] **Bätz, G.; H. Dörfel; A. Fuchs und E. Thomas**: Einführung in die Methodik des Feldversuchs. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1987, 2. Aufl., 327 S.

[12] **Bauchhenss, J.**: Die Bodenfauna landwirtschaftlich ngenutzter Flächen. Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (Laufen): Laufener Seminarbeiträge, 1986, Heft 7, S. 18.

[13] **Baumann, D. T.**: Mechanical weed control with spring tine harrows (weed harrows) in row crops (Desherbage mecanique avec les herses canadiennes dans le cultures sacrlees). - In: Proceedings: Ixème colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon, 16.-18. septembre 1992. Hrsg.: Dijon, Paris ANPP 1992, S. 123-128.

[14] **Bäumer, K.** : Probleme bei der Gestaltung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. - In: Dierks, R. und R. Heitefuss (Hrsg.): Integrierter Landbau: Systeme umweltbewußter Pflanzenproduktion. München: BLV-Verlag, 1990, S. 51-60.

[15] **Bertram, A.**: Wärmeübergang und Pflanzenschädigung bei der thermischen Unkrautbekämpfung. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV (1994), S. 273-280.

[16] **Biller, R. H. und J. Brunotte**: Häcksler-Werkzeuge im Vergleich. - In: Landtechnik 50 (1995), Nr. 3, S. 136-137.

[17] **Biller, R. H. und J. Brunotte**: Pflege stillgelegter Flächen - Maschinen, Werkzeuge, Arbeitseffekte, Leistungsbedarf. - In: Agrartechnische Forschung 1 (1995), Nr. 2, S. 153-159.

[18] **Biller, R. H. und J. Brunotte**: Pflege stillgelegter Flächen. - In: Landtechnik 52 (1997), Nr. 4, S. 184-185.

[19] **Biller, R. H. und C. Sommer**: Optoelektronik zur Unkrauterkennung - Erste Ergebnisse und Erfahrungen beim Test unter simulierten Bedingungen und beim Einsatz auf Versuchsflächen. - In: VDI-Berichte 1297 (1996), S. 103-106.

[20] **Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) (Hrsg.)**: Bewertung von Pflanzenschutzmitteln im Zulassungsverfahren. Berlin: Paul Parey Verlag, Mitteilungen aus der BBA, Heft 284, 1992, 141 S.

[21] **Börner, H.**: Unkrautbekämpfung. Jena: G. Fischer Verlag, 1995, 315 S.

[22] **Boysen, P.**: Belastung der Gewässer durch Bodennutzung, insbesondere durch Düngung. - In: Berichte über die Landwirtschaft: Beachtung ökologischer Grenzen bei der Landbewirtschaftung, 197. Sonderheft, Hamburg: Verlag Paul Parey 1981, S. 146-151.

[23] **Bramm, A.**: Einfluß der Landbewirtschaftung auf die Gewässerqualität. - In: Berichte über die Landwirtschaft: Beachtung ökologischer Grenzen bei der Landbewirtschaftung. 197. Sonderheft, Hamburg: Verlag Paul Parey 1981, S.162-185.

[24] **Brautlecht, F.-J.**: Pflanzenschutzmitteleinträge in Gewässer durch Hofabläufe - Untersuchungsergebnisse und Vorschläge zur Vermeidung. - In: Mantau, R.: Kooperation Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Stevereinzugsgebiet, Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe (Kreisstelle Coesfeld) 1992, S. 31-34.

[25] **Brunotte, J. und R. H. Biller**: Maschinen und Geräte zur Bewirtschaftung stillgelegter Flächen. - In: Zuckerrübe 1994, Nr. 6, S. 362-366.

[26] **Brunotte, J.; B. Winnige; M. Frielinghaus und C. Sommer**: Der Bodenbedeckungsgrad - Schlüssel für die gute fachliche Praxis im Hinblick auf das Problem Bodenabtrag in der pflanzlichen Produktion. - In: Bodenschutz 4 (1999), Nr. 2, S. 57-61.

[27] **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.)**: Bodenkundliche Kartieranleitung. Information aus den Bund-/Länder-Arbeitsgruppen der Geologischen Dienste, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, Hannover 1996. Stuttgart: E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung (in Kommission), 4. Aufl., Berichtigter Nachdruck, 1996, 392 S.

[28] **Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung** vom 12. Juli 1999, BGBl. I 1999, Nr 36, S. 1554-1582.

[29] **Ceynova, J.**: Spannungsfeld chemischer Pflanzenschutz - Wasserschutz. - In: Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel 71 (1989), S. 49-57.

[30] **Cheng, H. H.**: Pesticides in the Soil Environment - An Overview. - In: Cheng, H. H. (Hrsg.): Pesticides in the Soil Environment: Processes, impacts, and modeling. Madison, Wisconsin (USA): Soil Science Society of America, Book Series 2, 1990, S. 1-5.

[31] **Dallal, G. E. und L. Wilkinson**: An analytic approximation to the distribution of Lilliefor's test statistic for normality. - In: The American Statistician 40 (1986), S. 294-295.

[32] **David, H. A.; H. O. Hartley und E. S. Pearson**: The distribution of the ratio, in a single normal sample of range to standard deviation. - In: Biometrika 41 (1954), S. 482-493.

[33] **Demmel, M.**: Analytische und modellhafte Ableitung der Anforderungen an Schlepperkonzepte der Pflege- und Verteilarbeiten. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 309, Dissertation, Institut für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, 1997, 220 S.

[34] **Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)**: Ökotoxikologie von Pflanzenschutzmitteln. Sachstandsbericht. Weinheim: VCH-Verlag, 1994, 414 S.

[35] **Deutscher Wetterdienst**: Test-Referenzjahre. Frankfurt: Deutscher Wetterdienst, 1984.

[36] **Deutscher Wetterdienst Freising-Weihenstephan**: Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern. Wetterstation Weihenstephan: April - Oktober 1996.

[37] **Deutsches Institut für Normung**: DIN 10 360: Bestimmung des Trockemmassegehaltes von tiefgefrorenem oder durch Hitzesterilisation haltbar gemachtem Spinat. 1972.

[38] **Deutsches Institut für Normung**: DIN 81 20: Begriffe im Waagenbau, Benennungen und Definitionen von Waagen. 1981.

[39] **Deutsches Institut für Normung**: DIN 50 011: Klimaprüfeinrichtungen - Klimagrößen: Luftfeuchte und Lufttemperatur. 1991

[40] **Dierauer, H.-U. und H. Stöppler-Zimmer**: Unkrautregulierung ohne Chemie. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1994, 134 S.

[41] **Dierks, R.**: Alternativen im Landbau - Eine kritische Gesamtbilanz. Stuttgart: Ulmer-Verlag, 1986, 2. Aufl., 379 S.

[42] **Dierks, R.**: Brauchen wir neue Wege im Pflanzenschutz? - In: Hoffmann, M. und B. Geier (Hrsg.): Beikrautregulierung statt Unkrautbekämpfung. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller GmbH 1989, Alternative Konzepte 58, S. 15-40.

[43] **Diez, T.**: Vermeiden von Erosionsschäden. AID-Heft 108, Hrsg.: Bonn: Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AID) e. V. 1982, 36 S.

[44] **Dobler, K.**: Der freie Schnitt beim Mähen von Halmgut. Hohenheimer Arbeiten, Reihe: Agrartechnik, Heft 62, Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1972, 85 S.

[45] **Dobler, K.**: Grundlegende Untersuchungen über den freien Schnitt bei Halmgut. - In: Grundlagen der Landtechnik 23 (1973), Nr. 2, S. 54-56.

[46] **Ehlert, D. und D. Kraut**: Eignung landwirtschaftlicher Mähtechnik für die Landschaftspflege. - In: Bornimer Agrartechnische Berichte, 1994, Nr. 4, S. 55-64.

[47] **van Eimern, J.**: Klima - In: Wittmann, O.: Standortkundliche Bodenkarte von Bayern 1 : 25 000, Hallertau, München: Bayerisches Geologisches Landesamt (Hrsg.) 199 S., 1981, S. 18-19.

[48] **Emerson in Blatchley, W. S.**: The Indiana Weed Book. Nature Publishing Company, Indianapolis, Indiana, 1912, 191 S.

[49] **Englert, G.**: Stoff-, Energie- und Informationsströme – Anwendung der Systemtechnik in der landwirtschaftlichen Verfahrenstechnik. Hrsg.: Landtechnik Weihenstephan. Freising: Selbstverlag, 1997, 72 S. (Landtechnik-Bericht 27).

[50] **Estler, M.**: Schare rücken dem Unkraut zu Leibe – Mais entwickelt sich wieder zu einer Hackfrucht. - In: Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 175 (1985), Nr. 18, S. 22-24.

[51] **Estler, M.**: Mechanische Unkrautregulierung - Möglichkeiten und Grenzen. Frankfurt: DLG-Manuskript, DLG-Fachbereich Landtechnik, Ausschuß für Technik in der pflanzlichen Produktion, Februar 1988, 31 S.

[52] **Estler, M.**: Aktuelle landtechnische Aspekte der Unkrautbekämpfung. - In: Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, Hrsg.: Landtechnik Weihenstephan. Freising: Selbstverlag, 1989, Nr. 1, S. 47-55.

[53] **Estler, M.**: Landtechnische Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion beim Anbau von Reihenfrüchten in Hanglagen. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, „Gelbes Heft" Nr. 31, 1990, 29 S.

[54] **Estler, M.**: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von physikalischen Maßnahmen.- In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.): Umweltschonender Pflanzenschutz in der Landwirtschaft, KTBL-Arbeitspapier 150, 1991, S. 39-57.

[55] **Estler, M.**: Neue Gesamtkonzepte zur mechanischen Unkrautregulierung. - In: Mechanische Unkrautregulierung, KTBL-Arbeitspapier 222, Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V., Darmstadt, 1995, S. 25-30.

[56] **Estler, M. und H. Kees**: Mechanische Verfahren mit und ohne Bandspritzung. - In: Agrar-Übersicht 43 (1992), Nr. 4, S. 26-29.

[57] **Estler, M. und P. Nawroth**: Mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge. - In: Landtechnik 50 (1995), Nr. 3, S. 142-143.

[58] **Estler, M.; L. Resch; H. Kees und A. Lutz**: Kombinierte mechanisch-chemische Unkrautbekämpfung im Mais - mehrjährige Versuchserfahrungen aus Bayern. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIII (1992), S. 637-646.

[59] **Estler, M. und J. Sedlmeier**: Mechanische Unkrautregulierung - Möglichkeiten und Grenzen. Frankfurt: DLG-Arbeitsunterlagen, DLG-Fachbereich Landtechnik, Ausschuß für Technik in der pflanzlichen Produktion, Ausschuß für Arbeitswirtschaft und Prozeßtechnik, November 1993, 30 S.

[60] **Fischer-Schlemm, W. E. und O. Eggert**: Der Einfluß des Häckselmesserwatenwinkels auf die Schneidhaltigkeit von Mähmesserklingen. - In: Grundlagen der Landtechnik, Heft 5 (1953), S. 117-119.

[61] **Frank, R.; H. E. Braun; M. van Hove Holdrinet; G. J. Sirons und B. D. Ripley**: Agriculture and Water Quality in the Canadian Great Lakes Basin: V. Pesticide Use in 11 Agricultural Watersheds and Presence in Stream Water, 1975-1977. - In: Journal of Environmental Quality 11 (1982), Nr. 3, S. 497-505.

[62] **Franz, J. M. und A. Krieg**: Biologische Schädlingsbekämpfung. Berlin: Verlag Paul Parey, Pareys Studientexte 12, 1982, 222 S.

[63] **Frede, H.-G. und M. Bach**: Stoffbelastungen aus der Landwirtschaft. - In: H.-P. Wodsak (Hrsg.): Belastungen der Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft - gemeinsame Lösungsansätze zum Gewässerschutz. Wissenschaftliche Arbeitstagung des Dachverbandes der Wissenschaftlichen Gesellschaft der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung in Bonn, 24. - 25. März, 1993, 244 S. Frankfurt/M.: DLG-Verlag, Schriftenreihe Agrarspectrum, Band 21, 1993, S. 34-46.

[64] **Gasparetto, E.**: Ricerche sul táglio die foraggi eseguite a mezzo delle cinematografia ultraveloce (Use of high-speed movies for research on forage harvesting devices). - In: Macchine e Motoro Agricoli 27 (1969), Nr. 8, S. 72-79.

[65] **Gasparetto, E.; P. Febo; D. Pessina und E. Rizzato**: High speed movie observation of an axial flow flow combine harvester cylinder. – In: Dodd, V. A. und P. M. Grace (Hrsg.): Agricultural Engineering, Volume 3: Agricultural Mechani-sation, Proceedings: 11th International Congress On Agricultural Engineering Dublin, Sept. 4-8, 1989. Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema 1989, S. 1935-1942.

[66] **Gesetz zum Schutz des Bodens/Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz)** vom 17. März 1998, BGBl. I 1998, Nr. 16, S. 502-510.

[67] **Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz)** vom 14. Mai 1998, (BGBl. I 1998, S. 971, ber. 1527), BGBl. III 7823-5.

[68] **Geyer, M.; J. Wittrock und J. Meyer**: Mechanische Unkrautbekämpfung im Gemüsebau. - In: Deutscher Gartenbau 45 (1991), Nr. 1, S. 942-945.

[69] **Gliessman, S. R.**: Ecology and Management of Weeds in Traditional Agroecosystems. - In: Altieri, M. A. und M. Liebman (Eds.): Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1988, Chap. 14, S. 237-244.

[70] **Haber, W.**: Anforderungen an umweltgerechte Agrarökosysteme der Zukunft. - In: Knauer, N. et al. (Vorstand des Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst- Ernährungs- und Veterinär- und Umweltforschung) (Hrsg.): Umweltgerechte Agrarproduktion: Schutzkonzepte zur Vermeidung negativer Wirkungen synthetischer und natürlicher Betriebsmittel bzw. landwirtschaftlicher Produktionsrückstände auf Ökosysteme. Frankfurt/M.: DLG-Verlag, Schriftenreihe Agrarspektrum Band 18, 1991, S. 19-30.

[71] **Haber, W.**: Nachhaltige Entwicklung aus ökologischer Sicht. - In: ZAU 7 (1994), Nr. 4, S. 9-13.

[72] **Haber, W. und J. Salzwedel**: Umweltprobleme der Landwirtschaft. Sachbuch der Ökologie, Stuttgart: Metzler-Poeschel, 1992, 176 S.

[73] **Hack, H.; H. Bleiholder; L. Buhr; U. Meier; U. Schnock-Fricke; E. Weber und A. Witzenberger**: Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dicotyler Pflanzen - Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein. - In: Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst, 44 (1992), Nr.12, S. 265-270.

[74] **Häckel, H.**: Meteorologie. Stuttgart: Ulmer-Verlag, UTB 1338, 1990, 402 S.

[75] **Hamm, A. (Hrsg.)**: Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Sankt Augustin: Academia Verlag, 1991, 830 S.

[76] **Hamm, A.**: Problembereich Nährstoffe aus wasserwirtschaftlicher Sicht. - In: H.-P. Wodsak (Hrsg.): Belastungen der Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft - gemeinsame Lösungsansätze zum Gewässerschutz. Wissenschaftliche Arbeitstagung des Dachverbandes der Wissenschaftlichen Gesellschaft der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung in Bonn, 24. - 25. März, 1993, 244 S. Frankfurt/M.: DLG-Verlag, Schriftenreihe Agrarspectrum, Band 21, 1993, S. 11-21.

[77] **Hanf, M.**: Ackerunkräuter Europas mit ihren Keimlingen und Samen. München: BLV-Verlag, 1990, 496 S.

[78] **Hartmann, P.**: Berührungslose Höhen- und Seitenführung von Traktoranbaugeräten in Beetkulturen. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 352, Dissertation, Institut für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, 2000, 177 S.

[79] **Heitefuss, R.**: Begriffsbestimmungen zum Integrierten Landbau. - In: Dierks, R. und R. Heitefuss(Hrsg.): Intergrierter Landbau. München: BLV-Verlag, 2. Aufl., 1994, S. 15-18.

[80] **Hepting, C.**: Empfehlungen für das Hacken von Mais. - In: Kuhlmann, J.: Welche Mittel sind noch zugelassen?, dlz 42 (1991), Nr. 2, S. 61.

[81] **Himel, D. M.; H. Loats und G. W. Bailey**: Pesticides Sources to the Soil and Principles of Spray Physics. - In: Cheng, H. H. (Hrsg.): Pesticides in the Soil Environment: Processes, impacts, and modeling. Madison, Wisconsin (USA): Soil Science Society of America, Book Series 2, 1990, S. 7-50.

[82] **Hock, B.**: Allelopathie. - In: Hock, B. und E. F. Elstner (Hrsg.): Schadwirkungen auf Pflanzen. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1995, 3. Aufl., S. 284-291.

[83] **Hoffmann, M.**: Mechanische Unkrautbekämpfung. - In: Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft RKL (Hrsg.): Sonderdruck aus der Kartei für Rationalisierung 4.1.1.3.1, Kiel: 1991, S. 315-376.

[84] **Hoffmann, G. M.; F. Nienhaus; H.-M. Poehling; F. Schönbeck; H. C. Weltzien und H. Wilbert(†)**: Lehrbuch der Phytomedizin. Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag, 1994, 3. Aufl., 542 S.

[85] **Hofmeister, H. und E. Garve**: Lebensraum Acker - Pflanzen der Äcker und ihre Ökologie. Hamburg: Verlag Paul Parey, 1986, 272 S.

[86] **Hofmeister, H. und E. Garve**: Lebensraum Acker. Berlin: Pareys Buchverlag im Blackwell Wissenschaftsverlag, 1998, 322 S.

[87] **Hollstein, A. und R. H. Biller**: Erkennung und gezielte Kontrolle von Unkraut - Weiterentwicklung eines optoelektronischen Systems. - In: Landtechnik 52 (1997), Nr. 6, S. 292-293.

[88] **Hoof, U. und C. Schlett**: Kooperativer Gewässerschutz im Münsterland - Pflanzenschutzmittelausträge aus Punktquellen. Staatliches Umweltamt Münster, 1995, 15 S.

[89] **Hurle, K.**: Unkraut und Unkrautbekämpfung - veränderte Perspektiven. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV (1994), S. 17-22.

[90] **Hurle, K.**: Rationale Unkrautbekämpfung - Konzepte und Perspektiven. - In: Auernhammer, H. und P. Nawroth (Hrsg.): Maisanbau 2000. Freising: Landtechnik Weihenstephan, Landtechnik Schrift Nr. 8, 1997, S. 97-101.

[91] **Hurle, K. und A. Kemmer**: Bekämpfung von Unkräutern im Mais. - In: Gemeinschaftsversuche Baden-Württemberg 1987/1988, (1988), S. 46-51.

[92] **Hurle, K.; S. Lang und J. Kirchhoff**: Gewässerbelastung durch Pflanzenschutzmittel. - In: H.-P. Wodsak (Hrsg.): Belastungen der Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft - gemeinsame Lösungsansätze zum Gewässerschutz. Wissenschaftliche Arbeitstagung des Dachverbandes der Wissenschaftlichen Gesellschaft der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung in Bonn, 24. - 25. März, 1993, 244 S. Frankfurt/M.: DLG-Verlag, Schriftenreihe Agrarspectrum, Band 21, 1993, S. 47-65.

[93] **Industrieverband Agrar e. V. (IVA) (Hrsg.)**: Jahresbericht 1999/2000. Frankfurt/M., 2000, 32 S.

[94] **Irmer, U.; R. Wolter und C. Kussatz**: Problembereich Pflanzenschutzmittel aus wasserwirtschaftlicher Sicht. - In: H.-P. Wodsak (Hrsg.): Belastungen der Oberflächengewässer aus der Landwirtschaft - gemeinsame Lösungsansätze zum Gewässerschutz. Wissenschaftliche Arbeitstagung des Dachverbandes der Wissenschaftlichen Gesellschaft der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung in Bonn, 24. - 25. März, 1993, 244 S. Frankfurt/M.: DLG-Verlag, Schriftenreihe Agrarspectrum, Band 21, 1993, S. 22-33.

[95] **Jedicke, E.**: Praktische Landschaftspflege. Stuttgart: Ulmer-Verlag, 1993, 280 S.

[96] **Johnston, R. C. R.**: Crop behavoir during mowing. - In: Journal of Agricultural Engineering Research 1959, S. 193-203.

[97] **Jones, P. A.; A. M. Blair und J. H. Orson**: The effect of different types of physical damage to four weed species. - In: Proceedings: Brighton Crop Protection Conference - Weeds, Brighton (England), Nov. 20. - 23., 1995 Volume 2; S. 653-658.

[98] **Jones, P. A.; A. M. Blair und J. H. Orson**: Mechanical damage to kill weeds. - In: Brown, H.; G. W. Cussans, M. D. Devine; S. O. Duke; C. Fernandez-Quintanilla; A. Helweg; R. E. Labrada; M. Landes; P. Kudsk and J. C. Streibig (eds.): Statens Planteavlsforsveg, Flakkebjerg (Denmark), Proceedings: 2nd International Weed Control Congress Copenhagen. 3. Slagelse SP, June 25 - 28, 1996, S. 949 - 954.

[99] **Kanafojski, C.**: Arten und Methoden des Schneidens homogener Stoffe und Pflanzen. - In: Kanafojski, C.: Halmfrucht-Erntemaschinen (Übersetzung aus dem Russischen von Krutikow, N. P. et al.: Teorija, konstrukcija rasčet sel´skochozjajstvennych mašin). Berlin: VEB Verlag Technik, 1961, S.12-21.

[100] **Kees, H.**: Unkräuter und ihre Bedeutung. - In: Kees, H.; E. Beer; H. Bötger; W. Garburg; G. Meinert und E. Meyer: Unkrautbekämpfung im Integrierten Pflanzenschutz. Frankfurt: DLG-Verlag, 5. Aufl., 1993, S. 15-21.

[101] **Kees, H. und M. Zellner**: Maisunkräuter auch mechanisch regulieren. - In: Pflanzenschutz-Praxis 1994, Nr. 2, S. 10-14.

[102] **Kirchgeßner, M.**: Tierernährung. Frankfurt: DLG-Verlag, 1987, 7. Auflage, 533 S.

[103] **Kladivko, E. J.; G. E. van Scoyoc; E. J. Monke; K. M. Oates und W. Pask**: Pesticide and Nutrient Movement into Subsurface Tile Drains on a Silt Loam in Indiana. - In: Journal of Environmental Quality 20 (1991), S. 264-270.

[104] **Klee, U.; C. Richter und L. Hofmann**: Aufbau und Funktion automatischer Lenkeinrichtungen am Beispiel Traktor. - In: Agrartechnische Forschung 4 (1998), Heft 2, S.103-107.

[105] **Klingenhagen, G.**: Pflanzenschutz: Packs sind passé - Unkrautbekämpfung in Mais 1995. - In: dlz 46 (1995), Nr. 3, S. 64-71.

[106] **Klooster, J.**: Thermische onkruidbestrijding, een interessant alternatief (Summary: Thermal wed control, an interesting alternative). - In: Landbouw-mechanisatie 43 (1983), Nr. 8, S. 787-789.

[107] **Knauer, N.**: Einführung. - In: Knauer, N. et al. (Vorstand des Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst- Ernährungs- und Veterinär- und Umweltforschung) (Hrsg.): Umweltgerechte Agrarproduktion: Schutzkonzepte zur Vermeidung negativer Wirkungen synthetischer und natürlicher Betriebsmittel bzw. landwirtschaftlicher Produktionsrückstände auf Ökosysteme. Frankfurt/M.: DLG-Verlag, Schriftenreihe Agrarspektrum Band 18, 1991, S. 7-10.

[108] **Koch, W. und K. Hurle**: Grundlagen der Unkrautbekämpfung. Stuttgart: Ulmer-Verlag, UTB 513, 1978, 207 S.

[109] **Koch, W. und A. Kemmer**: Schadwirkung von Unkräutern gegenüber Mais in Abhängigkeit von Konkurrenzdauer und Unkrautdichte. - In: Mededelingen Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversität Gent, Band 45, 1980, S. 1099-1108.

[110] **Köller, K.**: Mulchsaat und mechanische Unkrautbekämpfung bei Mais und Zuckerrüben. - In: Landtechnik 46 (1991), Nr. 1/2, S.32-35.

[111] **König, F.**: Anforderungen der Wasserwirtschaft an die Landwirtschaft zum Schutz des Grundwassers. Die Nitratprobleme in der Trinkwasserversorgung. - In: Jositz, J. (Hrsg.): Landwirtschaft - Boden- und Gewässerschutz. München: Berichte und Studien der Hanns-Seidel-Stiftung e. V., Reihe Agrarpolitik 195 S., 1989, S. 151-168.

[112] **Köninger, R.**: Versuch einer Theorie des Scherenschnitts von Halmen. - In: Grundlagen der Landtechnik, 1953, Nr. 5, S. 96-97.

[113] **Koolen, A. J. und H. Kuipers**: Agricultural Soil Mechanics. Advanced Series in Agricultural Sciences 13, Berlin: Springer-Verlag, 1983, 241 S.

[114] **Kress, W.**: Die Reihenhackbürste - eine neue Entwicklung in der mechanischen Beikrautregulierung. - In: Hoffmann, M. und B. Geier (Hrsg.): Beikrautregulierung statt Unkrautbekämpfung. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller, Alternative Konzepte 58, 2. Aufl., S. 83-88.

[115] **Kretschmar, R. und W. Xylander**: Elektrische Regulierung - eine neue Lösung zur Bekämpfung der Ackerkratzdistel. - In: Ökologie und Landbau 25 (1997), Nr. 2, S. 15-16.

[116] **Kromer, K.-H. und H. Reloe**: Maschinen und Geräte für die Brachlandpflege. - In: Technik der Pflege stillgelegter Flächen, KTBL-Arbeitspapier 141, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 1989, S. 65-76.

[117] **Kuchling, H.**: Taschenbuch der Physik. Frankfurt/M.: Verlag Harri Deutsch, 11. Aufl., 1988, 672 S.

[118] **Kühlborn, H.**: Die Ermittlung des Leistungsbedarfs von Schlegelfeldhäckslern. - In: Grundlagen der Landtechnik 18 (1968), Nr 2, S. 55-61.

[119] **Kühlborn, H.**: Der Leistungsbedarf wichtiger Arbeitsmaschinen zur Halmfuttergewinnung. - In: Landtechnische Forschung 18 (1970), Nr. 5, S. 132-137.

[120] **Kühlborn, H.**: Der Leistungsbedarf wichtiger Arbeitsmaschinen zur Halmfuttergewinnung. - In: Landtechnische Forschung 18 (1970), Nr. 6, S. 153-164.

[121] **Kühlborn, H.**: Der Leistungsbedarf wichtiger Arbeitsmaschinen zur Halmfuttergewinnung. - In: Landtechnische Forschung 21 (1971), Nr. 1, S. 67-68.

[122] **Kühlborn, H. und H. Steinkampf**: Die Ermittlung des Leistungsbedarfs von Scheibenmähwerken. - In: Landbauforschung Völkenrode 1970, Nr.2, S. 69-76.

[123] **Kuhlmann, J.**: Mais hacken - eine sinnvolle Alternative? - In: top agrar Heft 5 (1992), S. 74-75.

[124] **Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (Hrsg.)**: KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft 1994/95 - Daten für die Betriebskalkulation in der Landwirtschaft. Münster-Hiltrup: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, 1994, 17. Aufl., 290 S.

[125] **Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.)**: KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft 1998/1999, Daten für die Betriebskalkulation in der Landwirtschaft. Münster-Hiltrup: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, 19. Auflage 1998, 273 S.

[126] **Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.)**: KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft 2000/2001, Daten für betriebliche Kalkulationen in der Landwirtschaft. Münster: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, 20. Auflage 2000, 269 S.

[127] **Lancashire, P. D.; H. Bleiholder; P. Langelüddecke; R. Stauss; T. van den Boom; E. Weber und A. Witzenberger**: An uniform decimal code for the growth stages of crops and weeds.- In: Annals of Applied Biology, 119 (1991), Nr. 9, S. 561-601.

[128] **Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.)**: Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit Nitrat. Stuttgart, 1995, 104 S.

[129] **Lang, T.**: Mit Bügelhacke und Abflammgerät weniger Handarbeit im Gemüse- und Hackfruchtanbau. - In: GÄA-Journal 1 (1996), S. 14-15.

[130] **Laudien, H.**: Beiträge zur Biologie, Ökologie, wirtschaftlichen Bedeutung und Verbreitung der Schadhirsen. Dissertation: Universität Stuttgart-Hohenheim, 1972, 109 S.

[131] **Leistra, M. und R. E. Green**: Efficacy of soil-applied pesticides. - In: Cheng, H. H. (Hrsg.): Pesticides in the Soil Environment: Processes, impacts, and modeling. Madison, Wisconsin (USA): Soil Science Society of America, Book Series 2, 1990, S. 401-428

[132] **Leonard, R. A.**: Movement of Pesticides into surface Waters. - In: Cheng, H. H. (Hrsg.): Pesticides in the Soil Environment: Processes, impacts, and modeling. Madison, Wisconsin (USA): Soil Science Society of America, Book Series 2, 1990, S. 303-349.

[133] **Löbbert, M.; K.-H. Kromer und C. C. Wieland**: Einfluß von Mäh- und Mulchgeräten auf die bodennahe Fauna. - In: Forschungsberichte „Integrative Extensivierungs- und Naturschutzstrategien", 1994, Heft 15, S. 7-26.

[134] **Lohuis, H.**: Mechanische Unkrautbekämpfung kommt wieder. - In: Pflanzenschutz-Praxis, Heft 2 (1990), S. 14-16.

[135] **Lütke Entrup N.; O. Onnen und B. Teichgräber**: Zukunftsfähige Landwirtschaft. Integrierter Landbau in Deutschland und Europa. Studie zu Entwicklung und den Perspektiven. Hrsg.: Fördergemeinschaft Integrierter Pflanzenbau e. V. (FIP). Bonn: FIL Gesellschaft zur Förderung des Integrierten Landbaus mbH, 1998, 295 S.

[136] **Maas, G.; W. Pestemer und G. Krasel**: Indirekte Abdrift (Verflüchtigung) von Herbiziden von Oberflächen. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XI (1988), S. 249-258.

[137] **Malkomes, H.-P.**: Einfluß nichtchemischer Unkrautbekämpfungsverfahren auf Organismen im Boden - eine Bestandsaufnahme. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV (1994), S. 645-654.

[138] **Marchant, J. A.**: Tracking of row structure in three crops using image analysis. - In: Computers and Electronics in Agriculture 15 (1996), S.161-179.

[139] **Matthies, H. J.**: Halmfuttererntemaschinen - langfristige Entwicklungstendenzen. - In: Landtechnische Forschung 18 (1970), Nr. 1, S. 9-16.

[140] **Maul, H.**: Untersuchungen an einem Steuerprogramm für Hackgeräte im Maisanbau auf der Basis eines opto-elektronischen Systems., Dissertation im Druck, Fachgebiet für Technik im Pflanzenbau, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, 2001.

[141] **Merbach, J.**: ^{15}N-Aufnahme von Mais (*Zea mays* L.) und Sommergerste (*Hordeum distichon* L.) aus eingemulchtem Weißen Gänsefuß (*Chenopodium album* L.). - In: Quantitative Approaches in Weed and Herbicide Research and their Practical Application, Proceedings: 8 th EWRS Symposium Braunschweig (Germany), June 14-16, 1993. Hrsg.: Braunschweig: EWRS 1993, Vol. 1, S. 159-165.

[142] **Merkblatt für Anbaugeräte** vom 25. März 1999, VkBl. 1999, S. 268 mit Änderung vom 2. August 2000, VkBl. 2000, S. 479 (Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 3666).

[143] **Meyer, J.**: Pflanzenschutz und Unkrautregulierung. - In: Schön et al.: Landtechnik Bauwesen. Die Landwirtschaft Band 3, München: BLV Verlagsgesellschaft 1998, 9. Aufl., S. 223-232.

[144] **Meyer, J. und P. Hartmann**: Automatische Führung von Hackgeräten. - In: Landtechnik 54 (1999), Nr. 3, S. 146-147.

[145] **Meyer J. und H. Weber**: Die Weihenstephaner Trennhacke - ein neuartiges Gerät zur mechanischenUnkrautregulierung in Beetkulturen. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI (1998), S. 595-601.

[146] **Moore, R. P. (Hrsg.)**: ISTA-Handbuch für die Tetrazoliumuntersuchung. International Seed Testing Association. Zürich (Schweiz), 1986, 118 S.

[147] **Moser, E.**:. Lehrbuch der Agrartechnik, Band 2: Verfahrenstechnik Intensivkulturen. Hamburg: Parey-Verlag, Pareys Studientexte 40, 1984, 204 S.

[148] **Nachtigall, G.**: Einbindung landschaftsökologischer und naturschützerischer Erfordernisse in die landwirtschaftliche Produktion - Stand und Perspektiven. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem (Hrsg.), Berlin: Kommissionsverlag Blackwell Wissenschafts-Verlag GmbH, Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 294 (1994), 98 S.

[149] **Nations, B. K. und G. R. Hallberg**: Pesticides in Iowa Precipitation. - In: Journal of Environmental Quality 21 (1992), S. 486-492.

[150] **Nawroth, P.**: Entwicklung und Erprobung eines Prototyps zur mechanischen Unkraut-Regulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Freising-Weihenstephan, 1994, 94 S.

[151] **Nawroth, P.**: Mechanische Unkrautregulierung mit einem Reihenmulchgerät. - In: Auernhammer, H. und P. Nawroth (Hrsg.): Maisanbau 2000. Freising: Landtechnik Weihenstephan, Landtechnik Schrift Nr. 8, 1997, S. 103-118.

[152] **Nawroth, P.**: Unkräuter erfolgreich mechanisch regulieren. – In: Mais 26 (1998), Nr. 2, S. 82-85.

[153] **Nawroth, P. und M. Estler**: Mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge - Gerätetechnik, Prüfstandsversuche, Ergebnisse. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XV (1996), S. 423-430.

[154] **Nawroth, P. und M. Estler**: Mechanische Unkrautregulierung ohne Eingriff in das Bodengefüge - Gerätetechnik, Feldversuche, Ergebnisse. - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI (1998), S. 573-580.

[155] **Nelson, S. O.**: RF and microwave energy for potential agricultural applications. - In: Journal of Microwave Power 20 (1985), S. 65-70.

[156] **Nelson, S. O.**: Potential agricultural applications for RF and microwave energy. - In: Transactions of the ASAE 30 (1987), S. 818-822 und 831.

[157] **Nemming, A.**: Costs of flaming. - In: Acta Horticulturae 372 (1994), S. 205-212.

[158] **Oberdorfer, E. und T. Müller (Hrsg.)**: Süddeutsche Pflanzengesellschaften Teil III Wirtschaftswiesen und Unkrautgesellschaften, Stuttgart: Fischer Verlag, 1993, 3. Aufl., 455 S.

[159] **von Oheimb, R.**: Mähen stillgelegter Flächen – In: Technik der Pflege stillgelegter Flächen, KTBL-Arbeitspapier 141, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), 1989, S. 57-64.

[160] **Pearson E. S. und M. A. Stephens**: The ratio of range to standard deviation in the same normal sample. - In: Biometrika 51 (1964), S. 484-487.

[161] **Persson, S.**: Mechanics of cutting plant material. St. Joseph (Michigan, USA): ASAE Monograph Nr. 7, 1987, 288 S.

[162] **Petzold, W.**: Untersuchungen zum Arbeitseffekt von Bügelhacke und Tellerhackbürste in Möhren. - In: Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau „Vom Rand zur Mitte", Berlin, 23. - 25. Februar, 1999. Hrsg.: H. Hoffmann und S. Müller, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humbold-Universität zu Berlin, Berlin: Verlag Dr. Köster 1999, S. 261 - 265.

[163] **Plakolm, G.**: Botanische Kenntnisse und vorbeugende Maßnahmen als Voraussetzung einer wirksamen Beikrautregulierung. - In: Hoffmann, M. und B. Geier (Hrsg.): Beikrautregulierung statt Unkrautbekämpfung. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller GmbH 1989, Alternative Konzepte 58, S. 41-50.

[164] **Precht, M. und R. Kraft**: Biostatistik 2. München: R. Oldenbourg Verlag, 1993, 457 S.

[165] **Reznik, N. E.**: Teorija, rezanija, lezviem i osnov y račeta rezuščich apparatov (Theorie des Messerschnitts und Grundlagen der Berechnung von Schneidwerken). Moskau: Verlag Mäsinostroenie, 1975, 311 S.

[166] **Richtlinie des Rates 80/778/EWG** vom 15. Juli 1980 **über die Qulität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (EG-Trinkwasserrichtlinie)**, ABl. Nr. L 229, 30. August 1980, S. 11, Änd. 81/857 EWG – ABl. Nr. L 318 vom 7. November 1982, S. 18, Änd. 89/427/EWG - ABl. Nr. L 201 vom 14. Juli 1989, S.53, Änd. 91/692/EWG - ABl. Nr. L 377 vom 31. Dezember 1991, S.48, gemäß RL 98/83/EG gültig bis 12/2003.

[167] **Rogler, H. und U. Schwertmann**: Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte Bayerns. - In: Zeitschrift für Kulturtechnik - Flurbereinigung, Band 22 (1981), S. 99-112.

[168] **Sachs, L.**: Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden. Berlin: Springer Verlag, 7. Aufl., 1992, 846 S.

[169] **Schachtschabel, P.; H.-P. Blume; G. Brümmer; K. H. Hartge und U. Schwertmann**: Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1998, 494 S.

[170] **Schäfer, W.**: Technik der Grünmulchvertielung in Reihenkulturen - ein Verfahrensvergleich. - In: Agrartechnische Forschung 4 (1998), Heft 1, S. 2-10.

[171] **Schäfer, W.; S. Jaakkola und A. Granstedt**: Entwicklung einer Grünmulchverteilmaschine. - In: Agrartechnische Forschung 2 (1996), Heft 2, S. 80-86.

[172] **Scheufler, B.**: Ein Beitrag zur Auslegung von Mähwerken mit Sichelmessern. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 100, Dissertation: TU Braunschweig, 1984, 171 S.

[173] **Schlee, D.**: Chemische Konkurrenz zwischen höheren Pflanzen. Allelopathie 55 Jahre nach Molisch. - In: Naturwissenschaftliche Rundschau 45 (1992), S. 468-474.

[174] **Schmidtlein, E.-M.**: Probleme eines hohen Silomaisanteils in der Fruchtfolge und ökonomische Beurteilung ausgewählter Maßnahmen zur Minderung der negativen Auswirkungen durch Bodenerosion. Dissertation. TU München-Weihenstephan, 1990, 194 S.

[175] **Schön, H.**: Verfahrenstechniken der Futterernte und Futterkonservierung.- In: Wenner et al.: Landtechnik Bauwesen. Die Landwirtschaft Band 3, München: BLV Verlagsgesellschaft 1986, 8. Aufl., S. 245-311.

[176] **Schön, H.**: Verfahrenstechnik der Futterernte, Futterkonservierung und Landschaftspflege.- In: Schön et al.: Landtechnik Bauwesen. Die Landwirtschaft Band 3, München: BLV Verlagsgesellschaft 1998, 9. Aufl., S. 325-405.

[177] **Schön, H.; M. Estler und L. Resch**: Entwicklung und Erprobung neuer mechanischer Verfahren zur umweltgerechten Unkrautbekämpfung. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, „Gelbes Heft" Nr. 45, 1992, 48 S.

[178] **Schubert, R.; K. Werner und H. Meusel (Hrsg.) (Begründet von W. Rothmaler)**: Exkursionsflora für die Gebiete der DDR und der BRD, Band 2 Gefäßpflanzen. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag, 1984, 640 S.

[179] **Schulze, K. H.**: Über der Schneidvorgang bei Grashalmen. - In: Grundlagen der Landtechnik 1953, Nr. 5, S. 98-116.

[180] **Schünke, U.**: Unkrautbekämpfung im Silomais. - In: Agrartechnik, Heft 2 (1993), S. 44-46.

[181] **Schünke, U.**: Unkrautbekämpfung im Silomais II. - In: Agrartechnik, Heft 6/7 (1993), S. 38-40.

[182] **Schwertmann, U. und W. Vogl**: Landbewirtschaftung und Bodenerosion. - In: VDLUFA (Hrsg.): Bodenbewirtschaftung, Bodenfruchtbarkeit, Bodenschutz, Kongreßband Nr. 16, Gießen, Darmstadt: VDLUFA-Verlag, 1985, S. 7-17.

[183] **Schwertmann U.; W. Vogl und M. Kainz**: Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart: Ulmer Verlag, 1987, 64 S.

[184] **Sci Lab GmbH**: Xact® Version 5.00f, Hamburg: 1997.

[185] **Sedlmeier, J.**: Striegel, Bürsten, Hacken - fast alle noch mit Macken. - In: top agrar 1992, Nr. 2, S. 120-140.

[186] **SPSS Inc.**: SPSS Advanced Statistics™ 7.5, Chicago (USA): 1997, 579 S.

[187] **SPSS Inc.**: SPSS®, 7.5 Statistikpaket, Chicago (USA):1997.

[188] **Staas-Ebregt, E. M.**: Unkrautbekämpfung in Mais unter Berücksichtigung der Unkrautkonkurrenz. - In: Proceedings: EWRS-Symposium, 1979, S. 153-160.

[189] **Stevens, O. A.**: The number and weight of seeds produced by weeds.- In: American Journal of Botany, Band 19 (1932), S. 784-794.

[190] **Strasburger, E.; F. Noll; H. Schenck und A. F. W. Schimper (Begr.)**: Lehrbuch der Botanik. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1983, 32. Aufl., 1161 S.

[191] **Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)** vom 28. September 1988, BGBl. I S. 1793, zuletzt geändert durch 31. ÄndVStVR vom 3. August 2000, BGBl. I, S. 1273.

[192] **Stroppel, T.**: Zur Systematik der Technologie des Schneidens. - In: Grundlagen der Landtechnik 2 (1953), Nr. 5, S. 120-134.

[193] **Türke, U.**: Das Mulchen und sein Einfluß auf Bodentemperatur und -feuchte. Hrsg.: Gesamthochschule Kassel, Organisationseinheit Internationale Agrarwirtschaft in Witzenhausen: Der Tropenlandwirt (1976), Beiheft Nr. 7, 72 S.

[194] **Umweltbundesamt**: Daten zur Umwelt - Der Zustand der Umwelt in Deutschland. Berlin: Erich Schmidt-Verlag, 1997, 570 S.

[195] **Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung)** vom 22. Mai 1986, BGBl. I, S. 760, in der Fassung der Bekanntmachnung vom 5. Dezember 1990, BGBl. I, Nr. 66, 1990, S. 2612, ber. 1991, S. 227, ber. 1993, S. 278, ber. 1998, S. 699, Novellierung vom 21. Mai 2001, BGBl. I, Nr. 24, S. 959.

[196] **Wagner, F. und G. Prediger**: Der Feldversuch - Durchführung und Technik. Bad Hersfeld: Selbstverlag Fritz Wagner, 1994, Loseblattsammlung.

[197] **Walter, S.**: Nicht-chemische Unkrautregulierung. Bad Dürkheim: Stiftung Ökologie und Landbau, 2. Aufl., 1995, 119 S.

[198] **Weber, E.**: Grundriß der biologischen Statistik für Naturwissenschaftler, Landwirte und Mediziner. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1972, 706 S.

[199] **Weber, E. und H. Bleiholder**: Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse - mit Abbildungen. - In: Gesunde Pflanze, 42 (1990), Nr. 9, S. 308-321.

[200] **Weber, H.**: Mechanische Unkrautbekämpfung: Untersuchungen zur Arbeitsweise und Wirkung der Reihenhackbürste. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Freising-Weihenstephan, 1992, 76 S.

[201] **Weber, H.**: Unkrautbekämpfung mit Reihenhackbürsten - Bekämpfungserfolg kontra Bodenschonung? - In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV (1994), S. 281-288.

[202] **Weber, H.**: Mechanical Weed Control with a Row Brush Hoe. - In: Acta Horticulture 372, Symposium on Engineering as a Tool to reduce Pesticide Consumption and Operator Hazards in Horticulture, Ulvik, Norway, 10^{th} - 12^{th} August 1993, Hrsg.: ISHS 1994, S. 253-260.

[203] **Weber, H.**: Mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen. - In: Gemüse 32 (1996), Nr. 1, S. 38-40.

[204] **Weber, H.**: Geräte -und verfahrenstechnische Optimierung der mechanischen Unkrautregulierung in Beetkulturen. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 315, Dissertation, Institut für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, 1997, 201 S.

[205] **Weiss, E. und C. Stettmer**: Unkräuter in der Agrarlandschaft locken blütenbesuchende Nutzinsekten an. Bern: Agrarökologie 1, 1991, 104 S.

[206] **Werner, W. und H.-W. Olfs**: Stickstoff- und Phosphorbelastung der Fließgewässer aus der Land(wirt)schaft und Möglichkeiten ihrer Verringerung. - In: AMK Berlin (Hrsg.): Wasser Berlin ´89, Berlin: E. Schmidt Verlag, 1989, S. 488-501.

[207] **Wieneke, F.**: Verfahrenstechnik der Halmfutterproduktion. Göttingen, 1972, 607 S.

[208] **Wieneke, F.**: Möglichkeiten des Microwelleneinsatzes in der Landwirtschaft. - In: Landtechnik 43 (1988), Nr. 4, S. 191-192.

[209] **Wischmeyer, W. und D. D. Smith**: Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. U. S. Dept. Agric., Agric. Handbook 537, 1978, 58 S.

[210] **Wittmann, O.**: Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern. München: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialen 21, 1983, 30 S.

[211] **Wittmann, O.**: Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern und Abhängigkeitsbeziehungen der Bodennutzung. München: Bayerisches Geologisches Landesamt, GLA-Fachberichte Nr. 5, 2 Aufl., 1991, S. 5-49.

[212] **Zimdahl, R. L.**: Fundamentals of Weed Science. San Diego, California: Academic Press, Inc., 1993, 450 S.

[213] **Zschaler, H.; B. Rubach; S. Enzian und U. Wittchen**: Status-quo-Analyse des Pflanzenschutzmittel-Einsatzes in den Feldkulturen der Bundesrepublik Deutschland 1991/92. - In: Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst 47/4 (1995), S. 86-95.

[214] **Zscheischler, J.; M. Estler; F. Groß; G. Burgstaller; H. Neumann und B. Geißler**: Handbuch Mais: Anbau - Verwertung - Fütterung. Frankfurt (Main): DLG-Verlag, 1984, 3. Aufl., 253 S.

[215] **van Zuydam, R. P.**: Automatische Steuerung von landwirtschaftlichen Geräten. - In: Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge, VDI/MEG Kolloquim Agrartechnik, Weihenstephan, März 5-6, 1992. Hrsg.: Düsseldorf: VDI Gesellschaft Agrartechnik 1992, S.145-157.

Anhang

Tab. A1: Wissenschaftlicher Name, deutscher Name und Code von Unkräutern und Ungräsern [77, 178]

Pflanzen-Art		
Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Code
Agropyron repens (L.) Beauv.	Gemeine Quecke	AGRRE
Amaranthus retroflexus L.	Zurückgekrümmter Amarant	AMARE
Atriplex patula L.	Spreizende (Gemeine) Melde	ATXPA
Capsella bursa-pastoris (L.) Medicus	Hirtentäschlkraut	CAPBP
Chenopodium album L.	Weißer Gänsefuß	CHEAL
Chenopodium spec.	Spezies von *Chenopodium*	CHESS
Cirsium arvense (L.) Scop.	Acker-Kratzdistel	CIRAR
Echinochloa crus-galli (L.) Beauv.	Hühnerhirse	ECHCR
Euphorbia helioscopia L.	Sonnwend-Wolfsmilch	EPHHE
Galium aparine L.	Kletten-Labkraut	GALAP
Galeopsis tetrahit L.	Ackerhohlzahn	GALTE
Galinsoga parviflora Cav.	kleinblütiges Franzosenkraut	GASPA
---	Sonstige Unkräuter	HERBA
---	Ausfall-Getreide	KKKGY
Matricaria inodora L.	Geruchlose Kamille	MATIN
Plantago media L.	Mittlerer Wegerich	PLAME
Poa annua L.	Einjährige(s) Rispe(ngras)	POAAN
Poa trivialis L.	Gemeine(s) Rispe(ngras)	POATR
Polygonum lapathifolium L.	Ampferblättriger Knöterich	POLLA
Rumex obtusifolius L.	Stumpfblättriger Ampfer	RUMOB
Solanum nigrum L.	Schwarzer Nachtschatten	SOLNI
Solanum tuberosum L.	Ausfall-Kartoffel	SOLTU
Stellaria media (L.) Vill.	Vogelmiere	STEME
Tussilago farfara L.	Huflattich	TUSFA
Veronica arvensis L.	Feld-Ehrenpreis	VERAR
Veronica spec.	Spezies von *Veronica*	VERSS
Viola arvensis Murray	Acker-Stiefmütterchen	VIOAR

Frühbeetkasten 1:

AH 2 cm	R	K 1	C 1	F 1	S 1	C 2	S 2	K 2	F 2	S 3	F 3	C 3	K 3	F 4	K 4	S 4	C 4	K 5	C 5	F 5	S 5	C 6	S 6	K 6	F 6	S 7	F 7	C 7	K 7	R
WS **10 cm**		WH 1				WH 2				WH 3				WH 4				WH 5				WH 6				WH 7				
AH 5 cm	R	K 1	C 1	F 1	S 1	C 2	S 2	K 2	F 2	S 3	F 3	C 3	K 3	F 4	K 4	S 4	C 4	K 5	C 5	F 5	S 5	C 6	S 6	K 6	F 6	S 7	F 7	C 7	K 7	R

Frühbeetkasten 2:

AH 2 cm	R	K 1	C 1	F 1	S 1	C 2	S 2	K 2	F 2	S 3	F 3	C 3	K 3	F 4	K 4	S 4	C 4	K 5	C 5	F 5	S 5	C 6	S 6	K 6	F 6	S 7	F 7	C 7	K 7	R
WS **20 cm**		WH 1				WH 2				WH 3				WH 4				WH 5				WH 6				WH 7				
AH 5 cm	R	K 1	C 1	F 1	S 1	C 2	S 2	K 2	F 2	S 3	F 3	C 3	K 3	F 4	K 4	S 4	C 4	K 5	C 5	F 5	S 5	C 6	S 6	K 6	F 6	S 7	F 7	C 7	K 7	R

WS: Wuchsstadium, AH: Abtrennhöhe, K: Kontrolle, C: Abschneiden, F: Abschlegeln, S: Entlauben, R: Randbepflanzung

Abb. A1: Versuchsanlage der Prüfstandsversuche mit CHEAL und ECHCR

	CHEAL															
AH 2 cm	R	K 1	mS 1	mS 2	K 2	K 3	mS 3	mS 4	K 4	K 5	mS 5	mS 6	K 6	K 7	mS 7	R
WS **20 cm**		WH 1		WH 2		WH 3		WH 4		WH 5		WH 6		WH 7		
AH 2 cm	R	K 1	mS 1	mS 2	K 2	K 3	mS 3	mS 4	K 4	K 5	mS 5	mS 6	K 6	K 7	mS 7	R
	ECHCR															

WS: Wuchsstadium, AH: Abtrennhöhe, K: Kontrolle, mS: Handentlaubung, R: Randbepflanzung

Abb. A2: Versuchsanlage der Handentlaubungsversuche mit CHEAL und ECHCR

Frühbeetkasten 1:

		AMARE															SOLNI													
AH	R	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	R
2 cm		1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	
WS		WH 1			WH 2			WH 3			WH 4			WH 5			WH 1			WH 2			WH 3			WH 4			WH 5			
10 cm																																
AH	R	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	R
2 cm		1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	
		AGRRE															STEME														

Frühbeetkasten 2:

		AMARE															SOLNI													
AH	R	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	R
2 cm		1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	
WS		WH 1			WH 2			WH 3			WH 4			WH 5			WH 1			WH 2			WH 3			WH 4			WH 5			
20 cm																																
AH	R	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	K	C	F	C	F	K	F	K	C	K	C	F	C	F	K	R
2 cm		1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	
		AGRRE															STEME														

WS: Wuchsstadium, AH: Abtrennhöhe, K: Kontrolle, C: Abschneiden, F: Abschlegeln, R: Randbepflanzung

Abb. A3: Versuchsanlage der Prüfstandsversuche mit AMARE, AGRRE, SOLNI und STEME

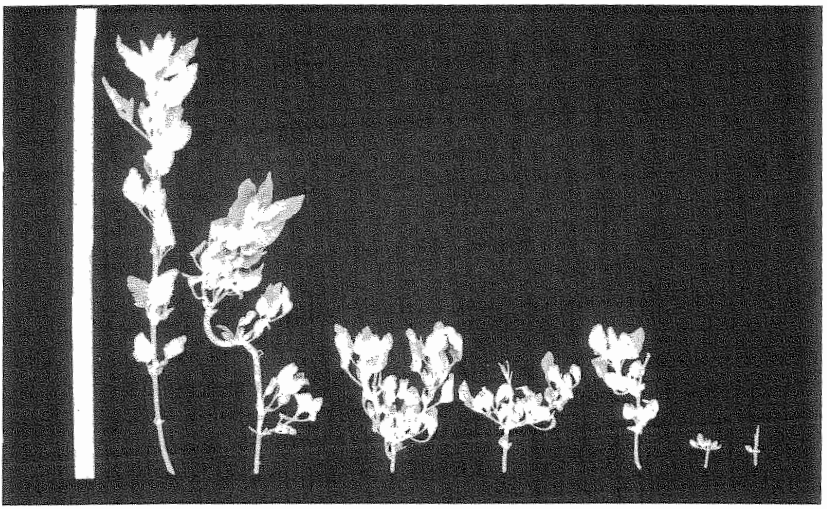


Abb. A4: Prüfstandsversuche: *Chenopodium album* L.,
20 Tage nach der Behandlung, Varianten (von links nach rechts):
K 20, S 20-5, C 20-5, F 20-5, S 20-2, C 20-2, F 20-2

Abb. A5: Trennbild von *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.
bei Einsatz des abschlegelnden Werkzeugs

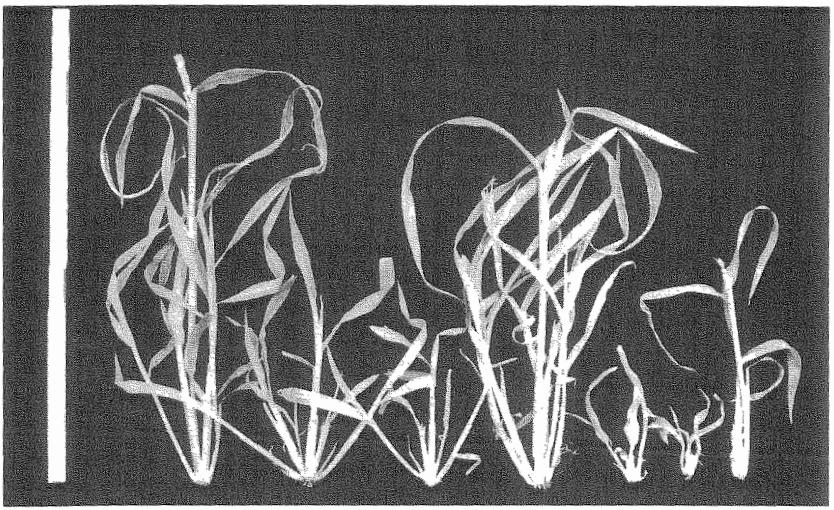


Abb. A6: Prüfstandsversuche: *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung, Varianten (von links nach rechts): K 20, C 20-5, F 20-5, S 20-5, C 20-2, F 20-2, S 20-2

Abb. A7: Handentlaubung: *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv., 20 Tage nach der Behandlung, Varianten (von links nach rechts): K 20, mS 20-2

Tab. A2: Anbaudaten der Versuchsflächen

	Standort			
	Dürnast	Freising-Süd	Eittingermoos	Großenviecht
Vorfrucht	Winterweizen	Silomais	Silomais	Winterweizen
Frucht/ Sorte (Reifezahl)	Silomais/ Türkis (S 230)	Körnermais/ Impact (S 230)	Silomais/ Kalif (S 230)	Silomais/ Green (S 230)
Saatbett-bereitung	Pflugfurche, Kreiselegge (Sommer, Aussaat Zwischenfrucht); Direktsaat mit Spezialsämaschine mit schmaler Reihenfräse	Pflugfurche (Herbst); Saatbett-kombination + Zinkenrotor	Pflugfurche (Herbst); Kreiselegge + Cambridgewalze	Pflugfurche (Herbst); Saatbett-kombination + Kreiselegge
Mulchsaat	ja (Mulchauflage: abgestorbener Senf)	nein	nein	nein
Pflanzen/m²	10	9	10	9
Saatzeit	23.04.1996	29.04.1996	07.05.1996	29.04.1996
Stickstoff-Düngung	Zur Saat: 56 kg N/ha als Mineraldünger (N/P: 18/46), EC 15: 150 kg N/ha als Kalkammon-salpeter	VS: 39 kg N/ha als Mineraldünger (N/P/K: 13/13/21) EC 16: 60 kg N/ha als Ammonsulfat	VS: 80 kg N als Rindergülle + 84 kg N/ha als Mineraldünger (N/P/K: 12/10/15) EC 14: 52 kg N als Ammon-sulfatsalpeter	VS: 100 kg N/ha als Rindergülle + 112 kg N/ha als Mineraldünger (N/P/K: 15/15/15) EC 15: 42 kg N/ha als Kalkammon-salpeter
Zeitpunkt Herbizid-behandlung (Variante Herbizid)	EC 12 (24.05.1996)	EC 14 (08.06.1996)	EC 12 (05.06.1996)	EC 13 (30.05.1996)
Herbizid (Variante Herbizid)	Sailor-Pack: 1,5 l/ha Mikado (300g/l Sulco-trione) + 1,5 l/ha Lentagran (450 g/l Pyridate)	Banvel 4S (480 g/l Dicamba) + 25 g/ha Cato (25 % Rimsulfuron) + 0,15 l/ha FHS	Zintan-Pack (% Aufwandmenge): 3 l/ha Gardoprim Plus (167 g/l Terbuthylazin + 333 g/l Meto-lachlor) + 1,33 kg Lentagran (45 % Pyridate)	50 g/ha Cato (25 % Rimsulfuron) + 0,3 l/ha FHS + 1,5 l/ha Certrol B (235 g/l Bromo-xynil)
mechanische Unkraut-regulierung (Variante Herbizid)	nein	nein	nein	nein

Tab. A3: Wachstumsverlauf des Mais (*Zea mays* L.) der Versuchsflächen 1996 - Variante Herbizid -

EC – Stadium (BBCH – Code)	Standort							
	Dürnast		Freising-Süd		Eittingermoos		Großenviecht	
	Datum	WH	Datum	WH	Datum	WH	Datum	WH
0	23.04.	-	29.04.	-	07.05.	-	29.04.	-
09	07.05.	-	12.05.	-	-	-	-	-
09/10	-	-	-	-	20.05.	1 cm	12.05.	1 cm
10	14.05.	3 cm	15.05.	2 cm	-	-	-	-
11	21.05.	6 cm	20.05.	5 cm	27.05.	5 cm	-	-
12	24.05. 1)	8 cm	-	-	02.06. 2) 03.06. 05.06. 1)	10 cm	19.05.	8 cm
12/13	28.05.	10 cm	27.05.	10 cm	10.06.	15 cm	-	-
13	31.05. 2)	12 cm	01.06. 2)	13 cm	-	-	26.05. 30.05. 1) 31.05. 2)	10 cm 13 cm 13 cm
14	05.06. 3)	17 cm	03.06. 08.06. 1)	15 cm 20 cm	17.06. 21.06. 3)	20 cm 25 cm	03.06.	20 cm
15	12.06.	25 cm	10.06.	25 cm	28.06.	35 cm	10.06.	30 cm
16	19.06. 4)	40 cm	17.06.	35 cm	-	-	17.06.	40 cm
17	26.06.	55 cm	20.06. 3)	40 cm	05.07. 4)	60 cm	20.06. 3)	50 cm
32	03.07.	75 cm	27.06.	45 cm	12.07.	80 cm	-	-
33/34	-	-	04.07. 4)	70 cm	-	-	27.06.	60 cm
35/36	10.07.	95 cm	11.07.	85 cm	19.07.	120 cm	04.07. 4)	80 cm
37	-	-	-	-	-	-	11.07.	120 cm
50/51	17.07.	150 cm	18.07.	150 cm	-	-	18.07.	160 cm
85	01.10.	240 cm	25.10.	300 cm	10.10.	260 cm	01.10.	290 cm

1) Flächenspritzung: Variante Herbizid
2) Bandspritzung: Varianten Kontrolle, RWM 1x und RWM 2x
3) 1. Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes RWM: Varianten RWM 1x und RWM 2x
4) 2. Einsatz des Reihen-Unkraut-Mulchgerätes RWM: Variante RWM 2x

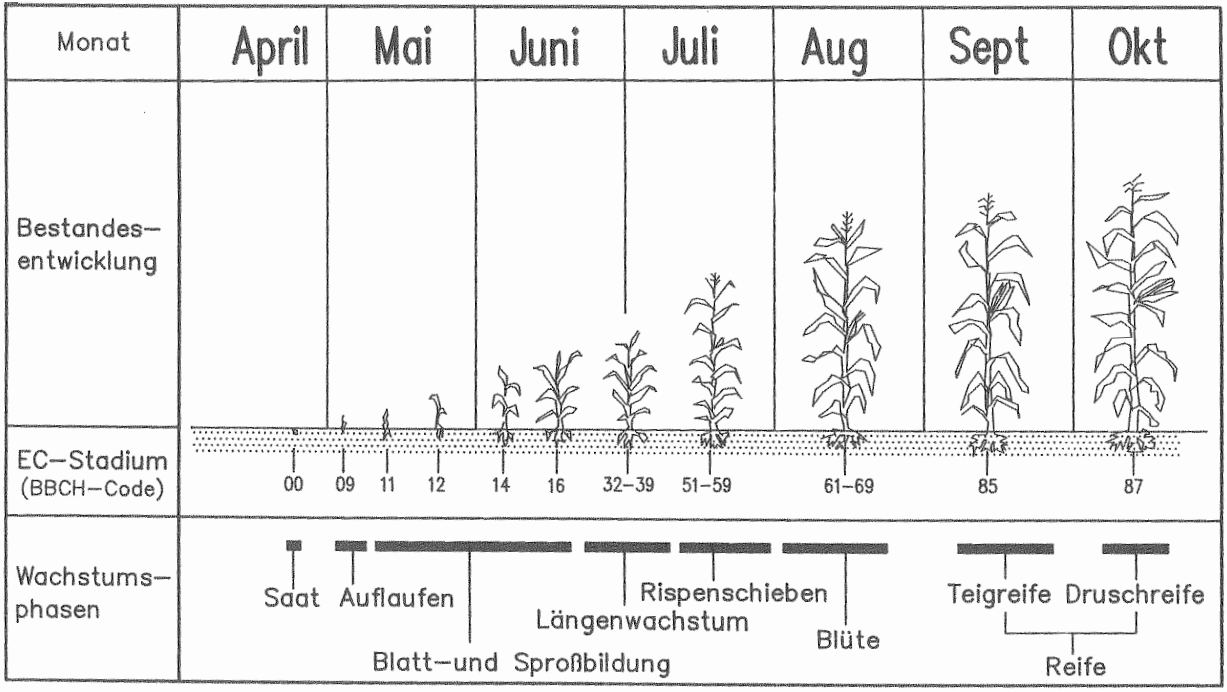


Abb. A8: Entwicklungsstadien von Mais (*Zea mays* L.)
(WEBER und BLEIHOLDER 1990, LANCASHIRE et al. 1991, HACK et al. 1992) [199, 127, 73]

Abb. A9: Standort Dürnast (Mulchsaatfläche): Blick in den Zwischenreihenbereich vor der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM)

Abb. A10: Standort Dürnast (Mulchsaatfläche): Blick in den Zwischenreihenbereich nach der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM)

Abb. A11: Standort Freising-Süd: Blick in den Zwischenreihenbereich vor der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM)

Abb. A12: Standort Freising-Süd: Blick in den Zwischenreihenbereich nach der Behandlung mit dem Reihen-Unkraut-Mulchgerät (RWM)

Tab. A4: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Weihenstephan für die Monate Mai, Juni und Juli im Jahr 1996

	Klimagebiet Weihenstephan											
	Gerät											
	Pflanzenschutzspritze			Hackmaschine / Fräse			Trennhacke			Reihenmulchgerät		
Halb-monat	Bodenart			Bodenart			Bodenart			Bodenart		
	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
Mai (1)	13	10	8	9	8	7	13	12	10	13	12	10
Mai (2)	14	5	1	9	1	0	14	9	3	14	9	3
Juni (1)	13	13	12	13	12	12	13	13	13	13	13	13
Juni (2)	12	10	9	10	9	6	13	12	10	13	12	10
Juli (1)	7	2	2	3	1	0	9	4	3	9	4	3
Juli (2)	15	14	13	14	12	11	16	14	14	16	14	14
Gesamt Mai bis Juli	74	54	45	58	43	36	78	64	53	78	64	53

Tab. A5: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Donaubecken und Alpenvorland für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr

	Klimagebiet Donaubecken und Alpenvorland											
	Gerät											
	Pflanzenschutzspritze			Hackmaschine / Fräse			Trennhacke			Reihenmulchgerät		
Halb-monat	Bodenart			Bodenart			Bodenart			Bodenart		
	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
Mai (1)	13	13	13	13	11	9	14	13	13	14	13	13
Mai (2)	12	8	6	9	5	3	12	10	8	12	10	8
Juni (1)	13	8	6	11	5	3	13	12	7	13	12	7
Juni (2)	15	15	13	14	13	8	15	15	14	15	15	14
Juli (1)	15	15	15	14	15	12	15	15	15	15	15	15
Juli (2)	13	12	11	13	11	8	15	14	13	15	14	13
Gesamt Mai bis Juli	81	71	64	74	60	43	84	79	70	84	79	70

Tab. A6: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Bodensee für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr

	Klimagebiet Bodensee											
	Gerät											
	Pflanzenschutzspritze			Hackmaschine / Fräse			Trennhacke			Reihenmulchgerät		
Halb-monat	Bodenart			Bodenart			Bodenart			Bodenart		
	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
Mai (1)	13	10	10	10	8	8	13	13	13	13	13	13
Mai (2)	12	3	1	8	0	0	12	9	3	12	9	3
Juni (1)	12	7	3	12	3	2	13	11	6	13	11	6
Juni (2)	12	9	6	12	6	4	13	12	8	13	12	8
Juli (1)	14	12	11	12	11	5	15	14	12	15	14	12
Juli (2)	13	9	7	11	7	4	14	13	7	14	13	7
Gesamt Mai bis Juli	76	50	38	65	35	23	80	72	49	80	72	49

Tab. A7: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Oberrheingraben für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr

	Klimagebiet Oberrheingraben											
	Gerät											
	Pflanzenschutzspritze			Hackmaschine / Fräse			Trennhacke			Reihenmulchgerät		
Halb-monat	Bodenart			Bodenart			Bodenart			Bodenart		
	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
Mai (1)	15	13	12	13	12	7	15	15	8	15	15	12
Mai (2)	15	15	14	12	13	7	15	15	12	15	15	15
Juni (1)	10	10	4	9	4	2	12	11	5	12	11	5
Juni (2)	15	15	14	14	14	10	15	15	14	15	15	14
Juli (1)	14	14	10	12	10	6	15	14	14	15	14	14
Juli (2)	14	14	13	14	13	12	14	15	13	14	15	14
Gesamt Mai bis Juli	83	81	67	74	66	44	86	85	66	86	85	74

Tab. A8: Verfügbare Feldarbeitstage für die Unkrautregulierung im Klimagebiet Franken/Nördliches Baden-Württemberg für die Monate Mai, Juni und Juli im Referenzjahr

	Klimagebiet Franken/Nördliches Baden-Württemberg											
	Gerät											
	Pflanzenschutzspritze			Hackmaschine / Fräse			Trennhacke			Reihenmulchgerät		
Halb-monat	Bodenart			Bodenart			Bodenart			Bodenart		
	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer	leicht	mittel	schwer
Mai (1)	15	14	10	11	10	6	15	15	11	15	15	14
Mai (2)	13	11	9	11	9	7	15	14	10	15	14	10
Juni (1)	12	12	10	12	8	4	12	12	12	12	12	12
Juni (2)	15	14	13	14	13	11	15	15	14	15	15	14
Juli (1)	15	15	15	15	15	12	15	15	13	15	15	15
Juli (2)	14	14	12	13	11	8	15	14	10	15	15	14
Gesamt Mai bis Juli	84	80	69	76	66	48	87	85	70	87	86	79