

Institut für Landtechnik der
T e c h n i s c h e n U n i v e r s i t ä t M ü n c h e n

Pflanztechnik im Feldgemüsebau -
Auswirkungen der Einbettungswerkzeuge und ausgewählter
Jungpflanzenanzuchtverfahren auf die Pflanzqualität

Martin Geyer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Landwirtschaft
und Gartenbau der Technischen Universität München zur Erlangung
des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. J. Meyer

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. M. Estler

2. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. D. Fritz

Die Dissertation wurde am 07.11.1989 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für
Landwirtschaft und Gartenbau am 03.01.1990 angenommen.

c 1989 by Landtechnik Weihenstephan

ISSN-Nr. 0931-6264

Nachdruck auch auszugsweise, Wiedergabe, Vervielfältigung und
Übersetzung nur mit Genehmigung der Landtechnik Weihenstephan.

Selbstverlag im Eigenvertrieb: Institut für Landtechnik
Vöttinger Str. 36
D-8050 Freising-Weihenstephan

V o r w o r t

Das Pflanzverfahren bei Gemüse- und Sonderkulturen wird auch weiterhin seine große Bedeutung behalten. Durch den zunehmenden Konkurrenzdruck, insbesondere im Hinblick auf den europäischen Binnenmarkt, bedarf es aller Anstrengungen, die Pflanzverfahren in technisch-biologischer wie auch ökonomischer Sicht weiter zu verbessern.

Voraussetzung für die Gewährleistung einer optimalen Einbettungsqualität ist die Kenntnis der Einflußfaktoren auf den Anwacherfolg. Dabei sind die Verfahren der Jungpflanzenanzucht, der Pflanzbettvorbereitung und der Mechanisierung hinreichend bekannt. Über den eigentlichen Pflanzvorgang, das Einbetten der Jungpflanzen in den Boden durch die Pflanzmaschine, lagen bisher noch keine fundierten Kenntnisse vor.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Einbettungswerkzeuge hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht. Mit Hilfe von dynamischen Drucksondenversuchen und statischen Druckstempelversuchen wurde die Druckausbreitung im Boden zwischen den Druckrollen der Pflanzmaschinen experimentell bestimmt. Dadurch wird es möglich, die Druckverhältnisse beim Pflanzvorgang festzustellen und zur Erzielung eines optimalen Bodenschlusses zwischen Boden und Wurzelballen zu nutzen. Durch Einbeziehung der Jungpflanze in die Betrachtung kann weiterhin der Gesamtprozeß der Einbettung beurteilt werden. Mit der vorliegenden Arbeit wurde eine wichtige Basis für die verfahrenstechnische Bewertung von Pflanzmaschinen geschaffen.



Weihenstephan, im Januar 1990

Prof. Dr. habil. M. Estler

Die vorliegende Dissertation wurde in den Jahren 1986 bis 1989 am Institut für Landtechnik der Technischen Universität München in Weihenstephan fertiggestellt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. M. Estler für die Überlassung des Themas sowie für die umsichtige Betreuung, die zum Gelingen der Arbeit beitrug.

In Gedenken an Herrn Professor Dr. H.-L. Wenner möchte ich meinen aufrichtigen Dank für die Ermöglichung der Arbeit am Institut für Landtechnik aussprechen.

Ebenso danke ich Herrn Professor Dr. D. Fritz für die Übernahme des Korreferates, sowie allen Mitarbeitern seines Institutes für Gemüsebau und seiner Gärtnerei für die Unterstützung bei der Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Rosenstein, dem Leiter der DEULA Freising, und seinen Mitarbeitern für die freizügige Bereitstellung der Bodenhalle.

Bei allen Mitarbeitern der Landtechnik Weihenstephan bedanke ich mich für ihre freundliche Unterstützung. Besonderer Dank gebührt Frau Lupp und Frau Schneider, den Mitarbeitern im Zeichenbüro und allen studentischen Hilfskräften, ohne deren Hilfe eine Arbeit in diesem Umfang nicht möglich gewesen wäre.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei den Firmen FÄHSE/ACCORD, FENDT, HEGE, LÄNNEN, und PAPE, die Geräte und Maschinen für die Versuche zur Verfügung stellten, sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Versuchsarbeiten.

Weihenstephan im Oktober 1989

Kurzzusammenfassung

Pflanztechnik im Feldgemüsebau - Auswirkungen der Einbettungswerkzeuge und ausgewählter Jungpflanzenanzuchtverfahren auf die Pflanzqualität

Die Einbettungsqualität von Pflanzmaschinen ist mit ausschlaggebend für den Erfolg einer gepflanzten Kultur. Die Einbettungswerkzeuge sind Furchenschar, Pflanzenablegevorrichtung und Druckrollen. In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß der Druckrollen untersucht.

Mit Hilfe eines Drucknehmers ist es möglich, die beim Pflanzvorgang in der sich schließenden Furche auftretenden Druckkräfte kontinuierlich aufzuzeichnen.

Die Einflußfaktoren auf den Sondendruck sind das Rollengesamtgewicht, die Rollenbreite, der Rollendurchmesser, der Anstellwinkel zur Senkrechten, der Rollenabstand und die Meßtiefe. Zunehmendes Rollengesamtgewicht, größerer Anstellwinkel, engerer Rollenabstand und abnehmende Rollenbreite steigern den Druck in der Furche. Der Rollendurchmesser hat nur geringen Einfluß auf den Druck am Pflanzort.

Der Anwacherfolg wird außerdem vom Jungpflanzenanzuchtverfahren, der Pflanzbettvorbereitung und der Wasserversorgung beeinflusst. Gut durchwurzelte Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren sind widerstandsfähig gegen statischen Druck wie auch dynamischen Stoß.

Abstract

Transplantingtechnique - Influence of the planting-tools and of selected raisingsystems on the transplanting quality

The transplanting quality of vegetable seedlings is of prime importance for the success of a transplanted crop.

The planting-tools of semiautomatic transplanters are the furrow-opener, the device for bringing the seedling into the open furrow and the presswheels. By means of a special pressuresensor it is possible to measure the soilpressure in the closing furrow, which is influenced by the parameters of the presswheels.

Summarizing the results of the experiments it is possible to influence the pressure at the rootball by changing the weight, the angle and the width of the presswheels. There is only a minor influence by changing the diameter. The rooting of the seedlings is moreover influenced by the raisingsystems, the plantbed-preparation and the watersupply. Plug-raised seedlings are resistant to static pressure and dynamic push.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Ziel	4
2. Pflanzsysteme im Feldgemüsebau	6
2.1 Anforderungen an teilautomatische Pflanzmaschinen für Containerjungpflanzen	8
2.2 Einbettungswerkzeuge	9
2.2.1 Pflanzschar	9
2.2.2 Pflanzenablage	12
2.2.3 Druckrollen	14
3. Druckerfassung im Boden beim Einsatz von Pflanzmaschinen	18
3.1 Das Verhalten von Boden auf Druck	19
3.1.1 Bodenvorverdichtung und Bodenwassergehalt	19
3.2 Kräftegleichgewicht von Druckrollen	20
3.2.1 Bodenverlagerung in Fahrtrichtung	20
3.2.2 Bodenverdichtung senkrecht zur Fahrtrichtung	22
3.2.2.1 Druckausbreitung unter Stempeln	22
3.2.2.2 Druck/Einsinkbeziehung senkrechter Rollen	25
3.3 Druck/Einsinkbeziehung von Druckrollen von Pflanzmaschinen	25
3.4 Bodendruckmessung	29
4. Bestimmung der Druckausbreitung unter Druckstempeln und Druckrollen	33
4.1 Material und Methoden der Druckstempelversuche	33
4.2 Ergebnisse der Druckstempelversuche	38
4.3 Erfassung des Bodendruckes am Pflanzort beim Einsatz von Druckrollen	44
4.3.1 Material und Methode der Drucksondenversuche	44
4.3.1.1 Meßverfahren zur Bodendruckbestimmung in der Pflanzfurche	45
4.3.1.2 Versuchspflanzmaschine	48
4.3.1.3 Ort der Messungen	50
4.3.2 Versuchsdurchführung	50
4.3.3 Statistische Auswertung	53
4.3.4 Ergebnisse aus Drucksondenversuchen	53
4.3.4.1 Bodendichte ρ	54

	Seite
4.3.4.2 Bodenwassergehalt WG	55
4.3.4.3 Druckrollengesamtgewicht F	56
4.3.4.4 Druckrollenbreite B	61
4.3.4.5 Druckrollendurchmesser D	64
4.3.4.6 Druckrollenanstellwinkel α	69
4.3.4.7 Regressionsgleichungen aus F, B, D, α	74
4.3.4.8 Meßtiefe T	76
4.3.4.9 Druckrollenabstand A	78
5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse der Druckstempel- und Drucksondenversuche	 80
5.1 Grundlagenuntersuchungen	80
5.1.1 Druckrollenparameter	81
5.1.2 Spurtiefe	88
5.1.3 Beispiel einer Anwendung	90
5.2 Anwendung der Ergebnisse bei praxisüblichen Pflanzmaschinen	91
6. Praxisuntersuchungen zur Beschreibung der Einflüsse von Jungpflanzenanzucht und Pflanzung auf den Anwacherfolg	 98
6.1 Fähigkeit der Pflanze zum Ertragen von Verpflanzstreß	98
6.2 Anzuchtverfahren, deren Einfluß auf Anwacherfolg und Ertrag	99
6.2.1 Anzuchtfläche	101
6.2.2 Einfluß des Verpflanzalters auf Kulturdauer und Ertrag	102
6.3 Empfindlichkeit von Blatt und Wurzel	103
6.4 Einfluß des Pflanzvorganges auf den Anwacherfolg	103
6.4.1 Pflanzeneinbettung und Bodenvorbereitung	104
6.4.2 Boden- und Substratwasser	105
6.4.3 Umwelteinflüsse	107
7. Untersuchung der Belastungsempfindlichkeit von Jungpflanzen mit kleinvolumigem Substratballen	 108
7.1 Dynamische und statische Druckbelastung	108
7.2 Jungpflanzenanzucht	109
7.3 Druckbelastung der Wurzelballen	109
7.3.1 Material und Methode der statischen Druckbelastung	110
7.3.2 Versuchsergebnisse	111
7.3.2.1 Substratdichte	111
7.3.2.2 Jungpflanzenfrischgewicht	113
7.3.2.3 Jungpflanzenfrischgewicht und Substratdichte	114
7.3.2.4 Substratwassergehalt	116
7.3.2.5 Art des Substrates	117

	Seite
7.3.2.6 Rückstellverhalten nach Druckbeaufschlagung	118
7.4 Dynamische Stoßbelastung von Jungpflanzenballen	119
7.4.1 Versuchsdurchführung	120
7.4.2 Versuchsergebnisse der dynamischen Stoßbelastung	120
7.4.2.1 Formveränderung	120
7.4.2.2 Substratverlust	121
8. Wertung der Ergebnisse zur Belastungsempfindlichkeit von Jungpflanzen	123
9. Gesamtdiskussion der Einflußfaktoren auf den Anwacherfolg	128
9.1 Boden und Bodenvorbereitung	128
9.2 Wasserversorgung am Pflanzort	129
9.3 Jungpflanzenanzucht	131
9.4 Pflanzeneinbettung	133
10. Zusammenfassung	139
11. Literaturverzeichnis	142
12. Anhang	148

Verzeichnis der Abbildungen

Nr.		Seite
1.1	Einflußfaktoren auf den Anwacherfolg	2
2.1	Mechanisierungsstufen von Pflanzmaschinen	6
2.2	Klemmscheiben-Pflanzmaschine	7
2.3	Teilautomatische Pflanzmaschinen	10
2.4	Scharvorderkanten von Pflanzscharen	11
2.5	Das Verhältnis von Furchentiefe zur Pflanztiefe bei verschiedenen Jungpflanzenablageverfahren	12
2.6	Druckrollenprofile von Pflanzmaschinen	15
3.1	Kräftegleichgewicht bei wichtigen Fahrzuständen des starren Rades	21
3.2	Bodenbewegung an der Oberfläche und in der Tiefe unter gezogenen und angetriebenen Rädern nach Beobachtungen in der Bodenrinne	21
3.3	Bestimmung der Bodeneigenschaften	23
3.4	Einsinkverhalten der Druckrollen bei verändertem Gesamtgewicht	26
3.5	Einsinkparameter von Druckrollen	27
3.6	Verdrängte Fläche, Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen in Abhängigkeit von der Spurtiefe	28
4.1	Versuchsaufbau der Druckstempelanlage	34
4.2	Vertikale Bodenverlagerung unter einem Druckstempel mit 20 ° Anstellwinkel	35
4.3	Bodenverlagerung unter Druckstempeln mit 20 ° Anstellwinkel. Dargestellt sind die Linien gleicher vertikaler Bodenverlagerung	35
4.4	Vertikale und horizontale Bodenverlagerung unter Druckstempel mit 15 ° Anstellwinkel	36
4.5	Laufflächenprofile der Druckrollen der Versuchspflanzmaschine "V" und den Pflanzmaschinen "L" und "C"	37
4.6	Kraftwirkungslinien im Boden bei senkrechter Stempel-Druckrichtung mit senkrechter (a) bzw. abgewinkelten Stempelaufstandsflächen (b, c)	39

Nr.		Seite
4.7	Kraftwirkungslinien im Boden bei schräger Stempel-Druckrichtung mit senkrechten (a, b) bzw. zur Druckrichtung abgewinkelten Stempelaufstandsflächen (c, d)	41
4.8	Kraftwirkungslinien im Boden bei schräger Stempel-Druckrichtung mit profilierten Aufstandsflächen (a = "L", b = "C")	42
4.9	Vergleich von Drucksonde und Jungpflanze	45
4.10	Aufbau der Drucksonde	46
4.11	Aufbau der Meßanordnung zur Erfassung des Sondendruckes	47
4.12	Druckverlauf in der Sonde bei Temperaturänderung	47
4.13	Druckverlauf in Abhängigkeit vom Einbettungswinkel	48
4.14	Versuchspflanzmaschine in der Bodenrinne	49
4.15	Einflußfaktoren der Druckrollen auf den Sondendruck (Druckrollengesamtgewicht F, Rollenbreite B, Rollendurchmesser D, Anstellwinkel α , Abstand A, Meßtiefe T, (Bodenwasserergehalt WG, Bodendichte ρ))	49
4.16	Führungsgestell zur Eingabe der Drucksonden in die Furche	50
4.17	Druckverlauf an der Sonde bei der Einbettung	52
4.18	Sondendruck und Spurtiefe in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden	56
4.19	Abhängigkeit des Sondendruckes vom Rollengesamtgewicht bei 40 cm (a) und 50 cm (b) Durchmesser der Druckrollen	57
4.20	Spurtiefe z, verdrängte Fläche z_F , Rollenaufstandsfläche z_A und verdrängtes Bodenvolumen z_V in Abhängigkeit vom Rollengesamtgewicht bei 40 cm (a) und 50 cm (b) Rollendurchmesser	59
4.21	Sondendruck in Abhängigkeit von Druckrollenbreite und Rollengesamtgewicht in VD1, 4, 5 (a) und VD16 (b)	62
4.22	Sondendruck in Abhängigkeit von der Rollenbreite	63
4.23	Spurtiefe, verdrängte Fläche, Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen in Abhängigkeit von der Rollenbreite	64
4.24	Sondendruck (a), Spurtiefe und verdrängte Fläche (b) in Abhängigkeit von Rollendurchmesser und Gesamtgewicht	65
4.25	Sondendruck in Abhängigkeit von Rollendurchmesser und Rollenbreite	67

Nr.		Seite
4.26	Spurtiefe, verdrängte Fläche (a), Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen (b) in Abhängigkeit von Rollendurchmesser und Rollenbreite	68
4.27	Spurtiefe, verdrängte Fläche und Rollenaufstandsfläche in Abhängigkeit vom Rollendurchmesser und Rollenbreite bei senkrechten Druckrollen	69
4.28	Sondendruck in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Rollengesamtgewicht bei 40 cm (a) und 50 cm (b) Rollendurchmesser	70
4.29	Sondendruck in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Rollenbreite	73
4.30	Spurtiefe, verdrängte Fläche, Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen in Abhängigkeit vom Anstellwinkel	74
4.31	Sondendruck über die Meßtiefe	76
4.32	Sondendruck über die Meßtiefe in Abhängigkeit vom Anstellwinkel	77
4.33	Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand	78
4.34	Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand	79
5.1	Kraftwirkungslinien unter Druckstempeln in der Furche	84
5.2	Sondendruck in Abhängigkeit von der Zuladung bei den Pflanzmaschinen "A" und "L"	93
5.3	Sondendruck (a), verdrängte Fläche und Rollenaufstandsfläche (b) in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht von "A" im Vergleich mit Versuchspflanzmaschine "V"	94
5.4	Sondendruck (a), verdrängte Fläche und Rollenaufstandsfläche (b) in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht von "L" im Vergleich mit Versuchspflanzmaschine "V"	96
6.1	Anzuchtverfahren von Ballenpflanzgut	100
6.2	Verfügbarkeit von Wasser in Freilandböden (I) im Vergleich mit Torfsubstraten (II)	106
7.1	Versuchsaufbau zur Bestimmung der statischen (a) und dynamischen (b) Druckempfindlichkeit	110
7.2	Einfluß der Ballentrockendichte auf die Verformungsdruckkraft	111
7.3	Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes auf die Verformungsdruckkraft	113

Nr.		Seite
7.4	Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes und der Ballen-trockendichte (TKS) auf die Verformungsdruckkraft	114
7.5	Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes und der Ballen-trockendichte (Ehe) auf die Verformungsdruckkraft	115
7.6	Einfluß des Ballenwassergehaltes (a) und des Jungpflan-zenfrischgewichtes (b) auf die Verformungsdruckkraft	116
7.7	Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes, des Substrates, und des Anzuchtverfahrens auf die Verformungsdruckkraft	117
7.8	Rückstellverhalten des Wurzelballens in Abhängigkeit von Substrat, Jungpflanzenfrischgewicht und Pflanzenart	119
7.9	Formveränderung von Wurzelballen bei dynamischer Belastung	121

Verzeichnis der Tabellen

Nr.		Seite
1.1	Anbaufläche gepflanzter Kulturen	1
4.1	Fraktionen des Versuchsbodens	33
4.2	Spurtiefe z_S , verdrängtes Bodenvolumen z_{VS} und das auf gleichen Flächendruck bezogene verdrängte relative Bodenvolumen z_{VSR} bei gleicher Gesamtstempelbelastung F_S in Abhängigkeit von den Stempelleinstellungen α und β (P_S Flächendruck senkrecht zur Druckrichtung)	43
4.3	Einflußparameter der Druckrollen mit den jeweiligen Untersuchungsbereichen. Die Angaben in Klammern beziehen sich auf gesondert durchgeführt Versuche.	51
4.4	Maximaler Sondendruck P_{Max} , Sondenenddruck P_{End} und Spurtiefe z in Abhängigkeit von der Bodendichte bei gleicher Druckrollenvoreinstellung	54
4.5	Spurtiefe z , verdrängte Fläche z_F , Rollenaufstandsfläche z_A , verdrängtes Bodenvolumen z_V und der Kontaktflächen- druck F/z_A in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht für Rollendurchmesser von 40 cm (a) und 50 cm (b).	60
4.6	z , z_F , z_A , und z_V in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht und der Rollenbreite	66
4.7	z , z_F , z_A und z_V in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht und Anstellwinkel.	71
5.1	Spannweite von P_{Max} , z , z_F , z_A und z_V für den Gültigkeitsbereich von F , B , D und α , eingesetzt in die Regressionsgleichungen	81
5.2	Spurtiefe von "V", "A" und "L" ohne (-) und mit (+) Furchenschar, dargestellt bei jeweils 2 Gesamtgewichten ("V") bzw. 2 Zuladungen ("A", "L").	92
7.1	Druckkraft F_B bei den Anzuchtssystemen "St", "Cu", und "Ve", in Abhängigkeit von der Art des Substrates, der Substratdichte und dem Jungpflanzenfrischgewicht.	112
7.2	Verformungsverhalten von Jungpflanzenballen in Abhängigkeit von der Pflanzenart, der Art des Substrates, der Substratdichte und dem Jungpflanzenfrischgewicht.	122

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	cm	Druckrollenabstand
B	cm	Druckrollenbreite
E _R	%	Bestimmtheitsmaß
D	cm	Druckrollendurchmesser
F	N	Druckrollengesamtgewicht
F _A	N	Gewicht, welches über Aufhängung am Geräterahmen abgestützt wird
F _{AP}	N	Gewicht der Pflanzperson
F _B	N	Verformungsdruckkraft (Wurzelballen)
F _P	N	Pflanzmaschinengewicht
F _R	N	Radlast
F _S	N	Stempeldruckkraft
F _{Sch}	N	Gewicht, welches über das Schar am Boden abgestützt wird
F _{Zu}	daN	Zuladung bei praxisüblichen Pflanzmaschinen
GD	%	Grenzdifferenz
H	m	Fallhöhe
JP	g	Jungpflanzenfrischgewicht
M	Nm	Drehmoment
P	bar	Sondendruck
P _{End}	bar	Sondenenddruck
P _{hyd}	bar	mittlerer Druck in Drucknehmern
P _{Max}	bar	maximaler Sondendruck
P _S	bar	Stempelflächendruck
P _V	bar	mittlerer vertikaler Plattendruck
R	N	Bodenreaktionskraft
S	-	Standardabweichung
T	cm	Meßtiefe
T _R	N	Triebkraft
Verl	Gew.-%	Substratverlust des Wurzelballens
V _n	cm ³	Ballenvolumen
WG	Gew.-%	Bodenwassergehalt
a	mm	Wurzelballenenddicke
a _M	cm	Hebelarm der resultierenden Kontaktkraft
b	cm	Sempelplattenbreite
b _n	mm	Ballenbreite nach Verdichtung
d _n	mm	Ballendurchmesser nach Belastung
f	cm	horizontaler Abstand der resultieren Bodenkraft von der Reifenmitte
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h _n	mm	Ballendicke nach Verdichtung
k _C	N/cm	kohäsiver Modul
k _S	-	Steifigkeitsfaktor der Bodendrucksonde
k _ρ	N/cm ²	Reibungsmodul
l _n	mm	Ballenlänge nach Belastung
n	-	Stichprobenumfang
n _α	-	Exponent in der schrägen Druck/Einsinkungsbeziehung
n _Z	-	Exponent der Druck/Einsinkungsbeziehung

Symbol	Einheit	Bedeutung
r	cm	Radius
v _F	-	Arbeitsrichtung
v _{JP}	m/s	Fallgeschwindigkeit der Jungpflanze
z	cm	Spurtiefe der Druckrollen
z _A	cm ²	Rollenaufstandsfläche der Druckrollen
z _B	cm	Bezugstiefe
z _F	cm ²	verdrängte Fläche der Druckrollen
z _S	cm	maximale Stempeleinsinktiefte
z _V	cm ³	verdrängtes Bodenvolumen der Druckrollen
z _{VS}	cm ³	verdrängtes Stempelvolumen
z _{VSr}	cm ³	bezogenes verdrängtes Stempelvolumen
α	°	Anstellwinkel der Druckrollen
α _i	%	Irrtumswahrscheinlichkeit
α _S	°	Stempel-Anstellwinkel
β _S	°	Winkel der Stempeldruckfläche
δ	°	Einbettungswinkel der Drucksonde
μ	°	Winkel der Scharvorderkante
ρ	g/cm ³	Bodenlagerungsdichte
ρ _B	g/cm ³	Wurzelballendichte
σ _x , σ _y , σ _z	N/cm ²	Hauptspannungen

1. Einleitung

Zunehmender Konkurrenzdruck, insbesondere im Hinblick auf den europäischen Binnenmarkt, stellen an die Erzeuger landwirtschaftlicher und gartenbaulicher Produkte immer höhere Ansprüche. Nur durch die Produktion maximaler Qualität bei minimalen Erzeugungskosten ist weiterhin die Existenz vieler Betriebe gesichert.

Trotz dieser Schwierigkeiten ist nach den neuesten Erhebungen des Statistischen Bundesamtes seit 1987 wieder eine Zunahme der gemüsebaulichen Flächen zu verzeichnen. Auf ca. 50 % dieser Flächen werden Kulturen angebaut, die ausschließlich oder überwiegend gepflanzt werden. Zu dieser Gruppe zählen alle Kohlarten, Kopfsalat, Sellerie, Porree und Spargel (Tab. 1.1).

Tabelle 1.1: Anbaufläche gepflanzter Kulturen
(nach Statistisches Bundesamt 1989, Fritz u. Stolz 1989)

Gemüseart	Anbaufläche			Pflanzintensität +,0*
	1987	1988	Veränderung 1988 gegen 1987	
	ha		+/- %	
Weißkohl	5446	6060	+ 11.3	0
Rotkohl	2128	2334	+ 9.7	0
Wirsing	1471	1596	+ 8.5	0
Grünkohl	860	949	+ 10.3	0
Rosenkohl	446	494	+ 10.8	+
Blumenkohl	3325	3684	+ 10.8	0
Kohlrabi	1445	1621	+ 12.2	0
Kopfsalat	3654	3682	+ 0.8	0
Knollensellerie	1422	1434	+ 0.8	+
Porree	1666	1701	+ 2.1	0
Spargel	4281	4604	+ 7.5	+
Summe	26144	28159		

* + ausschließlich gepflanzt 0 überwiegend gepflanzt

Im Vergleich zur Einzelkornsaat ist das Pflanzverfahren von Gemüsejungpflanzen, bestehend aus der Jungpflanzenanzucht und dem Pflanzvorgang, ein kostenintensives Anbauverfahren. Zur Rationalisierung des aufwendigen

Pflanzverfahren sind seit einigen Jahren folgende Entwicklungen im Gange. Die Jungpflanzenanzucht wird auf kleinvolumige, in Trägerplatten angezogene, voll mechanisierbare Anzuchtverfahren umgestellt. Gleichzeitig wurden und werden vermehrt teilmechanische, ökonomisch und ergonomisch günstigere Pflanzverfahren eingesetzt. Langfristig geht der Trend in Richtung vollautomatischer Pflanzverfahren (LABOWSKY 1989).

Letztlich hat jedoch für den wirtschaftlichen Erfolg einer gepflanzten Kultur nicht allein die benötigte Anzahl an AKh/ha bei der Pflanzung einen Einfluß, sondern auch der Kulturerfolg, d.h. der Ertrag und die Ernteverfrüherung einer Kultur. Der Kulturerfolg wird bei gepflanzten Gemüsekulturen mit vom Anwacherfolg bestimmt. Viele verschiedene Faktoren haben einen Einfluß auf den Anwacherfolg (siehe Abb. 1.1), wobei der Pflanzmaschine und ihrer Einbettungsqualität eine entscheidende Bedeutung zukommt.

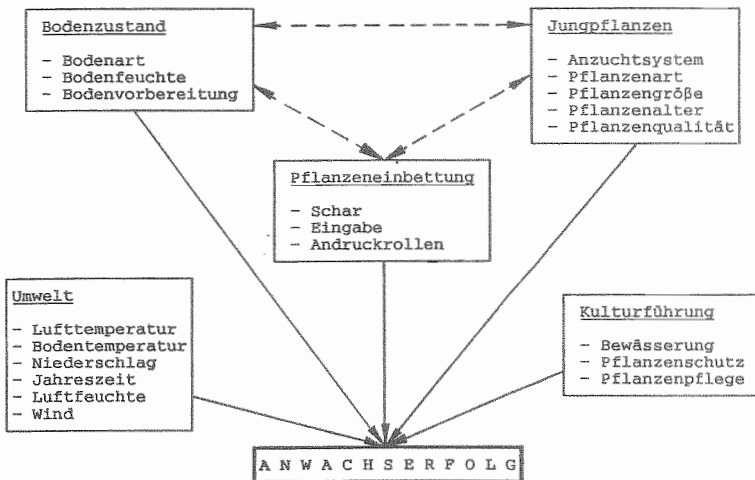


Abbildung 1.1: Einflussfaktoren auf den Anwacherfolg

Für eine optimale Einbettung soll der Wurzelballen in der dem Anzuchtverfahren und der Pflanzenart entsprechenden Tiefe, senkrecht und in gleichmäßigem Abstand abgelegt werden. Durch Umschließen des Wurzelballens mit feuchter, feinkrümlicher Erde und Andrücken derselben wird der Bodenschluß erzeugt, der für die Wassernachlieferung aus den umgebenden Bodenschichten benötigt wird.

1.1 Problemstellung

Beim Pflanzverfahren kommt der optimalen Einbettung der vorgezogenen Jungpflanzen und vor allem dem Herstellen des gewünschten Bodenschlusses zur Erzielung einer hohen Anwachsrate eine zentrale Bedeutung zu. Trotzdem wurden bisher nur wenige Untersuchungen veröffentlicht, die sich mit Fragen der Einbettungswerkzeuge von Pflanzmaschinen, dem Furchenschar, der Pflanzenablage oder den Druckrollen befassen. KANAFOJSKY (1967) beschreibt die theoretischen Grundlagen der Funktionsweise der Einbettungswerkzeuge. Versuche zur Ermittlung des Ablaufes und des Ortes des Furchenschlusses hinter dem Pflanzschar in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Bodenfeuchte wurden von PETKOV und TRAJANOV (1978) durchgeführt.

Es fehlen allerdings Untersuchungen jeder Art zur Beschreibung des Pflanzenfestlegungsprozesses durch die Druckrollen. So liegen aus pflanzenbaulicher Sicht keine Erfahrungen vor, welche Bedingungen für ein optimales Anwachsresultat anzustreben sind.

Unter den verschiedenen Pflanzmaschinen ist kein einheitlicher Trend bei der Ausführung der Einbettungswerkzeuge zu erkennen. Die Druckrollen unterscheiden sich, je nach Hersteller, in ihrem Durchmesser, in der Breite, in ihrem Anstellwinkel, dem Profil der Laufflächen und in ihrem Abstand zueinander. Außerdem sind die Pflanzmaschinen unterschiedlich schwer. Teilweise werden die Druckrollen zusätzlich durch die Pflanzperson belastet, ohne daß bekannt ist, wie sich eine Mehrbelastung im Boden auswirkt bzw. in welcher Art und Weise die Druckkraft in Abhängigkeit von den Druckrollenparametern in der Furche wirkt. Für die weitere Entwicklung von Pflanzmaschinen ist die Kenntnis über die Bedeutung der einzelnen Einflußparameter erforderlich. Zum Beispiel ist es im Augenblick nicht möglich, eine Aussage darüber zu treffen, wie sich eine Änderung des Anstellwinkels auf den Druck in der Furche auswirkt.

Weiterhin liegen auch keine Untersuchungen vor, die den gesamten Verfahrensablauf der Einbettung vom Öffnen bis zum Schließen der Furche verfolgen. Eine Wertung der einzelnen Einbettungsverfahren bei unterschiedlichen Pflanzmaschinen kann bisher nicht durchgeführt werden.

Ebenfalls gibt es keine Erfahrungen, wie Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren auf die Belastungen bei der Einbettung reagieren. Hierbei werden die Wurzelballen durch dynamischen Stoß wie auch mit statischem

Druck beaufschlagt. Ob und gegebenenfalls in welcher Weise die Jungpflanzen bzw. die Wurzelballen durch diese Belastung in Mitleidenschaft gezogen werden, ist nicht bekannt.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einbettung von Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren mit teilmechanischen Pflanzmaschinen in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Aufgrund der Vielschichtigkeit des Problems und der unterschiedlichen Vorgehensweisen wird eine Aufteilung des Gesamtzieles in Teilziele notwendig.

Das erste Teilziel ist die Erfassung der bodendynamischen Zusammenhänge im Pflanzbett beim Schließen der Furche und beim Andrücken der Jungpflanzenballen durch die Druckrollen. Durch welche Einflußfaktoren wird der Druck in der Furche beeinflusst und durch welche Maßnahmen kann der Druck variiert werden?

- Zur Erfassung der Druckkräfte in der Furche soll eine Drucksonde entwickelt werden, die in ihrer Form und Größe dem Jungpflanzenballen entspricht. Sie soll bei der Einbettung kontinuierlich Druckmessungen vornehmen können.
- Die von den Druckrollen abhängigen Einflußfaktoren sollen mit Hilfe der Drucksonde bestimmt werden.
- Mit Hilfe von Messungen der Spurtiefe der Druckrollen nach der Einbettung soll versucht werden, über eine Spurtiefenänderung, ausgelöst durch unterschiedliche Druckrollenparameter, Aussagen über den Druck in der Furche zu treffen.
- Außerdem soll der Verdichtungs Vorgang von schräg angestellten Druckrollen durch Untersuchungen an Hand von Druckstempeln mit schräger Druckrichtung simuliert werden.
- Die Ergebnisse aus den Drucksonden- und Druckstempelversuchen sollen zur Beurteilung der Einbettungsqualität von in der Praxis üblichen

Pflanzmaschinen angewandt werden.

Das zweite Teilziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren auf ihre Belastungsempfindlichkeit für statischen Druck und dynamischen Stoß.

- Mit Hilfe von Druckstempelversuchen sollen die verschiedenen Einflußfaktoren bestimmt werden, die die Wurzelballenfestigkeit ausmachen.
- Außerdem sollen Untersuchungen der dynamischen Belastung Aufschluß darüber geben, in welcher Weise Jungpflanzen durch die Ablageverfahren in die Furche in ihrer Entwicklung gestört werden können.

Das dritte Teilziel dieser Arbeit ist, den gesamten Prozeß der Einbettung, von der Pflanzbettvorbereitung, der Wasserversorgung im Boden und der Jungpflanzenanzucht bis zur Einbettung durch die Pflanzmaschinen zu erfassen, zu diskutieren und zu werten.

2. Pflanzsysteme im Feldgemüsebau

Pflanzmaschinen lassen sich nach ihrer Mechanisierungsstufe aufgliedern in Pflanzhilfen, teilautomatische und vollautomatische Geräte. Durch die Mechanisierung einzelner Arbeitsschritte werden Erleichterungen bei der harten Pflanzarbeit möglich.

Abbildung 2.1 nennt die verschiedenen Pflanzsysteme, gegliedert nach der jeweiligen Mechanisierungsstufe.

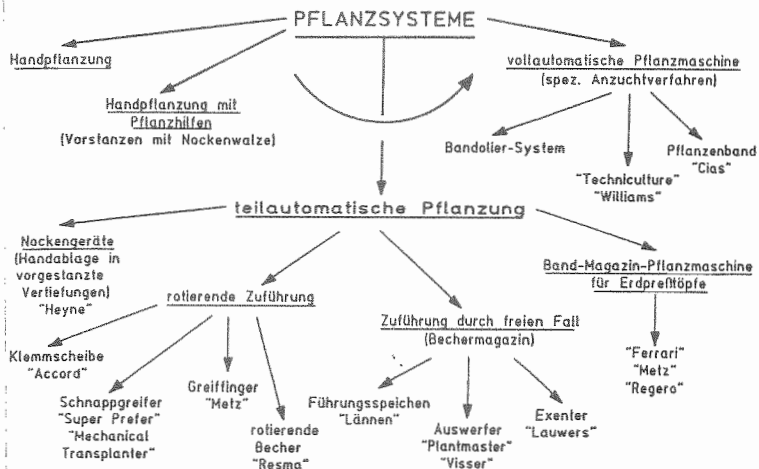


Abbildung 2.1: Mechanisierungsstufen von Pflanzmaschinen

Bei der Handpflanzung mit Pflanzhilfen wird durch das Vorstanzen der Pflanzlöcher mit Nockenwalzen eine erste Arbeitserleichterung erzielt. Vorstanzen und Pflanzen verlaufen getrennt voneinander.

Bei Nockengeräten, die bedingt zu den teilautomatischen Pflanzsystemen zu zählen sind, werden zusätzlich zum Lochstanzen die Pflanzpersonen und das Pflanzgut von der Pflanzmaschine befördert. Die Ablage der Pflanzen in die Löcher erfolgt wie bisher von Hand.

Eine echte Teilautomatisierung wird bei den Geräten mit rotierender Pflanzenzuführung, Zuführung durch freien Fall und den Bandmagazinpflanzmaschinen erreicht. Die Ablage der Jungpflanze durch die Pflanzperson erfolgt nicht

mehr direkt in die geöffnete Furche, sondern in eine Übergabevorrichtung, die bei der rotierenden Zuführung greifend oder klemmend ausgeführt sein kann. Bei der Zuführung durch freien Fall erfolgt die Ablage von Hand in Trichtermagazine und bei den Bandmagazinpflanzmaschinen werden die Erdpreßtöpfe zu mehreren gleichzeitig auf ein Transportband gestellt. Der eigentliche Pflanz- oder Einbettungsvorgang in den Boden erfolgt rein mechanisch ohne Eingriff des Pflanzers.

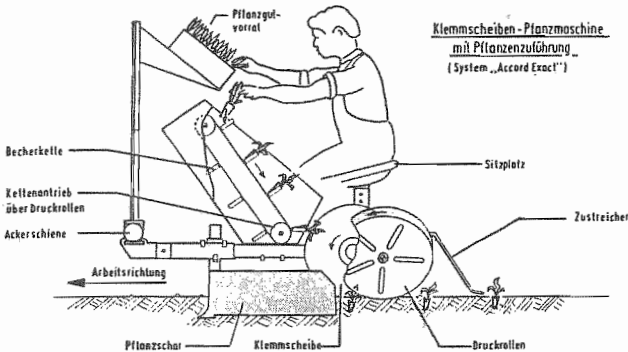


Abbildung 2.2: Klemmscheiben-Pflanzmaschine

Bei vollautomatischen Pflanzmaschinen wird angestrebt, neben dem Pflanzvorgang auch die Entnahme der Jungpflanzen aus den Anzuchtbehältern zu automatisieren. Hierdurch wird es möglich, mehrreihig arbeitende Geräte mit einer Arbeitsperson zu betreuen.

Die Teilautomation wie auch die Vollautomatisierung stellen spezifische Anforderungen an das Jungpflanzenmaterial in bezug auf Ballengröße, Ballenfestigkeit und Handhabbarkeit der Jungpflanzen.

Hierzu haben in den letzten Jahren Jungpflanzen mit kleinvolumigen Substratballen aus Anzuchtplatten, sog. Containerjungpflanzen Bedeutung erlangt. Sie gelten als relativ unempfindlich gegenüber mechanischer Belastung. Das jeweilige Substratvolumen schwankt je nach Anforderung zwischen 10 und 25 cm³.

2.1 Anforderungen an teilautomatische Pflanzmaschinen für Jungpflanzen aus Anzuchtplatten

Teilautomatische Pflanzmaschinen sollen nach Aussagen verschiedener Verfasser die folgenden Anforderungen erfüllen (KANAFUJSKI 1967, LABOWSKY 1984 a, STRUZINA 1986):

- die Jungpflanzen sollen ohne Beschädigung gepflanzt werden.
- die Jungpflanzen sollen möglichst senkrecht im Boden zu stehen kommen (zulässige Abweichung von der Senkrechten maximal 30 % (KANAFUJSKI 1967)).
- die Wurzelballen der Pflanzen sollen dicht mit Erde umgeben sein, um einen ausreichenden Bodenschluß zu gewährleisten, außerdem soll die Ballenoberfläche mit lockerem Boden bedeckt sein, um das Austrocknen der Ballen zu vermeiden (Dochteffekt).
- eine exakte Tiefenführung soll eine gleichmäßige Ablagetiefe der Jungpflanzen gewährleisten.
- die Abweichung vom verlangten Pflanzabstand in der Reihe soll 10 % nicht überschreiten, wobei die Möglichkeit der Abstandsänderung in weiten Grenzen berücksichtigt werden soll.
- es sollen geringe Reihenabstände gepflanzt werden können.
- die Pflanzmaschine soll zum Pflanzen verschiedener Arten von Gemüsejungpflanzen aus unterschiedlichen Anzuchtverfahren geeignet sein.
- die Pflanzleistung soll möglichst hoch sein.
- der Arbeitsplatz soll ergonomisch günstig konzipiert sein, um eine relativ angenehme und ermüdungsfreie Arbeit der Pflanzler zu gewährleisten.
- die Mitnahme von genügend Pflanzmaterial soll gewährleistet sein, um Rüstzeiten so gering wie möglich zu halten.

- der Anbau von Reihendüngerstreuer und Gießeinrichtungen soll möglich sein.

In den Abbildungen 2.2 und 2.3 sind exemplarisch verschiedene teilautomatische Pflanzmaschinen mit den üblichen Pflanzenablageverfahren dargestellt. Auf diese wird im Anschluß noch näher eingegangen.

2.2 Einbettungswerkzeuge

Die Einbettung des Wurzelballens in den Boden erfolgt bei Pflanzmaschinen in drei Arbeitsschritten. Diese sind das Öffnen der Furche durch das Pflanzschar, das Ablegen der Pflanze in die offene Furche und das anschließende Schließen der Furche durch Druckrollen; gegebenenfalls kombiniert mit einem Glätten der Oberfläche durch Zustreicher.

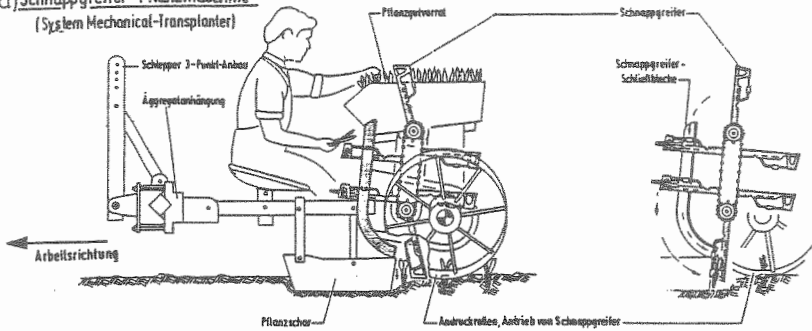
2.2.1 Pflanzschar

Die Aufgabe des Pflanzschares ist es, eine Furche (Pflanzrille) mit rechteckigem Furchenquerschnitt zu bilden. Die seitlichen Leitbleche verhindern das vorzeitige Zurückrutschen der Furchenböschungen, so daß der Jungpflanzenballen noch in die ausgeräumte Furche abgelegt werden kann.

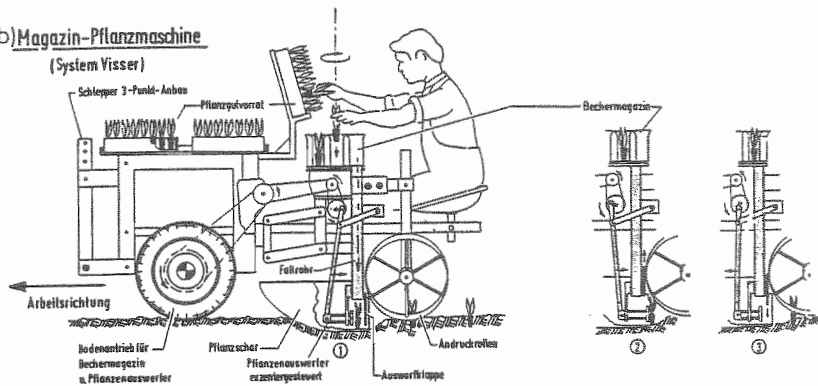
Weil die Furche ähnlich einer "Wasserfurche" mit dem Bootsbug gebildet wird, muß das Pflanzschar Stromlinienform besitzen (KANAFUJSKI 1967). Die jeweilige Zugkraft für ein Schar hängt direkt vom Querschnitt der Furche (Scharbreite), vom Widerstand des Bodens, von der Arbeitsgeschwindigkeit, progressiv von der Arbeitstiefe und von der Form der Scharschneide ab (SCHAAF 1979, PIETSCH 1977). Die Scharvorderkante kann unter einem stumpfen Winkel (Abb. 2.4 a), vertikal (b) oder unter einem spitzen Winkel (c) ohne und mit Fußabrundung (Zinken (d)) eingestellt sein. Der Zugkraftbedarf sinkt mit abnehmendem Winkel μ . Außerdem nimmt die Zugkraft bei Werkzeugen mit Fußabrundung ab, je weiter der Fuß voreilt (PIETSCH 1977).

Ein stumpfer Winkel verursacht ein Verdichten des Furchenbodens. Ein spitzer Winkel bewirkt ein Aufwerfen der unteren Bodenschichten nach oben und bringt damit feuchten Boden an die Oberfläche (WILKINS et al. 1983).

a) Schnappgreifer-Pflanzmaschine
(System Mechanical-Transplanter)



b) Magazin-Pflanzmaschine
(System Visser)



c) Magazin-Pflanzmaschine
(System Lännen)

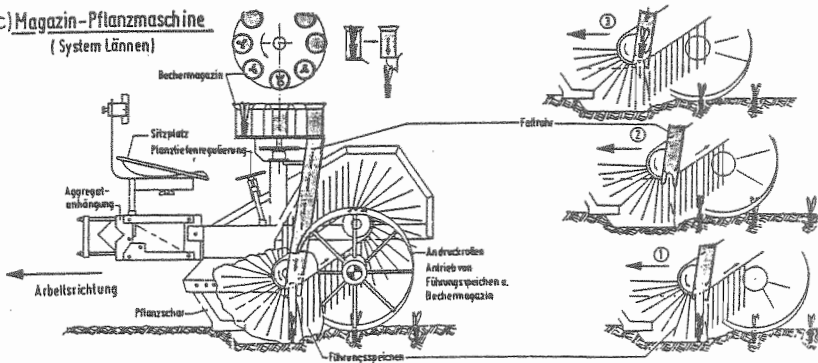


Abbildung 2.3 a - c: Teilautomatische Pflanzmaschinen

Das Durchpflügen des Bodens mit dem Schar führt zu vertikalen Kräften am Schar, die bewirken, daß das Schar, je nach Ausführung der Scharvorderkante, aus dem Boden gedrückt wird, neutral reagiert oder sich selbst in den Boden zieht. PIETSCH (1977) fand, daß erst bei einem Winkel der Scharvorderkante von $\mu < 60^\circ$ bis 70° die Vertikalkraft zu 0 wird. Senkrechte Scharvorderkanten erfahren demnach eine Vertikalkraft aus dem Boden. Zinken bewirken eine nach unten wirkende Vertikalkraft und können damit den unerwünschten Effekt des Aushebens des Schares verhindern (Abb. 2.4 d).

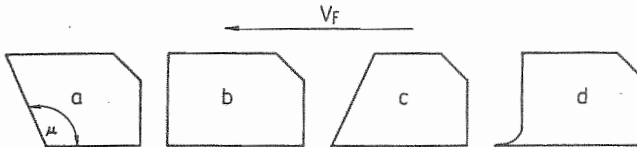


Abbildung 2.4: Scharvorderkanten von Pflanzscharen

Zusammenfassend können die folgenden Anforderungen an ein Pflanzschar gestellt werden:

- gleichmäßige Tiefenführung
- möglichst geringer Bodenaushub, um nicht unnötig feuchten Boden an die Oberfläche zu transportieren. Außerdem führt ein großer seitlicher Bodenaufwurf dazu, daß die Erde nicht mehr von den Druckrollen erfaßt und in Richtung Furchenmitte bewegt werden kann. Die Spurtiefe der Druckrollen wird größer.
- geringer Zugkraftbedarf
- Vermeidung von Verdichtungen an den Furchenwänden
- beginnender Furchenschluß erst dann, wenn die Jungpflanze in die Furche eingebracht ist.

2.2.2 Pflanzenablage

Die Pflanzenablage in die offene Furche kann bei teilmechanischen Pflanzmaschinen nach drei grundlegenden Verfahren unterschieden werden:

- mit Klemmfingern, Klemmscheiben oder Schnappgreifern (Abb. 2.2 und Abb. 2.3 a).
- durch freien Fall in das Schar und Ausstoßen in die Furche mit Hilfe eines Stempels (Abb. 2.3 b).
- durch freien Fall auf die Furchensohle und senkrecht ausrichten der Jungpflanzen mit Führungselementen (Abb. 2.3 c).

Seitens der Einbettung unterscheiden sich die drei Verfahren darin, daß beim ersten der Wurzelballen freihängend in die Furche eingegeben wird (Abb. 2.5 a). Dieses Verfahren verlangt eine relativ tiefe Furche. Beim zweiten Verfahren fällt die Pflanze auf eine Blechplatte am Schargrund oder wird zwischen den Scharflanken festgeklemmt (Abb. 2.5 b). Der Abstand zur Furchensohle ist geringer. Beim dritten Verfahren fällt die Jungpflanze direkt auf die Furchensohle und hat damit den engsten Kontakt zum aufsteigenden Kapillarwasser (Abb. 2.5 c).

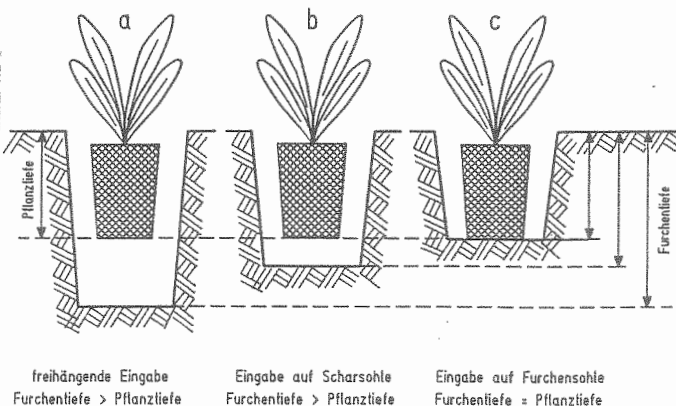


Abbildung 2.5 a-c: Das Verhältnis von Furchentiefe zur Pflanztiefe bei verschiedenen Jungpflanzenablageverfahren

Bei den Verfahren mit Klemmfingern, Klemmscheiben oder Schnappgreifern wird durch die kreisförmige Bahn der Klemmvorrichtung, die am Boden entgegen der Fahrtrichtung verläuft, die waagrechte, resultierende Geschwindigkeit der Jungpflanze gleich Null gesetzt. Beim Beginn des selbsttätigen Zuschüttens des Wurzelballens mit Erde durch Abrutschen der Furchenböschungen sollen sich die Greifer öffnen. Ein vorzeitiges Öffnen der Greifer hat ein Kippen der Pflanzen in Fahrtrichtung zur Folge. Ein verspätetes Öffnen kann zum Anheben der Pflanze und schlimmstenfalls zum Abreißen der Pflanze vom Wurzelballen führen. Ein möglichst großer Radius der Klemmvorrichtung ist anzustreben, um den Weglängenunterschied, den der Greifer vom Moment des Zuschüttens der Jungpflanzenwurzel bis zum Moment des Greiferöffnens vollzieht, und dem in dieser Zeit von der Maschine zurückgelegten Weg, auszugleichen (KANAFUJSKI 1967).

Beim zweiten und dritten Verfahren erfolgt die Zuführung der Jungpflanzen aus dem Magazin in die Furchenebene im freien Fall (Abb. 2.3 b und c).

Die Fallgeschwindigkeit v_{JP} der Jungpflanze ohne Berührung des Fallrohres bzw. der Führungsspeichen beträgt

$$v_{JP} = \sqrt{2 g \times H} \quad (1)$$

Eine möglichst geringe Fallhöhe H reduziert die Auftreffgeschwindigkeit und damit die mechanische Belastung der Jungpflanze, außerdem wird die Ablagegenauigkeit erhöht.

Während des Falls bewegt sich die Pflanze in Bewegungsrichtung mit der Arbeitsgeschwindigkeit der Pflanzmaschine relativ zum Boden vorwärts. Ohne seitliche Führung würde die Jungpflanze beim Auftreffen auf den Boden in Fahrtrichtung umfallen. Die Aufhebung dieser horizontalen Bewegung wird bei Geräten mit Auswurfstempeln so erreicht, daß der Stempel die Jungpflanze entgegen der Fahrtrichtung, d.h. mit negativer Arbeitsgeschwindigkeit aus dem Schar drückt. Die Pflanze erfährt relativ zum Boden keine Geschwindigkeit.

Bei der dritten Gruppe erfolgt die Aufhebung der horizontalen Bewegung durch Führung der Jungpflanzen zwischen Metallspeichen. Die Jungpflanze trifft mit der Fallgeschwindigkeit auf die Furchensohle auf und wird durch

die Speichen in ihrer senkrechten Position gehalten. Eine schwache Neigung der Speichen entgegen der Fahrtrichtung soll eine nachträgliche Schrägstellung durch den Bodengegenstrom ausschließen (PETKOV, TRAJANOV 1978).

Es werden auf dem Markt noch andere Verfahren angeboten, die sich jedoch grundsätzlich wenig von den drei beschriebenen Verfahren unterscheiden.

2.2.3 Druckrollen

Die Druckrollen haben neben dem Schließen der Furche und dem Andrücken der Jungpflanze zur Erzielung des benötigten Bodenschlusses die Aufgabe, das Pflanzaggregat am Boden abzustützen und die Tiefenführung des Schares zu steuern. Durch den Anstellwinkel der Druckrollen wird der vom Schar rechts und links der Furche aufgeworfene Boden besser erfaßt und in Richtung der Furchenmitte verdichtet. Außerdem übernehmen sie bei Pflanzmaschinen ohne Zentralantrieb den Antrieb der Einbettungswerkzeuge.

Die gerätetypischen Parameter der Druckrollen sind die durch sie auf den Boden übertragene Gewichtskraft F , die Rollenbreite B , der Rollendurchmesser D , das Laufflächenprofil, der Anstellwinkel α (Druckrichtung) und der Abstand A der Rollen zueinander (siehe Abb. 4.21). Die gebräuchlichen Rollendurchmesser liegen zwischen 30 cm und 60 cm, die Rollenbreiten zwischen 4 cm und 10 cm und die Anstellwinkel zwischen 6 und 25 Grad. Das Gewicht F , welches beide Druckrollen gemeinsam auf den Boden übertragen, setzt sich gerätespezifisch zusammen aus dem Pflanzmaschinengewicht F_P , gegebenenfalls dem Gewicht der Pflanzperson F_{AP} (typenbedingt), vermindert um das Gewicht, welches vom Schar auf dem Boden abgestützt wird F_{Sch} und vermindert um das Gewicht, welches über die Aufhängung am Pflanzrahmen F_A (typenbedingt) abgestützt wird. Die Gleichung lautet:

$$F = F_P + F_{AP} - F_{Sch} - F_A \quad (2)$$

Unterschiedliche Laufflächenprofile werden eingesetzt, um den Druck an der Pflanze zu optimieren, und um bei Geräten mit Bodenantrieb teilweise eine höhere Traktion zu erzielen. Eine Auswahl möglicher Laufflächenformen ist in

Abbildung 2.6 dargestellt. Neben der Abwinkelung der Lauffläche zur Regulierung der Druckrichtung (b, c, h) sind spezielle Profile gebräuchlich (e, f). Bei g handelt es sich um Rollen mit Schlappgummibereifung.

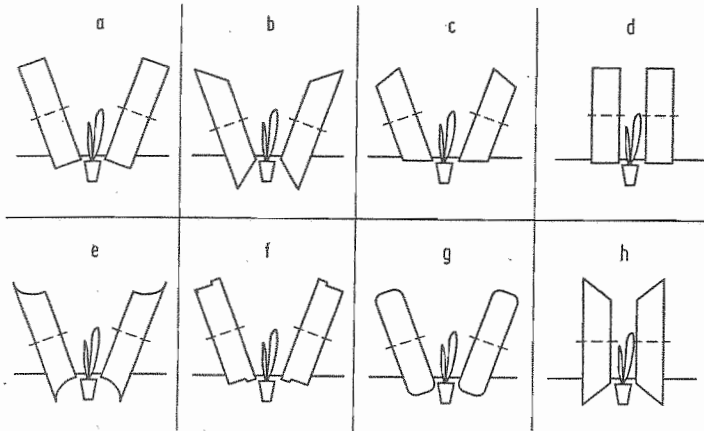


Abbildung 2.6 a-h: Druckrollenprofile von Pflanzmaschinen

Untersuchungen von PETKOV und TRAJANOV (1978) an Pflanzmaschinen zur Bestimmung des Ortes des Furchenschlusses belegen, daß die Furche hinter dem Scharende um so früher schließt, je langsamer die Arbeitsgeschwindigkeit ist. Durch den Einsatz der Druckrollen wird der Furchenschließpunkt weiter in Richtung Scharende vorverlegt. Außerdem entsteht ein Bodengegenstrom in Fahrtrichtung auf das Scharende zu, der bei geringen, für Pflanzmaschinen üblichen Geschwindigkeiten je nach Bodenfeuchte bis in das Scharende hineinreicht. Der Bodengegenstrom trifft auf die Jungpflanze und lenkt sie in Arbeitsrichtung der Pflanzmaschine ab. Daher sollen Jungpflanzen mit einer schwachen Rückwärtsneigung in die Furche eingegeben werden.

Untersuchungen an Druckrollen für Einzelkornsägeräte wurden von WAHODE (1985) und SCHAAF (1981) durchgeführt. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen sind nur unzureichend auf die Verhältnisse der Druckrollen von Pflanzmaschinen übertragbar. Bei Einzelkornsägeräten handelt es sich im Normalfall um einzelne Rollen, die die Aufgabe haben, dem Saatkorn einen ausreichenden Anschluß an das Bodenwasser zu vermitteln.

SCHAAF (1981) bestätigt in seinen Untersuchungen, daß auf die Intensität der Bodenverdichtung unter Rollen die Art oder Form der Druckrollen (Profil der Laufflächen), das Rollengewicht, aber auch die Bodenfeuchte, die Bodenvorverdichtung und die Bodenart (Lehm, Sand) einen Einfluß haben. Die Messungen erfolgten mit dem Penetrometer.

Durch den Einsatz unterschiedlicher Bauarten von Druckrollen konnte der maximal gemessene Druck um 15 bis 85 % reduziert werden. Die höchsten Drücke wurden an der Stelle gemessen, wo die Rollen die tiefste Spur (Einsinktiefe) verursachten. Flache Rollenaufstandsflächen verursachten einen gleichmäßigen Druck über die ganze Rollenbreite. Mit einer Verbreiterung der Rollen verringerte sich die gemessene Bodenverdichtung. Zwei seitlich angeordnete Druckrollen, wie sie in der Pflanztechnik eingesetzt werden, verdichteten den Boden in der Mitte für Saatzwecke nur ungenügend. Hier wurde der höchste Druck am Außenrand der Rollen gemessen.

Die Bodenverdichtung wird außerdem von der durch die Rollen übertragenen Gewichtskraft beeinflusst. Eine Erhöhung der Zuladung von 22 auf 68 daN erhöhte bei konstanter Voreinstellung die Bodenverdichtung um 41 %. Ein vor dem Überfahren stark vorverdichteter Boden erfuhr eine um 16 % höhere Verdichtung nach dem Abrollen als die Kontrolle. Lehmboden ließ sich leichter verdichten als Sand.

Der Einfluß der Bodenfeuchte bot ein uneinheitliches Ergebnis. Da jeder Boden einen spezifischen Feuchtebereich besitzt, in dem er maximal verdichtungsempfindlich ist, oberhalb und unterhalb dieses Bereichs aber weniger empfindlich auf Verdichtung reagiert, waren die Ergebnisse von SCHAAF (1981) erwartungsgemäß uneinheitlich.

Bei weiterführenden Messungen über den Zugkraftbedarf bei Druckrollen stellte SCHAAF (1981) fest, daß es so scheint, als ob zwischen dem Zugkraftbedarf und dem Rollendurchmesser keine Beziehung bestünde. Dies widerspricht grundlegenden Erfahrungen aus der Bodenmechanik, wo Reifen mit größerem Durchmesser einen geringeren Rollwiderstand aufweisen (WENNER 1982).

Inwieweit sich die vorgestellten Ergebnisse durch grundlegende Untersuchungen aus der Bodenmechanik und durch eigene Messungen bestätigen lassen, wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Die Beurteilung der pflanzenphysiologischen Wirkung unterschiedlicher Einbettungsverfahren auf die Jungpflanze wird abschließend in dieser Arbeit untersucht und gewertet.

3. Druckerfassung im Boden beim Einsatz von Pflanzmaschinen

Zum Verständnis des Druckverlaufes in der Pflanzfurche bei der Überfahrt der Druckrollen von Pflanzmaschinen sind grundlegende Untersuchungen nötig. Wie schon beschrieben, liegen bisher kaum Erfahrungen über das Einbettungsverhalten von Pflanzmaschinen vor, so daß zur Interpretation auf Ergebnisse aus der grundlegenden Bodenmechanik zurückgegriffen wird.

Die Beziehung zwischen Belastung und Verdichtung im Boden unter Rädern wurde schon in den 50er Jahren intensiv von SÖHNE (1951, 1952, 1953) untersucht. Er beschrieb, daß ein Druckspannungsfeld im Boden durch ein darüber rollendes Rad entsteht. Seine Größe hängt von der Last, der Größe der Berührungsfläche, der Druckverteilung in der Berührungsfläche und der Bodenart, Feuchtigkeitsverteilung und Lagerungsdichte ab. Aufgrund der Fülle von Einflußfaktoren ist es bis heute nicht gelungen, eine einheitliche Druck-Einsink- bzw. Druck-Verdichtungsbeziehung zu erstellen (BOLLING 1987).

Bei Druckrollen von Pflanzmaschinen handelt es sich um starre Räder auf nachgiebigem Boden. Hierzu liegen von KRICK (1971), ONAFEKO und REECE (1967) und POPE (1969) Erkenntnisse vor.

Schwierigkeiten bei der Beschreibung des Abrollvorganges der Druckrollen von Pflanzmaschinen und bei der Erfassung der beim Einbettungsvorgang auftretenden Drücke bereitet jedoch, daß

- die Druckrollen nicht senkrecht stehend im Boden abrollen, sondern in einem Winkel zueinander seitlich angestellt sind
- die Messungen im gestörten Oberboden bis zu einer Tiefe von 10 cm stattfinden
- die Druckverhältnisse nicht senkrecht unter den Rollen, sondern zwischen den Rollen in der geschlossenen Furche erfaßt werden sollen.

Aufgrund dieser Problematik sind bestehende Erkenntnisse nur teilweise übertragbar.

3.1 Das Verhalten von Boden auf Druck

Die Auswirkung der Druckbelastung eines Bodens, d.h. wie und in welchem Verhältnis sich die eingetragene Energie in bleibende und elastische Verformung umsetzt, hängt von einer Vielzahl von Einflußfaktoren ab: z.B. von Lagerungsdichte, Bodenfeuchte, Bodenart (Textur, Anteil an organischer Substanz, Korngrößenfraktion, Kornform, Kornrauigkeit), Art der Strukturierung, Kationenbelegung des Sorptionskomplexes, Bodenbearbeitung, Höhe und Dauer der Belastung sowie Grad der Vorbelastung (BOLLING 1987, HORN 1980 und 1986, KOOLEN und KUIPERS 1983, ROGASIK und MORSTEIN 1987, SOMMER 1985). Das HOOKE'sche Gesetz, nach dem die Verformungen proportional den Druckspannungen sind, gilt für Ackerböden nicht (BOLLING 1987, SÖHNE 1952). Die elastische Verformung des Bodens ist klein. Sie wird durch die elastische Verdichtung der eingeschlossenen Luft sowie der Humusbestandteile verursacht. Die plastische Verformung entsteht durch Verdichten oder Fließen des Bodens. Es ist darunter die Verringerung des Porenvolumens durch einen ausgeübten Druck zu verstehen.

3.1.1 Bodenvorverdichtung und Bodenwassergehalt

Das Befahren eines nachgiebigen Bodens mit einem Rad, d.h. die Belastung dieses Bodens mit einer Kraft, führt zu einer Verformung dessen, bis das Gleichgewicht zwischen Auflast und Bodentragfähigkeit wiederhergestellt ist. Zuerst werden die leicht verdichtbaren Grobporen verringert, dann die Mittelporen. Sind nur noch wassergefüllte Poren vorhanden, beginnt der Boden zu fließen. Lockere Böden, wie sie z.B. für die Pflanzung benötigt werden, sind durch den hohen Grobporenanteil extrem verdichtungsempfindlich (KNITTEL 1975, SÖHNE 1952, SOMMER und ZACH 1986).

Untersuchungen von KRICK (1971) zeigen, daß eine unterschiedliche Bodendichte (gefräst, gewalzt, gestampft) bei ein und demselben Boden den Verlauf einer Druck-Einsinkkurve vollständig ändert.

Weiterhin steigt die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens mit der Bodenfeuchte an, bis die Wassersättigung erreicht ist. Sind alle Poren mit Wasser gefüllt, kann sich die Verdichtung nur noch durch Auspressen von Wasser erhöhen und die Verdichtungsempfindlichkeit nimmt ab (SÖHNE 1952).

Dieser Fall tritt jedoch erst bei einer Bodenbelastung auf, die weit über der durch Pflanzmaschinen verursachten liegt.

Wie Versuche von BOLLING (1987) mit Drucksonden zeigen, bewirkt eine Variation des Bodenwassergehaltes um +/- 3 % einen erheblichen Unterschied bei der Verdichtung.

Pflanzfertige Böden sollten einen hohen Wasserversorgungsgrad aufweisen, um den Pflanzen das Anwachsen zu erleichtern. Damit sind diese Böden noch zusätzlich zur geringen Lagerungsdichte extrem verdichtungsempfindlich.

Ein feuchter, lockerer Boden kann am leichtesten verdichtet werden. Trockene oder nasse Böden mit hoher Ausgangsdichte lassen sich weniger stark zusammenpressen.

3.2 Kräftegleichgewicht von Druckrollen

Zur verständlicheren Darstellung der bei der Überfahrt mit Druckrollen von Pflanzmaschinen im Boden wirkenden Kräfte wird der Bewegungsablauf aufgegliedert. Zum einen in den reinen Schließvorgang der Furche und zum anderen in den nachfolgenden Verdichtungsvorgang, der den Bodenschluß am Wurzelballen verursacht.

3.2.1 Bodenverlagerung in Fahrtrichtung

Druckrollen von Pflanzmaschinen verhalten sich wie gezogene, frei rollende starre Räder oder gebremste starre Räder, wenn durch die Rollen der Antrieb der Pflanzeneingabevorrichtung erfolgt. Die Kräftegleichgewichte für ein gezogenes, ziehendes und gebremstes Rad sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Es handelt sich in allen Fällen um einen stationären Betriebszustand, d.h. es sollen weder Beschleunigungen noch Verzögerungen auftreten (SÖHNE 1951, BOLLING 1987).

Die resultierenden Bodenreaktionskräfte R ergeben sich als das Integral der Normal- und Schubspannung in der Berührungsfläche. Die horizontale Kraftkomponente ändert vom Fall des ziehenden Rades (a) zum Fall des gezogenen Rades (b, c) ihre Richtung. Das gezogene Rad, insbesondere das gebremste Rad, löst

eine horizontale Schubspannung in Fahrtrichtung aus.

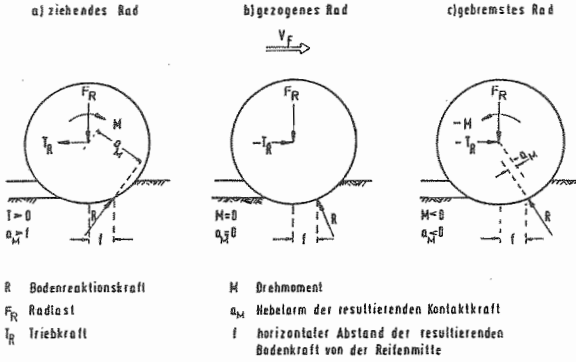


Abbildung 3.1: Kräftegleichgewicht bei wichtigen Fahrzuständen des starren Rades (nach SÖHNE 1951, BOLLING 1987)

Infolge dieser Druck- und Schubkräfte auf den Boden treten bei starren Rädern Bodenbewegungen an der Oberfläche und in der Tiefe nach Abbildung 3.2 auf. Maßgebend für die Größe der horizontalen Bodenverformung und die Bewegung der einzelnen Bodenteilchen ist die horizontale Spannungskomponente im Boden (SÖHNE 1951). Bei der Überfahrt eines Rades wird demnach der Boden

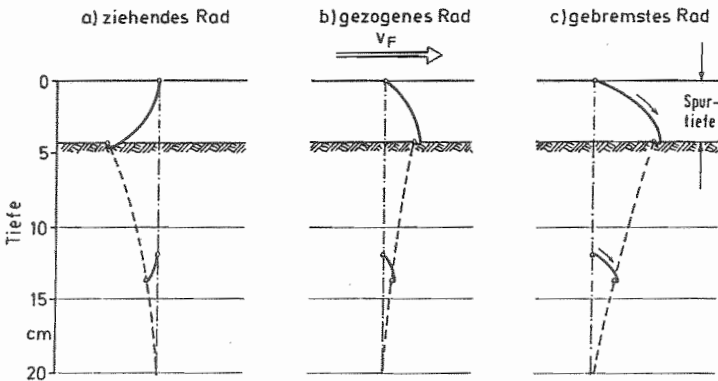


Abbildung 3.2: Bodenbewegung an der Oberfläche und in der Tiefe unter gezogenen und angetriebenen Rädern nach Beobachtungen in der Bodenrinne (nach SÖHNE 1951)

nicht nur verdichtet, sondern auch verlagert. Die Rollen schieben einen nachgiebigen Boden wie eine Bugwelle vor sich her (SÖHNE 1952, VINCENT 1961).

Bezogen auf die Druckrollen der Pflanzmaschinen bedeutet dies, daß die Furche um so früher schließt, je größer die horizontale Schubspannung in Fahrtrichtung, ausgelöst durch den Rollwiderstand bzw. verstärkt durch den Antrieb der Pflanzenablagewerkzeuge, ist. Kleine Rollen verursachen bei gleicher Spurtiefe einen größeren Rollwiderstand (WENNER 1982), bewirken dadurch eine höhere vertikale Schubspannung und schließen damit die Furche früher als große Rollen.

3.2.2 Bodenverdichtung senkrecht zur Fahrtrichtung

Zur Beschreibung der bei der Einbettung am Wurzelballen wirkenden Kräfte liegen keine Untersuchungen vor, sondern müssen Ergebnisse aus Versuchen mit Druckstempeln und senkrechten Rädern und Rollen angewandt werden.

3.2.2.1 Druckausbreitung unter Stempeln

Druck und Schub in der Kontaktfläche zwischen Druckstempel und Boden bzw. Druckrolle und Boden bewirken im Boden ein Spannungsfeld, das sich mit zunehmender Entfernung vom Ort der Krafteinleitung abbaut (HORN 1980). Dieses Spannungsfeld stellt die eigentliche Beanspruchung des Bodens dar (BOLLING 1987). Das Druckspannungsfeld wird in der Literatur meist als Druckzwiebel (SÖHNE 1951, 1952) dargestellt. Dieses Druckspannungsfeld bewirkt das Fließen des Bodens und die Verdichtung. Es sagt nichts über die Bodenverdichtung aus. Denn durch annähernd gleiche Spannungsfelder können je nach Bodenfeuchte, Bodenart und Lagerungszustand ganz verschiedene Verdichtungen verursacht werden.

Die Form der Druckzwiebel, d.h. das Tiefen-Breitenverhältnis, hängt stark von der Verdichtbarkeit des Bodens ab. Auf einem feuchten, lockeren Boden verursacht eine Belastung tiefe, schmale Druckzwiebeln bei großer Spurtiefe. Ein harter Boden stützt den Druck stärker zur Seite ab. Es bilden sich flache, breite Druckzwiebeln aus.

Die bodenverdichtende Wirkung eines Rades oder eines Stempels, die sog. Druck-Einsinkbeziehung, wird mit Stempelplatten, die in den Boden gedrückt werden, vereinfachend nachvollzogen (Abb. 3.3 a). Die hierzu notwendige Kraft wird in Abhängigkeit von der Einsinktiefe erfaßt. Wird die Kraft auf die Plattenfläche bezogen, errechnet sich der mittlere Druck P_V .

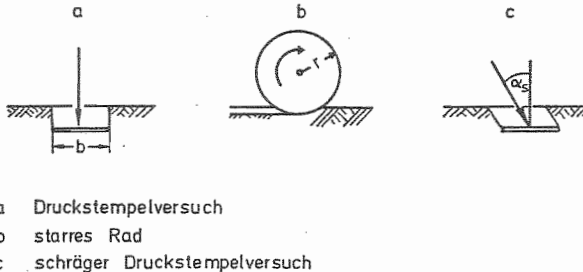


Abbildung 3.3 a-c: Bestimmung der Bodeneigenschaften (BOLLING 1987)

BEKKER (nach BOLLING 1987) entwickelte eine Gleichung zur Beschreibung dieser Beziehung. Mit den vom Boden abhängigen Konstanten k_C , k_D und n_z , der Plattenbreite b , der Einsinktiefe z und der Bezugstiefe z_B lassen sich die Meßergebnisse für die meisten Böden mit folgender Gleichung beschreiben:

$$P_V = \left[\frac{k_C}{b} + k_D \right] * \left[\frac{z}{z_B} \right]^{n_z} \quad (3)$$

Die schwierig zu erfassenden Konstanten sind zur Erklärung des folgenden Sachverhaltes ohne Bedeutung.

Angetriebene Räder und Reifen übertragen auf den Boden nicht nur Druck sondern auch Schub, der mit wachsendem Schlupf zunimmt. Daher wurden Versuche angestellt, bei denen Druck und Schub in der Kontaktfläche registriert werden können. KRICK (1971), wie auch ONAFKO und REECE (1967) benutzten hierzu starre Räder (Abb. 3.3 b).

In anderen Versuchsansätzen wurden ebenfalls wie von BEKKER (nach BOLLING 1987) Stempelplatten in den Boden gedrückt. Diese wurden jedoch schräg in den Boden gedrückt (siehe Abb. 3.1 c) und verursachten, abhängig vom

Eindringweg, vertikalen Druck und horizontalen Schub (STEINER (nach BOLLING 1987), VINCENT 1961). Der in Abbildung 3.3 c eingetragene Winkel α_S ist dabei ein Maß für den Schlupf eines Rades, das durch diesen Versuch simuliert wird.

Der vertikale Druck wurde von STEINER (nach BOLLING 1987) durch die Erweiterung der Gleichung von BEKKER (nach BOLLING 1987) für schlüpfende Räder beschrieben mit:

$$P_V = \left[\frac{k_C}{b} + k_P \right] * \left[\cos \alpha_S \right]^{n_\alpha} * \left[\frac{z}{z_B} \right]^{n_z} \quad (4)$$

Es ist zu erkennen, daß nach Gleichung 4 bei konstantem vertikalen Druck P_V mit zunehmendem Winkel α_S die Einsinktiefe z und damit auch das vom Stempel verdrängte Bodenvolumen größer werden muß.

Die Erfahrungen aus Druckstempelversuchen sind nicht allgemeingültig auf Räder übertragbar. Druckrollen von Pflanzmaschinen verhalten sich aber aufgrund der seitlichen Abwinkelung der Rollen zur Vertikalen (Anstellwinkel α) in ihrer Druckeinleitung in den Boden wie schräge Stempel. Sie übertragen horizontalen Schub senkrecht zur Fahrtrichtung in Richtung Furche.

Mit zunehmendem Anstellwinkel müßten demnach Druckrollen weiter in den Boden einsinken und mehr Boden in vertikaler wie auch in horizontaler Richtung verlagern und verdichten. Der Druck am Wurzelballen müßte daher mit größerem Anstellwinkel aufgrund des in seitlicher Richtung verschobenen Druckspannungsfeldes steigen.

Eine weitere für Druckstempelversuche wichtige Beziehung fand KRICK 1971. Die Druck-Einsinkbeziehung von senkrechten Stempeln bei gleicher Fläche änderte sich nicht, wenn sich die Form des Stempels änderte. Dagegen war aber mit zunehmender Plattenfläche eine gleiche Einsinktiefe mit immer geringerem Flächendruck zu erzielen. Damit ist es nur begrenzt möglich, Ergebnisse aus Versuchen mit unterschiedlichen Plattengrößen zu vergleichen.

3.2.2.2 Druck/Einsinkbeziehung senkrechter Rollen

Beim Befahren eines Bodens mit einem Rad bildet sich eine Spur aus. Die Tiefe der Spur und die Druckverteilung unter dem Rad im Boden hängt von der Gesamtbelastung des Rades und der Größe der Kontaktfläche zwischen Rolle und Boden, d.h. dem Flächendruck ab. Außerdem wird die Tiefe von der Druckverteilung an der Auflagefläche, dem Bodenfeuchtegehalt und den Bodenparametern beeinflusst (SÖHNE 1953).

Wie die Untersuchungen von SÖHNE (1952, 1953, 1956) und BOLLING und SÖHNE (1982) zeigen, ist der Kontaktflächendruck für die Belastung der Krume, die Radlast dagegen vor allem für die Belastung des Unterbodens bestimmend. Für Druckrollen von Pflanzmaschinen, die die Jungpflanzenwurzelballen im Oberboden andrücken, ist damit in der Hauptsache der Kontaktflächendruck und, wie beschrieben, die horizontal wirkende Schubspannung in Furchenrichtung von Bedeutung.

Kleine Kontaktflächen verursachen einen hohen Flächendruck und damit eine hohe Belastung im oberen Bodenbereich. Kann ein Boden bei einer gegebenen Rolle diese Belastung ohne Verformung nicht tragen, sinkt das Rad in den Boden ein, wobei die Kontaktfläche ansteigt, bis die benötigte Bodentragfähigkeit erreicht ist. Das heißt, das Rad sinkt so weit ein bzw. verdichtet den Boden so weit, bis ein Gleichgewicht zwischen Flächendruck und Bodentragfähigkeit erreicht ist (KOOLEN und KUIPERS 1983). Bei gleicher Einsinktiefe z haben kleine Rollen mit geringerem Durchmesser eine geringere Rollenkontaktfläche als große Rollen.

Die Druckverteilung unter senkrechten Rollen oder Stempeln sieht so aus, daß der höchste Druck dort auftritt, wo der Boden am wenigsten die Möglichkeit hat, durch Fließen auszuweichen, also im mittleren Kontaktflächenbereich (BOLLING 1987).

3.3 Druck/Einsinkbeziehung der Druckrollen von Pflanzmaschinen

Bei Druckrollen von Pflanzmaschinen führt eine Erhöhung des Gesamtgewichtes F bei konstantem Druckrollenabstand A zu einer Zunahme der Spurtiefe (Abb. 3.4). Mit steigender Spurtiefe wird also mehr Boden von weiter außerhalb der

Spur in Richtung Furchenmitte verlagert; und zwar um so mehr, je größer der Anstellwinkel α ist (Gleichung 4).

Durch den Abrollvorgang der Druckrollen werden vertikale Druck- und horizontale Schubspannungen induziert. Die Stärke der Verdichtung in der Furche am Ort des Wurzelballens wird durch die Schubspannungen beider Druckrollen verursacht, die im Betrag nach gleich sind aber aufeinander zu in Richtung

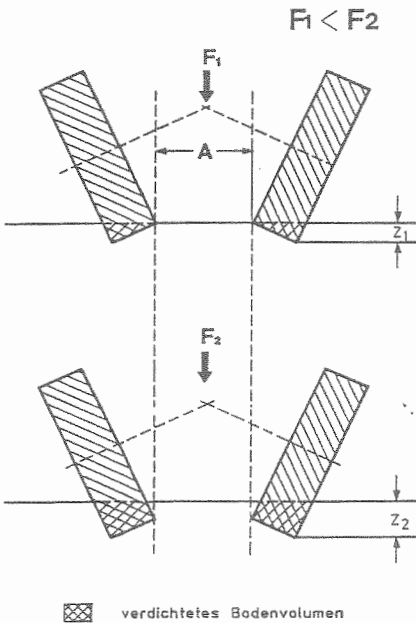


Abbildung 3.4: Einsinkverhalten der Druckrollen bei verändertem Gesamtgewicht

Furche wirken. Die dabei entstehende Bodenverdichtung an der Kontaktfläche zwischen Boden und Rad ist sichtbar an der zurückbleibenden Spur.

Da Druckrollen weitgehend ohne Schlupf abrollen, wird die Spurtiefe nur durch den Kontaktflächendruck in Abhängigkeit vom Boden verursacht. Der Kontaktflächendruck bei Pflanzmaschinen (siehe Gleichung 2) wie auch bei Reifen (BOLLING 1987) ist nur aufwendig zu bestimmen. Möglicherweise können aber über die Spurtiefe Rückschlüsse auf die Verdichtungswirkung in der Furche bei der jeweiligen Voreinstellung der Druckrollen getroffen werden.

Wegen des veränderlichen Anstellwinkels der Druckrollen von Pflanzmaschinen ist allein über die Spurtiefe z keine direkte Aussage über den Betrag der Einsinkung bzw. der Menge an verdrängtem Boden möglich, wenn sich die Rollenbreite, der Rollendurchmesser oder der Winkel ändern. Durch Berechnung der verdrängten Bodenfläche z_F kann ein Vergleichsmaßstab in Abhängigkeit von der Spurtiefe z , dem Anstellwinkel α und der Rollenbreite B erstellt werden (siehe Abb. 3.5, Rechengang im Anhang).

Wie von KOOLEN und KUIPERS (1983) beschrieben, sinkt ein starres Rad so weit in den Boden ein, bis ein Gleichgewicht zwischen Kontaktflächendruck und Bodentragfähigkeit vorliegt. In anderen Worten ausgedrückt, muß soviel Boden unter einer Rolle verdrängt bzw. verdichtet werden, bis die Tragfähigkeit erreicht ist.

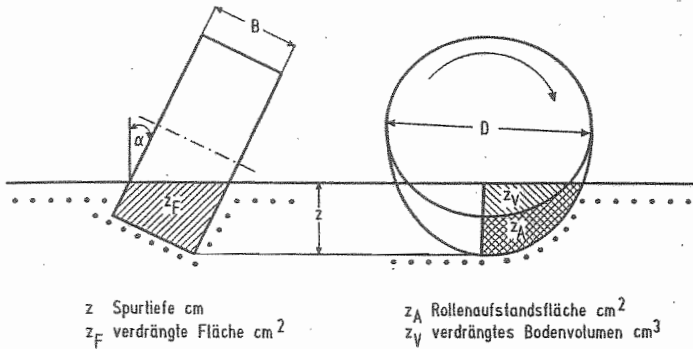


Abbildung 3.5: Einsinkparameter von Druckrollen

Zur Bestimmung des Kontaktflächendrucks muß die Rollenaufstandsfläche z_A bekannt sein (Abb. 3.5). Sie berechnet sich aus dem mittleren Rollenkontaktsumfang, der Rollenbreite und dem Anstellwinkel. Bei dieser Berechnung werden erhebliche Vereinfachungen getroffen; wie z.B., daß die Vertikalspannungen nur zwischen dem Beginn der Rollenkontaktfläche und der Vertikalen in der Tiefe z wirken. Weiterhin werden alle Einzellasten über die Kontaktfläche als gleich groß angenommen (BOLLING 1987), obwohl an der Rolleneinlaufstelle ein anderer Flächendruck herrschen muß, als an der Stelle der tiefsten Einsinkung. Durch die schräge Anstellung ist außerdem mit einer Abnahme des Flächendrucks in Richtung Furchenmitte zu rechnen (Rechengang siehe Anhang).

Nach BOLLING (1987) sind diese Vereinfachungen für senkrechte Rollen anwendbar, da sich die einzelnen Effekte insgesamt weitgehend ausgleichen sollen.

Da in Böden das HOOKE'sche Gesetz nicht gilt, also keine gleichmäßige Spurtiefenzunahme bei Druckerhöhung auftritt, erscheint die Berechnung der Rollenaufstandsfläche z_A als nicht ausreichend zur Beschreibung der Druck-Einsinkbeziehung. Aus diesem Grund kann als dritter Berechnungsparameter aus

der Spurtiefe das verdrängte Bodenvolumen z_V errechnet werden (Abb. 3.5).

Das verdrängte Bodenvolumen z_V reicht ebenfalls vom Beginn der Rollenkontaktfläche bis zur Vertikalen in der Tiefe z . Die angestellte Überlegung ist die, daß das Gleichgewicht zwischen Kontaktflächendruck und Bodentragfähigkeit erst vorliegt, wenn ein entsprechendes Bodenvolumen unter den Rollen verdichtet ist. Auf diesem stützten sich die Rollen ab.

Um zu berücksichtigen, daß sich das Druckrollengesamtgewicht bei Pflanzmaschinen auf zwei Rollen abstützt, werden die verdrängte Fläche z_F , die Rollenaufstandsfläche z_A und das verdrängte Bodenvolumen z_V für beide Rollen gemeinsam berechnet. Der Rechengang ist im Anhang aufgeführt.

In Abbildung 3.6 sind die verdrängte Fläche, die Rollenaufstandsfläche und das verdrängte Bodenvolumen in Abhängigkeit von der maximalen Spurtiefe aufgetragen. Der Anstellwinkel, der Rollendurchmesser und die Rollenbreite sind konstant.

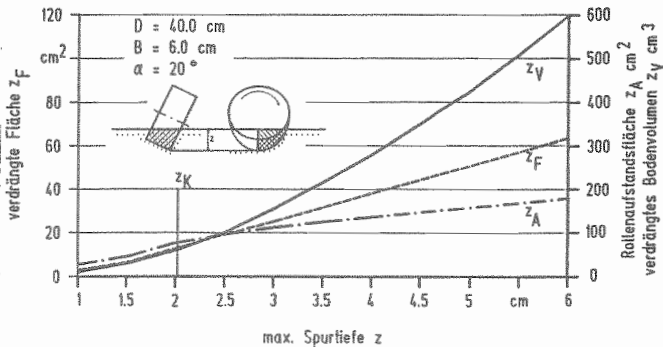


Abbildung 3.6: Verdrängte Fläche, Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen in Abhängigkeit von der Spurtiefe

Ab einer Spurtiefe von 2,1 cm, mit Auflage der gesamten Rollenbreite auf den Boden, verhält sich z_F wie erwartet direkt proportional zur Einsinktiefe. Die Rollenaufstandsfläche und das verdrängte Bodenvolumen sind in ihrem Verhalten gegenläufig. Mit zunehmender Einsinktiefe wird der Kurvenverlauf der Aufstandsfläche flacher und verläuft in Richtung eines Grenzwertes bei

Erreichen von $z = D/2$. Das verdrängte Bodenvolumen steigt dagegen progressiv mit Zunahme der Einsinktiefe bis $z = D/2$ an.

Es ist daraus zu schließen, daß bei großer Einsinktiefe weniger die Rollenauflastfläche für das Gleichgewicht zwischen Kontaktflächendruck und Bodentragfähigkeit verantwortlich ist, als vielmehr das verdrängte Bodenvolumen, d.h. die Menge an Boden, auf der sich die Rolle abstützt.

VINCENT (1961) versuchte eine Beziehung zwischen dem verdrängten Bodenvolumen und der Einsinktiefe auf Sand zu entwickeln. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sind nicht zu verwerten, weil sich Sand in seinem Verhalten auf Druck vollkommen anders verhält als lehmhaltiger Boden.

Für die Einbettung von Jungpflanzen durch Pflanzmaschinen in den Boden sind im Normalfall nur Spurtiefen bis maximal 5 cm sinnvoll, da bei größerer Spurtiefe die Funktion der Geräte in Frage gestellt ist.

Ein gewisser systematischer Fehler ist bei der Druck-Einsinkbeziehung bei Pflanzmaschinen zu berücksichtigen, da durch das Öffnen der Pflanzfurche und damit der Störung des Oberbodens Effekte auftreten, die nur durch vergleichende Messungen zu interpretieren sind.

3.4 Bodendruckmessung

Die wichtigsten Verfahren zur Bestimmung von Druckspannungen und Verdichtungen im Boden sind Dichtebestimmungen mit Hilfe des Stechzylinders, das Konus-Penetrometer-Verfahren und verschiedene Verfahren mit starren wie auch plastischen Drucksensoren.

Die direkte Messung mit Stechzylindern ist am genauesten, aber zeitaufwendig. Außerdem ist die Entnahme von Stechzylinderproben im lockeren Oberboden problematisch, da durch die Zylinderwände eine große Störung der Bodensäule auftritt. Um diese Störung zu minimieren, werden normalerweise möglichst große Zylinderdurchmesser gewählt. Bodendichteveränderungen in einem engen Bereich, wie sie z.B. bei der Verdichtung durch Druckrollen entstehen können, sind nur mit kleindimensionierten Stechzylindern möglich. In eigenen Untersuchungen zeigte es sich, daß jegliche Unterschiede im lockeren

Oberboden durch Störung der Proben bei der Entnahme verwischt werden.

Ein weiteres, gebräuchliches Verfahren ist die Konus-Penetrometer-Methode. Der Boden wird durch den Widerstand charakterisiert, den er einem Stahlkegel beim Eindringen entgegensetzt (BOLLING 1987, KNITTEL und STANZEL 1976, WAHODE 1985). Die Meßwerte sind zunächst, wie auch bei den folgenden Drucksonden, reine Maßzahlen. Eine Vergleichbarkeit liegt nur bei gleichen Bodenverhältnissen vor. Untersuchungen von WAHODE (1985) zur Bestimmung der Rückverfestigung des Bodens in der Saatfurche bei Einzelkornsägeräten zeigen die hohe Streuung und die schwierige Interpretationsmöglichkeit dieses Verfahrens. Der Eindringwiderstand in einen Boden hängt ab sowohl von der Größe und Art des Werkzeuges, der Eindringgeschwindigkeit, der Reibung zwischen Boden und Mantelfläche als auch von der Bodenart, der Bodentextur, der Bodendichte oder der Bodenfeuchte.

Ein weiteres Problem von Penetrometern für die Messung in geringer Tiefe ist, daß der Konus erst voll mit Boden bedeckt sein muß, um gleichmäßige Ergebnisse zu liefern. Außerdem kommt es zu extremen Schwankungen der Meßwerte, wenn der Konus in einem lockeren, aus groben Aggregaten bestehenden Oberboden eingesetzt wird.

Die Verfahren mit Konus-Penetrometer wie auch mit Stechzylindern sind erst nach der Beanspruchung einsetzbar. Eine kontinuierliche Aufzeichnung des Druckverlaufes während der Belastung ist nicht möglich.

Die dritte Gruppe zur Bestimmung des Bodendruckes sind die Drucksensoren. Es handelt sich um plastische oder starre Druckzellen, die bei Unterbodenmessungen möglichst ohne Störung des Gefüges in den Boden eingebracht werden und den Druckanstieg im Boden bei der Belastung aufzeichnen. Ausführliche Zusammenstellungen der wichtigsten Drucksonden sind bei BOLLING (1987) und FREITAG (1971) nachzulesen.

Das Verhalten der Sensoren bei Druckeinwirkung sollte möglichst ähnlich dem des umgebenden Bodens sein. Dieser reagiert vorwiegend in tiefen Bodenschichten mit plastischem Fließen und Verdichtung und weniger elastisch, wenn Kräfte auf ihn einwirken. Im Oberboden, dort wo die Druckerfassung bei Pflanzmaschinen erfolgen soll, sind zusätzlich zu Fließvorgängen noch

Scherungen zu erwarten.

Zur Druckerfassung sind nach BOLLING (1987) Aufnehmer mit plastischem Verformungsverhalten gegenüber starren Sensoren im Vorteil, da sie hinsichtlich ihrer Dichte, Steifigkeit und Verformbarkeit dem zu verdichtenden Boden ähnlicher sind. Diese Erwartungen werden am ehesten von mit Flüssigkeit gefüllten Sensoren erfüllt.

Flüssigkeitsgefüllte, membranumhüllte Sensoren (BLACKWELL und SOANE 1978, BOLLING 1987, SÖHNE 1951, VERMA et al. 1976) folgen der Bewegung des Bodens rein plastisch, wenn dieser verdichtet wird. Um dem umgebenden Boden möglichst ähnlich zu sein, lassen sich, je nach Wahl der Füllung (Öl oder Wasser) und des Hüllmaterials bzw. der Wandstärke, die mittlere Dichte der Aufnehmer einstellen. Sie soll in der Größenordnung der von Ackerböden (1 bis 2 g/cm³) entsprechen (BOLLING 1987).

Nach den Gesetzen der Hydrostatik kann in einer flüssigkeitsgefüllten Sonde nur ein Druck herrschen und dieser wird erfaßt. Eine Zuordnung der Druckrichtung ist nicht möglich. Die Eigensteifigkeit des Ballons oder Schlauches ist viel zu gering, als daß sie einen großen Einfluß auf den Druck ausüben könnte. Für den Druck in der Sonde P_{hyd} kann die vereinfachte Annahme getroffen werden, daß er der Mittelwert (hydrostatischer Druck) aller am Bodenelement angreifenden Normalspannungen σ_x , σ_y , σ_z ist. Schubspannungen können in ruhenden Flüssigkeiten nicht übertragen werden. Es gilt folgende Gleichung:

$$P_{hyd} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} * k_S \quad (5)$$

k_S ist der Faktor für die "Weichheit" des Sensors.

Einen weiteren, wesentlichen Einfluß auf die Meßgenauigkeit eines Drucksensors hat die Größe der Meßfläche. Um starke Streuungen zu vermeiden, hat die Meßfläche deutlich größer als die einzelnen Bodenpartikel zu sein. Werden zu kleine Meßflächen von einem Stein beaufschlagt, so ergeben sich bei Drucknehmern trotz sonst gleicher Bedingungen unterschiedliche Meßergebnisse. Nach BOLLING (1987) haben sich Meßflächen zwischen 3 und 10 cm² bewährt. Die Größe der Meßfläche ist nach oben durch die Auflösung begrenzt.

Mit Drucksonden ist, wie mit dem Konus-Penetrometer, nur ein Relativwert zu erfassen, der ebenfalls von den Bodenparametern, der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt etc. abhängig ist. Eine direkte Aussage ist nur durch vergleichende Messungen möglich.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von BOLLING (1987) belegen die Einsatzfähigkeit von hydraulischen Drucksonden. Der Einfluß des Fahrzeuggewichtes bzw. der Radlast auf die Bodenbeanspruchung ist ebenfalls zu erfassen wie der Einfluß der Ausgangsdichte des Bodens.

Der Druck in der Sonde verhält sich bei unterschiedlicher Ausgangsdichte des Bodens analog zum Druck auf eine Stempelfläche zur Erzielung derselben Spurtiefe. Ebenfalls hängt der Meßwert an der Sonde vom Abstand zwischen der Kontaktfläche des Druckverursachers und der Sondenmitte ab, was bedeutet, daß eine exakte Tiefenablage der Sensoren Voraussetzung für eine exakte Messung ist.

Wegen der starken Bodenstörung sah BOLLING (1987) keine Möglichkeit für Messungen im Oberboden.

Dieses Problem besteht für Messungen in der Pflanzfurche nicht, da die Störung des Oberbodens durch das Pflanzschar vorgegeben ist.

BOLLING (1987) ordnet die drei beschriebenen Verfahren zur Bodendruckbestimmung wie folgt ein:

- der Konus-Penetrometer zur Aufnahme der Vorgeschichte eines Bodens
- die Bodendrucksonde zur Messung der unmittelbaren Beanspruchung des Bodens während der Überfahrt
- der Stechzylinder zur direkten Messung von Wassergehalt, Dichte und Porenanteil des Bodens.

4. Bestimmung der Druckausbreitung unter Druckstempeln und Druckrollen

Um den komplizierten, seitlich wirkenden Bewegungsablauf der Druckrollen von Pflanzmaschinen zu simulieren, wurden Meßreihen mit Druckstempeln an der Werkstoffprüfmaschine (Instron) und Versuche mit Drucksonden in der Bodenrinne durchgeführt.

4.1 Material und Methoden der Druckstempelversuche

Es wurden zwei Versuchsansätze gewählt, wobei mit dem ersten nur die vertikale Druckfortsetzung im Boden beschrieben werden kann.

Für die Darstellung der vertikalen Druckfortsetzung wurde Boden aus der Bodenrinne (sandiger Lehm, Tab. 4.1) schichtenweise in Holzkisten mit frontseitiger Glasscheibe eingefüllt, gleichmäßig verdichtet und horizontal im Zentimeterabstand entlang der Glasscheibe eine dünne Schicht Bentonit eingestreut. Da mit der Werkstoffprüfmaschine nur eine senkrechte Druckrichtung,

Tabelle 4.1: Fraktionen des Versuchsbodens

Fraktion	Ton	Schluff	Sand	Kies
Anteil (Gew.-%)	18.4	44.9	33.8	2.9

und nicht wie bei Druckrollen von Pflanzmaschinen, schräge Druckrichtungen möglich sind, wurde der Boden im gewünschten Winkel unter dem Stempel schräggestellt (Anstellwinkel α_S). Die Stempelbreite beträgt 6.3 cm ("V") bzw. 8 cm für profilierte Stempel ("C", "L"), die Stempeltiefe 12 cm (Abb. 4.5). Die relative Kontaktfläche des Stempels verringert sich bei Abwinkelung der Stempelfläche zur Druckrichtung (+, - β_S). Die Veränderung des Anstellwinkels α_S hat keinen Einfluß auf die bodenverdichtende Stempelaufstandsfläche. Über einen Weg/Kraftschreiber wurde die jeweilige Druckkraft bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug in allen Versuchen 2 cm pro Minute.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.1 festgehalten.

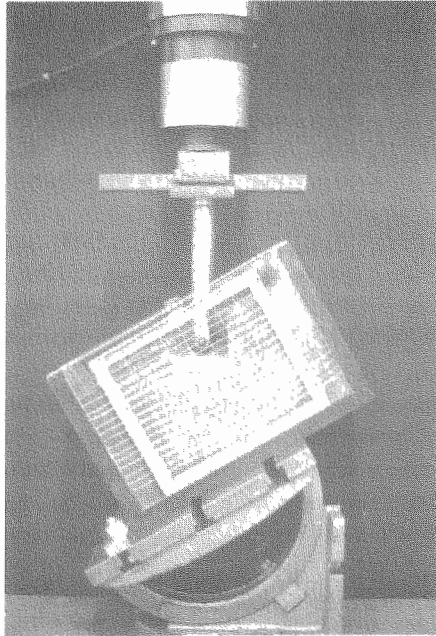


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau der Druckstempelanlage

Im Abstand von 10 daN Druckkraft wurde die Bodenverlagerung fotografiert, wobei die Kamera ebenfalls im Winkel verdreht war. Der gleichbleibende Abstand zwischen den Druckrollen A wurde mit Hilfe eines Bezugsrasters simuliert. Abbildung 4.2 zeigt die Bodenverlagerung unter einem seitlich wirkenden Druckstempel mit einem Anstellwinkel α von 20° und senkrechter Stempelfläche ($\beta_S = 0^\circ$). Die Druckkraft beträgt 40 daN, was einem Flächen-
druck von 0.53 bar entspricht.

Die Auswertung dieser Versuche erfolgt durch Verbindung aller Punkte mit gleicher Abweichung von den Ausgangslinien des horizontalen Rasters (siehe Abb. 4.3).

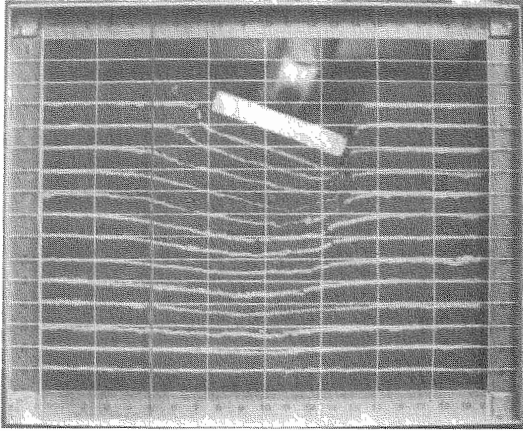


Abbildung 4.2: Vertikale Bodenverlagerung unter einem Druckstempel mit 20° Anstellwinkel

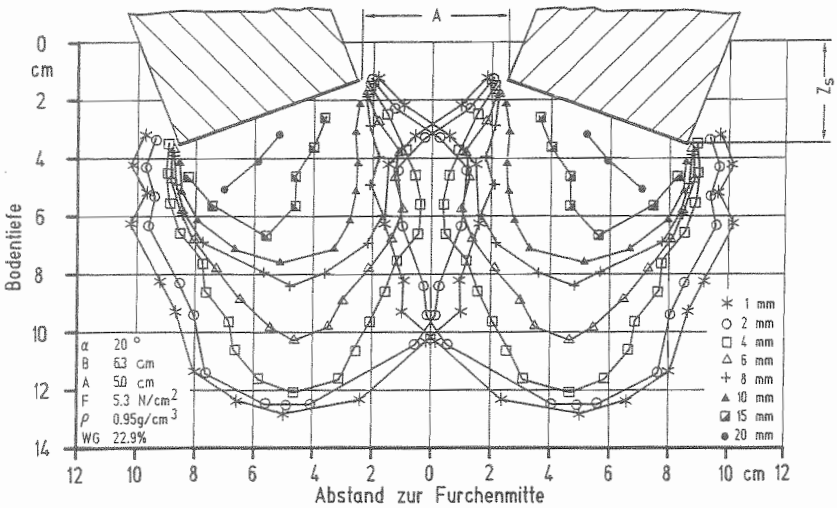


Abbildung 4.3: Bodenverlagerung unter Druckstempeln mit 20° Anstellwinkel. Dargestellt sind die Linien gleicher vertikaler Bodenverlagerung

Im zweiten Versuchsansatz zur besseren Verdeutlichung von Betrag und Richtung der Druckfortsetzung wurde derselbe Versuchsaufbau gewählt (Abb. 4.1), aber die horizontalen Linien durch ein Kreuzraster ersetzt. Nach dem schichtenweisen Befüllen wurde die Glasplatte entfernt und das Raster unter Zuhilfenahme einer Schablone auf den Boden gesprüht.

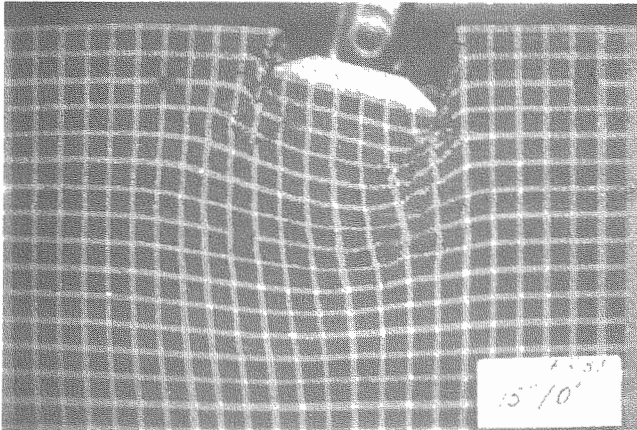


Abbildung 4.4: Vertikale und horizontale Bodenverlagerung unter Druckstempel mit 15° Anstellwinkel

Abbildung 4.4 zeigt den Zustand bei einem Stempelanstellwinkel von 15° ($15^\circ / 0^\circ$) und einer Belastung von 50 daN, was einem Flächendruck von 0.66 bar entspricht.

Aus der Einsinktiefe z wurde das durch den Stempel verdrängte Bodenvolumen z_{Vg} und das relative verdrängte Bodenvolumen z_{VgR} , bezogen auf gleichen Flächendruck, errechnet.

Die Auswertung der fotografischen Aufnahmen erfolgte durch Verbinden der Endkreuzpunkte des Rasters nach der Belastung mit den Ausgangskreuzpunkten. Die Verbindungslinien oder Vektoren sind Kraftwirkungslinien. Sie stellen ein Maß für die Druckrichtung und Intensität der Bodenverdichtung dar.

Die untersuchten Druckrolleneinstellungen sind:

- Abwinkelung der Stempelaufstandsfläche β_S im Bereich von 0° bis 30° ($0^\circ / \beta_S$) bei senkrechter Druckrichtung
- die Veränderung des Anstellwinkels im Bereich von 0° bis 30° ($\alpha_S / 0^\circ$)
- Abwinkelung der Stempelaufstandsfläche β_S bei 15° Anstellwinkel
 $\beta_S = \text{positiv}$ (der Gesamtwinkel wird größer ($15^\circ / + \beta_S$))
 $\beta_S = \text{negativ}$ (der Gesamtwinkel wird kleiner ($15^\circ / - \beta_S$))
- Einsatz verschiedener Laufflächenprofile ("L", "C", siehe Abb. 4.5) bei 15° Anstellwinkel ($15^\circ L, C / 0^\circ$).

Lagerungsdichte und Bodenwassergehalt sind bei jeder Einstellung angegeben.

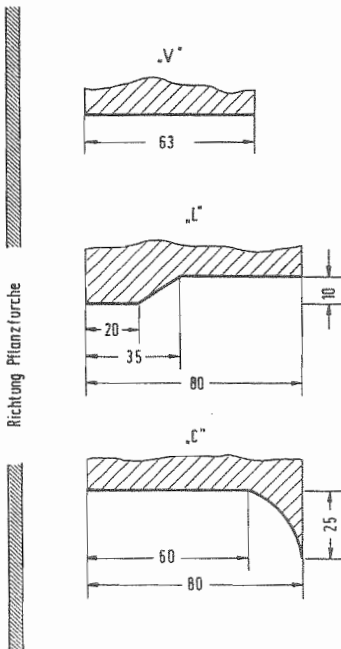


Abbildung 4.5: Laufflächenprofile der Druckrollen der Versuchspflanzmaschine "V" und den Pflanzmaschinen "L" und "C"

4.2 Ergebnisse der Druckstempelversuche

Auf Abbildung 4.3 sind die Druckzwiebeln, d.h. Verbindungslinien zwischen Punkten gleicher vertikaler Bodenverlagerung unter den Druckrollen, dargestellt. Bei einem Anstellwinkel von 20° und einem Druckrollenabstand A von 5 cm überlagern sich die Druckzwiebeln in einer Tiefe von 3 bis 10 cm. Das Maximum der vertikalen Bodenverlagerung liegt im Bereich von 4 cm bis 8 cm Bodentiefe.

Diese Darstellung zeigt, daß dieses Abbildungsverfahren nicht geeignet ist, Aussagen über die für das Einbettungsverhalten von Pflanzmaschinen verantwortliche horizontale Bodenverdichtung zu treffen.

Mit Hilfe des Kreuzrasters ist es möglich, die Resultierende aus der Bodenverlagerung in vertikaler wie auch in horizontaler Richtung sichtbar zu machen.

In den Abbildungen 4.6 bis 4.8 sind diese Resultierenden oder besser Kraftwirkungslinien unter Stempeln bei veränderten Druckrichtungen und Stempel-einstellungen dargestellt. Die Ausgangskreuzpunkte sind durch Punkte markiert. Die Striche bezeichnen Richtung und Betrag der Bodenverlagerung und damit die Intensität der Bodenverdichtung. Für den Pflanzvorgang ist hauptsächlich der Bodenraum zwischen den Druckrollen im Bereich von $A/2$ von Bedeutung. Es sind jeweils nur die Wirkungslinien eines Stempels eingetragen, die zweite, unterbrochen gezeichnete Druckrolle verhilft zu einer besseren Vorstellung der Ausdehnung des verdichteten Bodenraumes.

Abbildungen 4.6 a bis c belegen den Einfluß der Abwinkelung der Stempelaufstandsfläche bei senkrechter Druckrichtung. Die horizontale Stempelaufstandsfläche verursacht fast ausschließlich eine Bodenverlagerung in vertikaler Richtung. Im Bereich der Jungpflanze bei $A/2$ ist nur eine geringe Verschiebung zu beobachten. Mit zunehmend positiv abgewinkelter Druckfläche erhöht sich der Druck im Bereich der Jungpflanze. Von 15° auf 30° Abwinkelung ist eine Druckzunahme nur noch in einer Bodentiefe von 0 bis 3 cm zu erkennen, die wahrscheinlich durch Scherkräfte beim Einstechvorgang hervorgerufen wird.

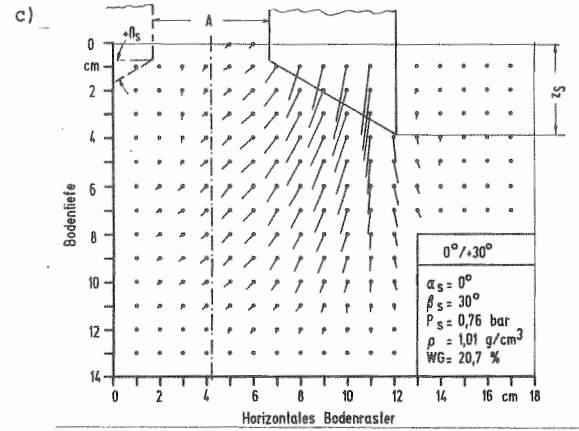
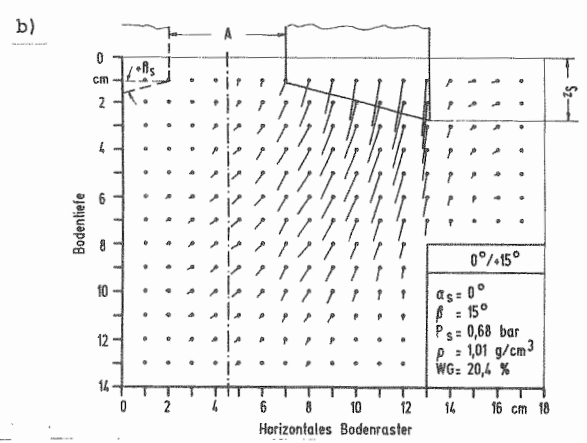
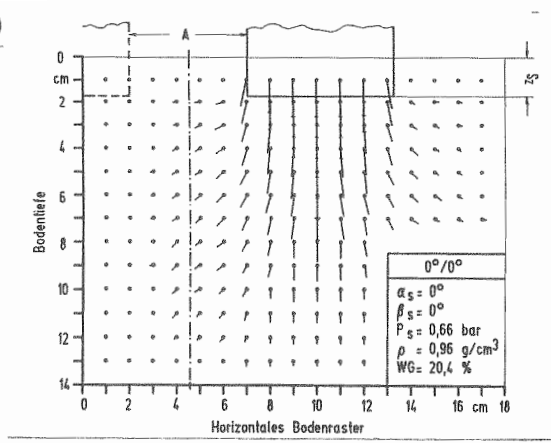


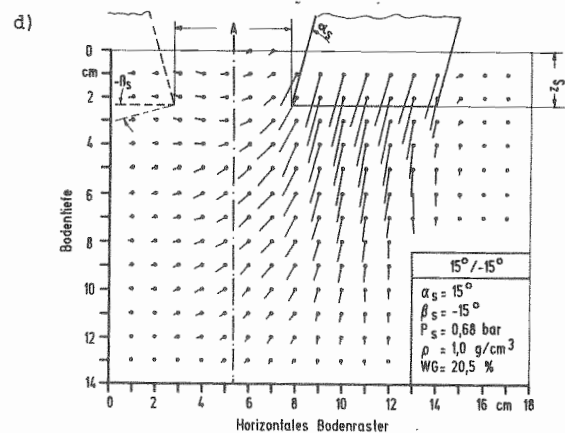
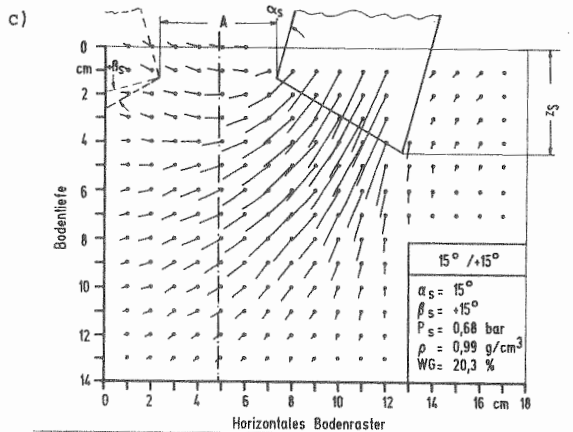
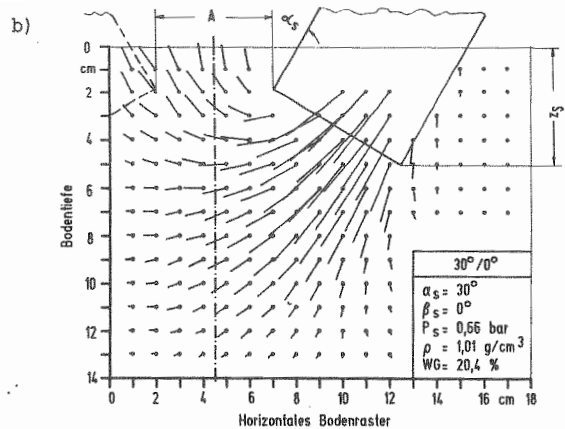
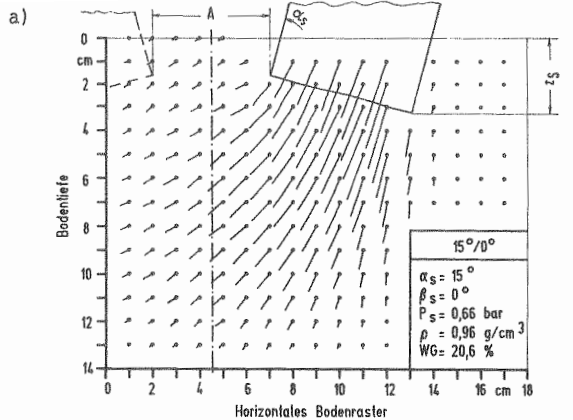
Abbildung 4.6: Kraftwirkungslinien im Boden bei senkrechter Stempel-Druckrichtung mit senkrechter (a) bzw. abgewinkelten Stempelaufstandsflächen (b, c)

Mit Änderung der Druckrichtung, entsprechend dem Bewegungsablauf von Druckrollen auf $\alpha = 15^\circ$ bzw. 30° , verschieben sich die Wirkungslinien in Richtung Furchenmitte (Abb. 4.7 a und b). Die horizontale Bodenverlagerung im Furchenbereich nimmt zu. Bei einem Anstellwinkel von 30° kam es in diesem Versuchsansatz durch die horizontal wirkenden Scherkräfte zu Bodenbruch, was die aufstrebende Richtung der Wirkungslinien hervorruft.

Eine Überlagerung der bisher beschriebenen Faktoren, Abwinkelung der Stempelaufstandsfläche bei schräger Druckrichtung, demonstrieren die Abbildungen 4.7 c und d. Eine zusätzliche Abwinkelung der Stempelaufstandsfläche um 15° in Richtung Furchenmitte (Abb. 4.7 c), ergibt einen Gesamtwinkel der Lauffläche von 30° zur Horizontalen. Die erzielte Bodenverlagerung im Bereich der Furche liegt über der Einstellung $15^\circ / 0^\circ$ (Abb. 4.7 a), ist aber weniger hoch als $30^\circ / 0^\circ$. Besonders im Bereich von 0 bis 3 cm Bodentiefe ist eine deutliche Erhöhung der horizontalen Verlagerung im Vergleich zur Einstellung $15^\circ / 0^\circ$ zu erkennen.

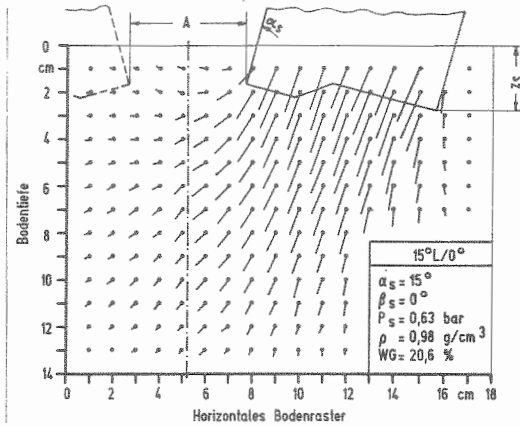
Der entgegengesetzte Fall ist in Abbildung 4.7 d zu erkennen. Bei einem Anstellwinkel von 15° ist die Stempelaufstandsfläche um 15° entgegen der Druckrichtung abgewinkelt. Die Lauffläche steht parallel zur Bodenoberfläche. Durch diese Einstellung ist eine geringfügige Reduzierung der seitlichen Bodenverschiebung möglich.

Abbildung 4.7: (nächste Seite) Kraftwirkungslinien im Boden bei schräger Stempel-Druckrichtung mit senkrechten (a, b) bzw. zur Druckrichtung abgewinkelten Stempelaufstandsflächen (c, d)



Den Einfluß der Profilierung der Stempeldruckfläche auf den Druck am Pflanzort zeigen die Abbildungen 4.8 a und b.

a)



b)

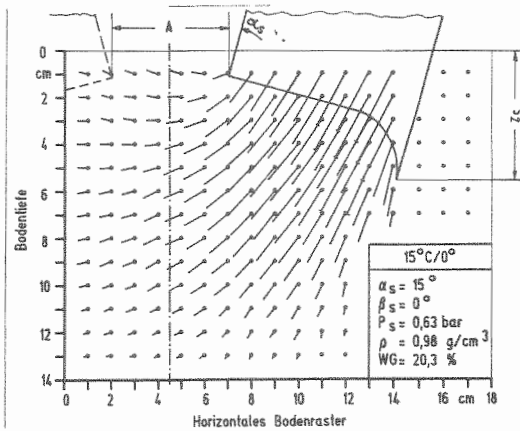


Abbildung. 4.8 a, b: Kraftwirkungslinien im Boden bei schräger Stempel-Druckrichtung mit profilierten Aufstandsflächen (a = "L", b = "C")

Die Druckrichtung beider Stempel entspricht der Stempelerstellung 15 °/ 0 °. Aufgrund der größeren Breite dieser Druckstempel ist ein direkter Vergleich mit den Abbildungen 4.6 und 4.7 nicht möglich. Der Druckstempel "L" (Abb. 4.8 a) verursacht eine deutlich geringere Bodenverlagerung als "C" (Abb. 4.8 b). Bezogen auf die Stempelflächenabwinkelung verhält sich "L" wie ein Stempel mit $\beta = - 10 \text{ °}$. Im Bereich zwischen 0 und 2 cm Tiefe sind bei beiden Stempeln aufwärts gerichtete Wirkungslinien zu verzeichnen. Bei "C" wird diese aufwärtsgerichtete Bodenbewegung durch die Abrundung ausgelöst, die beim Eintauchvorgang eine horizontale Scherung der obersten Bodenschicht auslöst.

Neben der Bodenverlagerung wurde jeweils aus den Darstellungen 4.6 bis 4.8 bei gleicher Gesamtbelastung F_S (außer für "L" und "C") das verdrängte Bodenvolumen z_{VS} und das verdrängte relative Bodenvolumen z_{VSR} , bezogen auf einen gleichen Flächendruck P_S von 0.66 bar, aus der Einsinktiefen z_S errechnet. Die Werte sind in Tabelle 4.2 zusammengefaßt.

Tabelle 4.2: Spurtiefe z_S , verdrängtes Bodenvolumen z_{VS} und das auf gleichen Flächendruck bezogene verdrängte relative Bodenvolumen z_{VSR} bei gleicher Gesamtstempelbelastung F_S in Abhängigkeit von den Stempelerstellungen α und β (P_S Flächendruck senkrecht zur Druckrichtung)

Winkel		Bedingungen				Ergebnis		
α (°)	β (°)	WG (%Gew)	ρ (g/cm ³)	F_S (dN)	P_S (bar)	z_S (cm)	z_{VS} (cm ³)	z_{VSR} (cm ³)
0	0	20.4	1.01	50	0.66	1.7	128.5	128.5
0	+15	20.4	1.01	50	0.68	2.7	135.2	131.2
0	+30	20.7	1.01	50	0.76	3.9	150.7	130.9
+15	0	20.6	0.96	50	0.66	3.3	189.0	189.0
+30	0	20.4	1.01	50	0.66	5.0	298.7	298.7
+15	+15	20.3	0.99	50	0.68	4.5	222.6	216.1
+15	-15	20.6	1.00	50	0.68	2.3	173.9	168.4
+15L	0	20.6	0.98	60	0.63	2.7	201.0	210.5
+15C	0	20.3	0.98	60	0.63	5.5	230.4	241.4

Bei senkrechter Druckrichtung (0 °/0 °, 0 °/+ 15 °, 0 °/+ 30 °) sind trotz stark unterschiedlicher Spurtiefe die verdrängten relativen Bodenvolumina z_{VSR} , bezogen auf gleichen Flächendruck, entsprechend. Durch die Veränderung

der Druckrichtung auf $\alpha_g = 15^\circ$ bzw. 30° tritt eine deutliche Zunahme des verdrängten Bodenvolumens auf. z_{VS} und z_{VSR} sind gleich. Für die Abstützung eines Stempels im Boden ist demnach maßgeblich die vertikal verdichtete Bodenmenge ausschlaggebend.

Eine weitere Vergrößerung des verdrängten relativen Bodenvolumens wird durch die zusätzliche Abwinkelung der Druckplatte in Richtung Furchenmitte erreicht ($+ 15^\circ/+ 15^\circ$).

Die negative Abwinkelung ($+ 15^\circ/- 15^\circ$) verringert dagegen das verdrängte relative Bodenvolumen. Trotzdem liegt es noch weitaus höher als für senkrechte Druckstempel.

"C" verursacht eine größere Bodenverlagerung als "L". Dieser Zusammenhang ist, wie schon für die Kraftwirkungslinien beschrieben, auf die in der Tendenz negativ abgewinkelte Druckplatte von "L" zurückzuführen. Die direkte Vergleichbarkeit der verdrängten Volumina von "L" und "C" mit den anderen Druckstempelversuchen ist nicht möglich, da bei gleichem Flächendruck größere Stempel tiefer in den Boden sinken als kleine (KRICK 1971).

4.3 Erfassung des Bodendruckes am Pflanzort beim Einsatz von Druckrollen

Beim Abrollvorgang entstehen in der Furche Fließvorgänge, Scherungen, Schub- und Druckspannungen, die sich gegenseitig überlagern. Diesen dynamischen Druckverlauf, von der Pflanzeneingabe bis zum Enddruck, nachdem der Einbettungsvorgang abgeschlossen ist, gilt es zu bestimmen.

4.3.1 Material und Methode der Drucksondenversuche

Zur Untersuchung dieses Druckverlaufes beim Einbettungsvorgang der Jungpflanze in die Furche wurde eine Bodendrucksonde entwickelt, welche geeignet ist, kontinuierliche Messungen von den Druckverhältnissen im Boden vorzunehmen.

4.3.1.1 Meßverfahren zur Bodendruckbestimmung in der Pflanzfurche

Die Drucksonde sollte verschiedenen Anforderungen gerecht werden, so daß Kompromisse eingegangen werden mußten.

- Der Drucknehmer sollte in Form und Maßen den Wurzelballen kleinvolumiger Jungpflanzenanzuchtverfahren entsprechen (siehe Abb.4.9)
- Die Messungen sollten mit wenig Arbeits- und Zeitaufwand durchführbar sein
- Die Drucksonde sollte unempfindlich gegen Scherungen und Verwindungen sein
- Die Meßwerterfassung sollte kontinuierlich während der gesamten Einbettung möglich sein
- Schräge Einbettung sollte einen möglichst geringen Meßfehler hervorrufen
- Mehrere Drucknehmer sollten hintereinander in einem Versuchsdurchlauf einzusetzen sein.

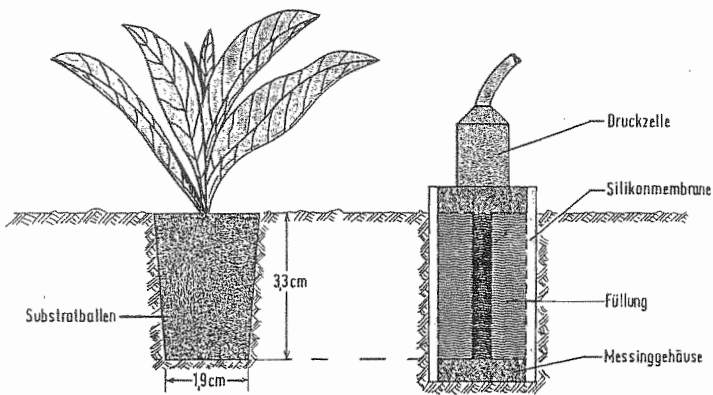


Abbildung 4.9: Vergleich von Drucksonde und Jungpflanze

Wegen der zylindrischen bis schwach konischen Form dieser Wurzelballen, die beim Pflanzvorgang an ihrer gesamten Hüllfläche Druck- und Schubspannungen ausgesetzt sind, wurde ein hydraulisches Meßverfahren eingesetzt. Als Membran wurde ein Silikon Schlauch mit 2.2 cm Außendurchmesser, 3.0 cm Länge und einer Wandstärke von 0.1 cm gewählt. Zur Stabilisierung und Fixierung der Silikonmembran und zur Aufnahme der Druckmeßdose (Meßbereich 0 bis 350 mbar) diente ein gedrehter Messingkörper (siehe Abb. 4.10). Der von Membran und Messingkörper umschlossene Raum ist wassergefüllt und kann über die Befüll- und Entlüftungsschraube luftfrei befüllt werden. Die Sonde entspricht in ihrem mechanischen Verhalten nicht dem Substratballen, da sie nur plastisch aber nicht elastisch verformbar ist. Wegen der räumlichen Ausdehnung der Sonde und der Lasteinleitung über die ganze Kontaktfläche mit dem Boden wird die Summe der Spannungen in x- und y-Richtung aufgezeichnet. Da in dem wassergefüllten Raum nach den Gesetzen der Hydrostatik, wie schon beschrieben, nur ein Druck herrschen kann, wird dieser Mitteldruck gemessen. Die Steifigkeit der Siliconmembran wird vernachlässigt.

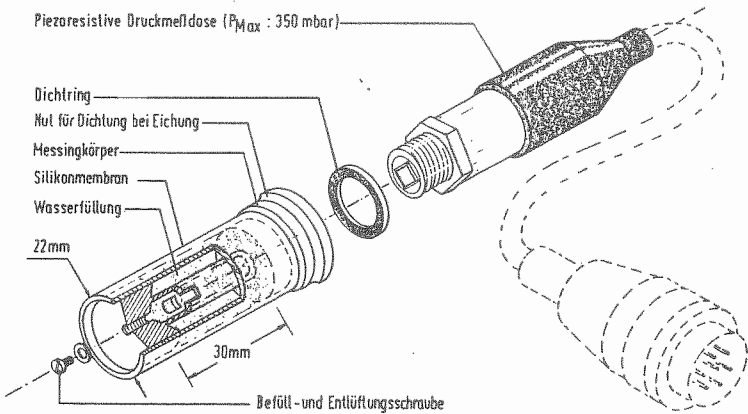


Abbildung 4.10: Aufbau der Drucksonde

Die Meßsignale werden von der Druckmeßdose über Spannungsgeber und Datalogger an das Datenerfassungsgerät weitergeleitet, gespeichert und im Drucker ausgeplottet (Abb. 4.11). Die maximale Meßfrequenz beträgt 8 Daten pro Sekunde. Die Aufnahme einer Eichkurve zur Zuordnung von Meßsignal und Druck erfolgt in einer Druckkammer mit Quecksilbermanometer im Meßbereich von 10 bis 350 mbar.

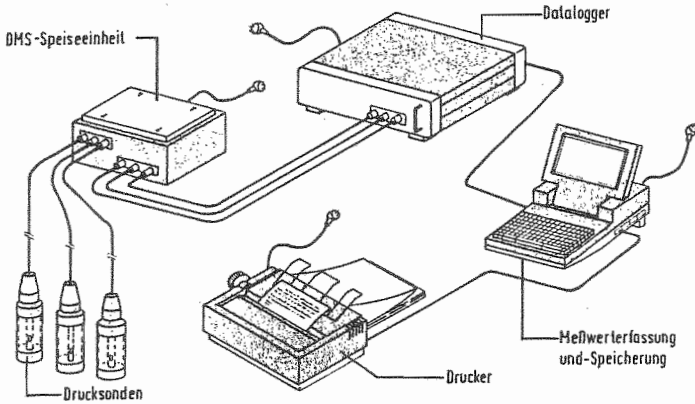


Abbildung 4.11: Aufbau der Meßanordnung zur Erfassung des Sondendruckes

Wie Abbildung 4.12 zeigt, führt, bezogen auf Drucklosigkeit bei 20 ° C, eine Temperaturverschiebung zu einer Veränderung des gemessenen Sondendruckes. Eine Temperaturerhöhung verringert den Sondendruck, Temperaturerniedrigung erhöht den Sondendruck. Pro Grad Temperaturänderung ist in diesem Temperaturbereich in etwa eine Druckänderung von 1 mbar zu verzeichnen.

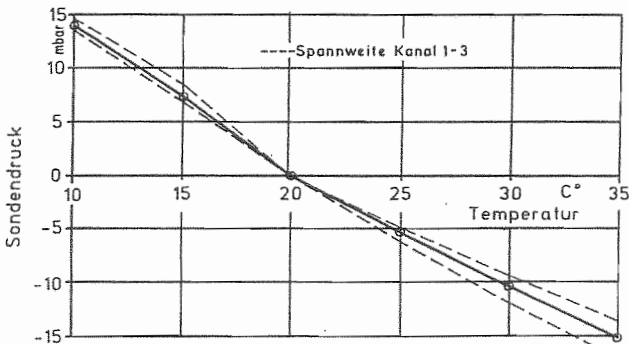


Abbildung 4.12: Druckverlauf in der Sonde bei Temperaturänderung

Der Grund für diese unerwartete Druckveränderung ist darin zu suchen, daß sich die Siliconmembran aufgrund des unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturerhöhung stärker ausdehnt als das Volumen der

Wasserfüllung. Die Membran kann sich jedoch nicht frei ausdehnen (wassergefüllter, geschlossener Raum) und bewirkt damit einen Unterdruck bei Temperaturerhöhung bzw. Überdruck bei Temperaturerniedrigung.

Dieses Verhalten verlangt einen Druckausgleich der Drucksonde (Öffnen und Schließen der Entlüftungsschraube unter Wasser) vor jeder Versuchsreihe bei Temperaturkonstanz.

Wie Abbildung 4.13 verdeutlicht, sind Meßfehler durch schräge Eingabe der Drucksonden in den Boden weitgehend zu vernachlässigen. Die maximale Schwankungsbreite in den Versuchen lag unter 10° Einbettungswinkel, was den Sondendruck gerade um 0.1 mbar verändert.

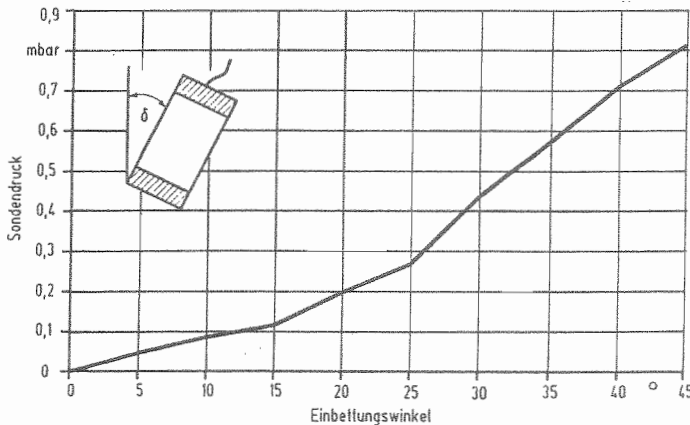


Abbildung 4.13: Druckverlauf in Abhängigkeit vom Einbettungswinkel

4.3.1.2 Versuchspflanzmaschine

Die Durchführung der Meßreihen erfolgte mit einem schleppergezogenen, extra für die Einbettungsmessungen entwickelten Pflanzaggregat. Furchenschar und Druckrollen sind unabhängig voneinander parallelogrammgeführt (Abb. 4.14). Als Schar wurde ein Einzelkornsäschar mit stumpfer, parabelförmiger Scharvorderkante gewählt, welches aufgrund seiner Bauweise den Anforderungen (siehe Kapitel 2.2.1) am ehesten gerecht wurde. Die Tiefenführung des Schar geschah über zwei rechts und links der Furche laufende Stützräder.

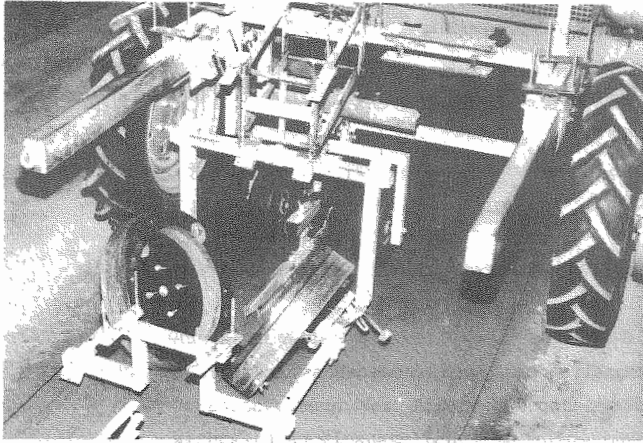


Abbildung 4.14: Versuchspflanzmaschine in der Bodenrinne

Die Druckrollen waren in bezug auf Gewicht F , Breite B , Durchmesser D , Winkel α und Rollenabstand A stufenweise veränderbar. Die Meßtiefe T , der Bodenwassergehalt WG und die Bodenausgangsdichte ρ waren regulierbar (siehe Abb. 4.15).

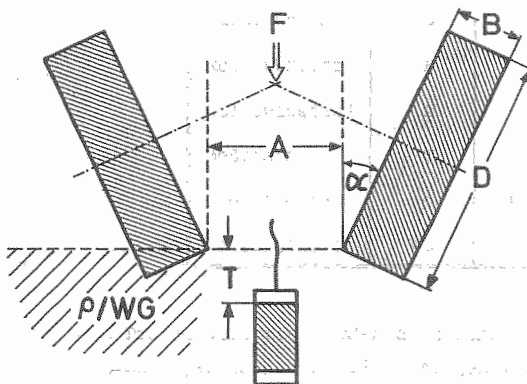


Abbildung 4.15: Einflußfaktoren der Druckrollen auf den Sondendruck (Druckrollengesamtwicht F , Rollenbreite B , Rollendurchmesser D , Anstellwinkel α , Abstand A , Meßtiefe T , (Bodenwassergehalt WG , Bodendichte ρ))

Das Druckrollengesamtgewicht wurde für alle Einstellungen vor Versuchsbeginn bestimmt. Das Gewicht liegt aus versuchstechnischen Gründen jeweils nur im Bereich der gewünschten Einstellung (z.B. 40.8 statt 40.0 daN). Werden unterschiedliche Druckrolleneinstellungen bei gleichem Gewicht verglichen, so sind die Meßwerte auf den Fixwert umgerechnet.

4.3.1.3 Ort der Messungen

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte in der Bodenhalle der DEULA, Freising, unter definierbaren Versuchsbedingungen. Beim Boden handelt es sich um einen sandigen Lehm, welcher aufgrund des häufigen Befahrens und Bearbeitens einen sehr schlechten Gefügestand besitzt (siehe Tab. 4.1). Der Bodenwassergehalt wurde an jedem Meßtag kontrolliert (HARTGE 1971). Mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 22,8 Gew.-% entsprach der Boden den Anforderungen an ein geeignetes Pflanzbett (siehe Kap. 9.2). Vor jedem Versuchsdurchgang, bestehend aus Hin- und Rückfahrt, wurde der Boden gefräst, eingeebnet und mit einer Walze verdichtet. Die einzelnen veränderbaren Parameter sind bei jeder Meßreihe angegeben.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Die Eingabe der Drucksensoren in die geöffnete Furche bei fahrender

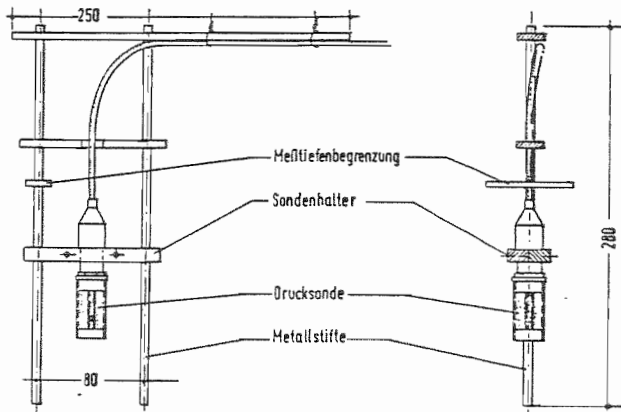


Abbildung 4.16: Führungsgestell zur Eingabe der Drucksensoren in die Furche

Pflanzmaschine erfolgte von Hand. Mit Hilfe eines Führungsgestelles wurde durch Einstecken von zwei Metalldornen in die Furchensohle die senkrechte Einbettung ermöglicht (Abb.4.16). Die Tiefenführung (Abstand Druckrolleninnenkante zu Oberkante der Meßmembran (siehe Abb.4.15)) wurde mit der Meßtiefenbegrenzung über die Scharoberkante gesteuert. Als Bezugslinie diente die Druckrolleninnenkante bzw. die Spurrinnenkante, um Meßfehler durch veränderten Abstand zwischen Rollenaufstandsfläche und Sonde zu vermeiden.

Die untersuchten Einflußparameter auf den Sondendruck am Pflanzort sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Aufgrund der Bauweise des Pflanzaggregates waren nur stufenweise Einstellungen möglich. Die jeweilige Einstellung ist in den Abbildungen angegeben. Das Druckrollengewicht war aufgrund der technischen Voraussetzungen des Pflanzaggregates nicht genau auf die gewünschten Gewichtsstufen einzustellen.

Tabelle 4.3: Einflußparameter der Druckrollen mit den jeweiligen Untersuchungsbereichen. Die Angaben in Klammern beziehen sich auf gesondert durchgeführte Versuche.

veränderbare Einflußgrößen	Symbol	Einheit	Untersuchungsbereich
Gewicht	F	daN	20, 40, 60, 80; (100)
Anstellwinkel	α	°	10, 20, 30; (0)
Durchmesser	D	cm	30.0, 40.0, 50.0;
Rollenbreite	B	cm	4.2, 6.3, 8.4;
Rollenabstand	A	cm	5.0; (4.0 - 13.6)
Meßtiefe	T	cm	2.0; (1.0 - 8.0)
Bodendichte	ρ	g/cm ³	0.9 - 1.03; (0.9 - 1.13)
Wassergehalt	WG	Gew.-%	22; (18.5 - 30.0)

Pro Meßvariante wurden durchschnittlich 8 Messungen mit drei Drucknehmern durchgeführt, d.h. 24 Messungen ermittelt. Die Zahl der verwertbaren Messungen reduzierte sich aufgrund von Störungen bei der Eingabe um ca. 20 %. Die Fahrgeschwindigkeit des Pflanzaggregates wurde bei allen Messungen konstant bei 0.5 km/h gehalten.

In Abbildung 4.17 ist repräsentativ für alle Versuche der Druckverlauf bei der Einbettung über die Zeit für drei Wiederholungen aufgezeichnet. Die veränderbaren Parameter sind erklärt. Der Druckverlauf beginnt bei 0 mbar, wenn der Drucksensor in die Furche gegeben wird; er erreicht sein Maximum P_{Max} , wenn die Achsen der Druckrollen auf Höhe des Drucksensors sind. Nach einem steilen Druckabfall wird der verbleibende Druck P_{End} gemessen, welcher für eine längere Zeit konstant bleibt. Für die weitere Verrechnung werden nur der maximal gemessene Sondendruck P_{Max} und der 1 Sekunde nach der Überfahrt gemessene bleibende Druck P_{End} gewertet.

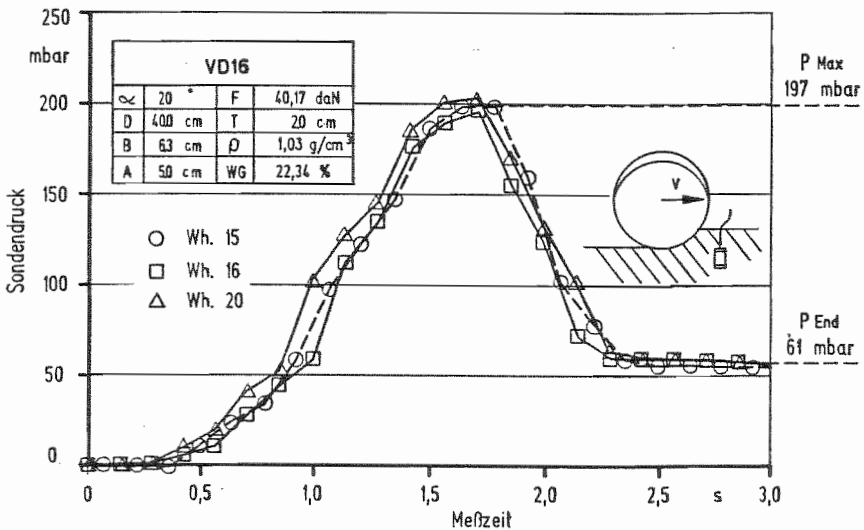


Abbildung 4.17: Druckverlauf an der Sonde bei der Einbettung

Anschließend an jede Meßreihe wurde die maximale Spurtiefe z der Druckrollen in Abhängigkeit von den eingestellten Versuchsparametern bestimmt. Die Meßwerte sind Mittelwerte aus jeweils 8 Messungen bei beiden Druckrollen. Aus der Spurtiefe errechnet sich die verdrängte Fläche z_p , die Rollenaufstandsfläche z_A und das verdrängte Bodenvolumen z_V der Druckrollen (siehe Abb. 3.5).

Die einzelnen Versuche sind mit Kennnummern von VD1 bis VD21 für Sondendruckmessungen bzw. dieselben Versuche von ZVD1 bis ZVD21 für Spurtiefenmessungen gekennzeichnet.

4.3.3 Statistische Auswertung

Die Meßergebnisse wurden anhand von Varianz- und Regressionsanalysen mit dem SPSSX-Programmpaket auf der Rechenanlage des Leibniz-Rechenzentrums der Bayrischen Akademie der Wissenschaften statistisch verrechnet.

Zu Anfang wurde mit dem Programm MIWERT (AUERNHAMMER, 1978) die für die Verrechnung ausreichende Zahl an Meßwerten bestimmt. Die Normalverteilung der Meßwerte der einzelnen Versuche, als Grundlage weiterer Verrechnungen wie Mittelwertvergleiche (Varianzanalysen) und Regressionsanalysen, wurden mit dem SPSSX-Programmpaket untersucht (SCHUBÖ und UEHLINGER, 1986).

Aufgrund der ungleichen Stichprobenzahl bei der Sondendruckbestimmung wurde bei der Varianzanalyse der Range-Test nach SCHEFFE angewandt, der auch bei ungleichen Stichprobenumfängen anwendbar ist. Für gleiche Stichprobenumfänge wurde der Range-Test nach TUKEY angewandt (SACHS 1984, WEBER 1972).

Angegeben sind jeweils die Grenzdifferenzen für 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit (α_j). In Tabellen werden die Mittelwerte mit Buchstaben versehen. Ein unterschiedlicher Buchstabe bedeutet, daß nach SCHEFFE oder TUKEY mit 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit ein Unterschied zwischen diesen Zahlenwerten besteht. In Abbildungen sind diese Signifikanzniveaus durch die Grenzdifferenz GD 5 % angegeben.

Die Regressionsgleichungen werden jeweils mit dem Stichprobenumfang n und dem Bestimmtheitsmaß B_R angegeben (BACKHAUS et al. 1987). Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der Einzeleinflüsse untereinander wurden ausschließlich lineare Regressionen gerechnet, auch wenn zum Teil höhere Bestimmtheitsmaße durch nichtlineare Regressionen möglich wären.

4.3.4 Ergebnisse aus Drucksondenversuchen

Die Meßergebnisse der Drucksondenversuche und Spurtiefenmessungen werden im einzelnen, soweit machbar, nach Einflußfaktoren gegliedert, besprochen, um eine möglichst große Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Die Reihenfolge der Einflußfaktoren ist so gewählt, daß zur Abschätzung der Fehler die beiden Bodenfaktoren p und WG zuerst, dann die Hauptfaktoren F , D , B , und α und anschließend die Nebenfaktoren T und A besprochen werden.

4.3.4.1 Bodendichte ρ

Der Versuchsboden in der Bodenrinne wurde vor jedem Versuchsdurchgang entsprechend vorbereitet. Die ersten Meßreihen wurden mit einer durchschnittlichen Bodendichte von 0.9 g/cm^3 (VD1 - VD5), die anschließenden Versuche mit Dichten von 0.96 bis 1.13 g/cm^3 (VD6 - VD20) durchgeführt.

In Tabelle 4.4 oben sind Meßwerte aus sechs vergleichbaren Versuchen aus VD1 bis VD20 in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodendichte im Bereich zwischen 0.9 und 1.03 g/cm^3 aufgetragen. Zusätzlich wurde in VD21 bei gleicher Voreinstellung die Bodendichte stufenweise von 1.02 auf 1.13 g/cm^3 erhöht (Tab. 4.4 unten). Die Voreinstellungen sind $F = 40.2 \text{ daN}$, $D = 40.0 \text{ cm}$, $B = 6.3 \text{ cm}$, $\alpha = 20^\circ$, $A = 5.0 \text{ cm}$, $T = 2.0 \text{ cm}$ und der durchschnittlicher Wassergehalt $WG = 22.8 \text{ Gew.-%}$. Angegeben sind P_{Max} , P_{End} und die Spurtiefe z .

Tabelle 4.4: Maximaler Sondendruck P_{Max} , Sondenenddruck P_{End} und Spurtiefe z in Abhängigkeit von der Bodendichte bei gleicher Druckrollen-voreinstellung

P, z (mbar) (cm)	Bodendichte (g/cm^3)					
	0.90	0.90	0.96	1.01	1.03	1.03
P_{Max}	194.3 bc	191.3 bc	205.8 c	195.8 bc	197.5 bc	187.4 bc
P_{End}	62.4 a*	56.5 a	66.5 a	61.6 a	61.6 a	55.8 a
z	3.20 g	-	2.88 ef	-	2.69 f	2.76 e
	Bodendichte (g/cm^3)					
	1.02	1.06	1.09	1.10	1.13	-
P_{Max}	178.1 bc	169.1 ab	167.1 ab	166.8 ab	138.5 a	-
P_{End}	56.9 a	68.8 a	60.0 a	68.7 a	62.5 a	-
z	2.96 e	2.04 c	2.24 d	1.84 b	0.99 a	-

* P; SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$) z; TUKEY ($\alpha_i = 0,05$)
Zahlenwerte mit unterschiedlichen Buchstaben sind innerhalb einer Zeile signifikant verschieden ($\alpha_i = 0,05$).

Die Bodendichteänderung von 0.23 g/cm^3 erscheint relativ gering, wobei berücksichtigt werden muß, daß der Versuchsboden wegen seines schlechten

Gefügestandes in einem vergleichsweise kleinen Dichtebereich die Zustände locker bis verdichtet aufweist.

In der Hauptgruppe zwischen 0.9 und 1.03 g/cm³ Bodendichte liegen für P_{Max} keine signifikanten Unterschiede vor. Die gemessenen Drücke schwanken zwischen 205,8 mbar bei 0.96 g/cm³ und 187.4 mbar bei 1.03 g/cm³ bzw. 178.1 mbar bei 1.02 g/cm³ für VD21. Mit steigender Dichte sinkt der Druck in der Sonde in der Tendenz. Ein signifikanter Unterschied zur Hauptgruppe wird erst bei einer Dichte von 1.13 g/cm³ erzielt.

Der Enddruck P_{End} ist für alle untersuchten Bodendichten gleich. Es liegt eine Schwankungsbreite von 12.3 mbar vor. Eine Tendenz ist nicht zu beobachten.

Die Spurtiefe sinkt mit steigender Bodendichte, wobei eine große Schwankungsbreite besteht (Tab. 4.4). Der Verlauf ist jedoch eindeutiger als für den maximalen Sondendruck. In der Hauptgruppe besteht von 0.9 auf 1.03 g/cm³ die Tendenz, daß die Spurtiefe reduziert wird. Deutlich ist der Sprung bei 0.9 g/cm³ auf 0.96 g/cm³ zu erkennen. Bei 1.13 g/cm³ ist nur noch eine geringe Spurtiefe zu messen. Die Rollen stützten sich nicht mehr über die gesamte Rollenbreite am Boden ab.

Die hohe Schwankungsbreite für alle drei Parameter zwischen den einzelnen Versuchen ist auf die Vielzahl von Störgrößen zurückzuführen, die nur bedingt auszuschließen sind.

4.3.4.2 Bodenwassergehalt WG

Der Einfluß des Bodenwassergehaltes im beschriebenen Versuchsboden (lehmiger Sand) ist als Säulendiagramm in Abbildung 4.18 dargestellt. Aufgeführt ist der maximale Sondendruck P_{Max}, der Enddruck P_{End} und die Spurtiefe z bei 18.5, 23.7 und 30.0 Gew.-% Bodenwassergehalt und jeweils gleicher Bodenvorbereitung. Die Gerätevoreinstellungen sind in allen drei Versuchen konstant.

Tendenziell ist ein Anstieg des maximalen wie auch des Enddruckes bei höherem Wassergehalt und damit verdichtungsempfindlicherem Boden zu verzeich-

nen, wobei der Enddruck stärker vom Wassergehalt beeinflusst wird. Im hier dargestellten Fall erhöht sich P_{End} um 12.1 mbar bzw. um 20 % vom Ausgangswert bei einer Wassergehaltserhöhung um 11.5 Gew.-%. Bei P_{Max} wirkt sich der Wassergehaltsanstieg mit einem Druckanstieg von 19.8 mbar bzw. 10.2 % vom Ausgangswert aus. Damit verursacht eine Wassergehaltsänderung von 1 Gew.-% bei dieser Voreinstellung in etwa eine Sondendruckänderung für P_{Max} von 1 % und P_{End} von 2 % vom Ausgangswert - ein lineares Druck/Einsinkverhalten vorausgesetzt.

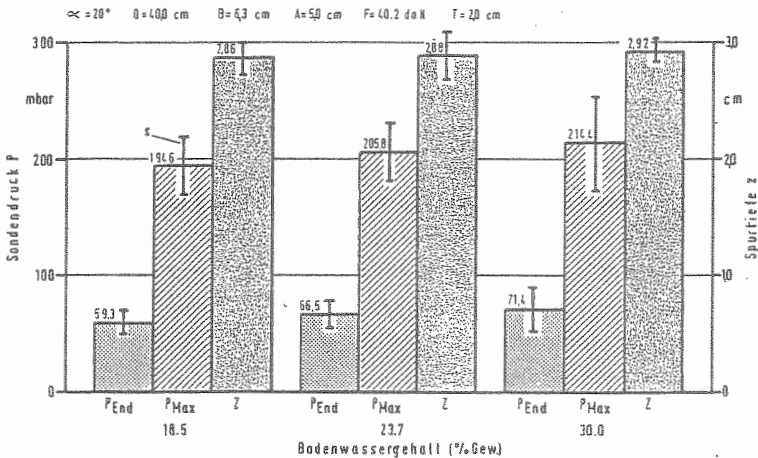


Abbildung 4.18: Sondendruck und Spurtiefe in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden

Der Einfluß des Bodenwassergehaltes auf die Spurtiefe ist in der Tendenz entsprechend, aber so gering, daß keine Wertung möglich ist.

Die folgenden Versuche wurden bei Bodenwassergehalten zwischen 21 und 23 Gew.-% durchgeführt, um Meßfehler zu verringern.

4.3.4.3 Druckrollengesamtgewicht F

Den Einfluß des Druckrollengesamtgewichtes F auf den Pflanzdruck in der Furche demonstrieren die Abbildungen 4.19 a und 4.19 b (Versuch VD1 und VD3). Auf der x-Achse ist das Gesamtgewicht der Druckrollen F in Stufen von

20 daN zwischen 20 und 100 daN aufgetragen. Die y-Achsen beschreiben den Sondendruck in einer Meßtiefe T von 2.0 cm (siehe Abb. 4.15). Den maximalen Sondendruck P_{Max} beschreibt die linke Skala in einem Meßbereich zwischen 0 und 400 mbar. Der Enddruck P_{End} richtet sich nach der rechten Skala in einem Meßbereich von 0 bis 200 mbar; die Symbole sind geschlossen gezeichnet. Die weiteren konstanten Parameter sind in der Abbildung angegeben. Die Rollenbreite B beträgt 6.3 cm, der Rollenabstand A 5.0 cm, die Bodendichte ρ 0.9 g/cm³ und der Wassergehalt WG 21.8 bzw. 22.6 Gew.-%. Versuch VD1 und VD3 unterscheiden sich im Rollendurchmesser mit D = 40.0 cm bzw. 50.0 cm.

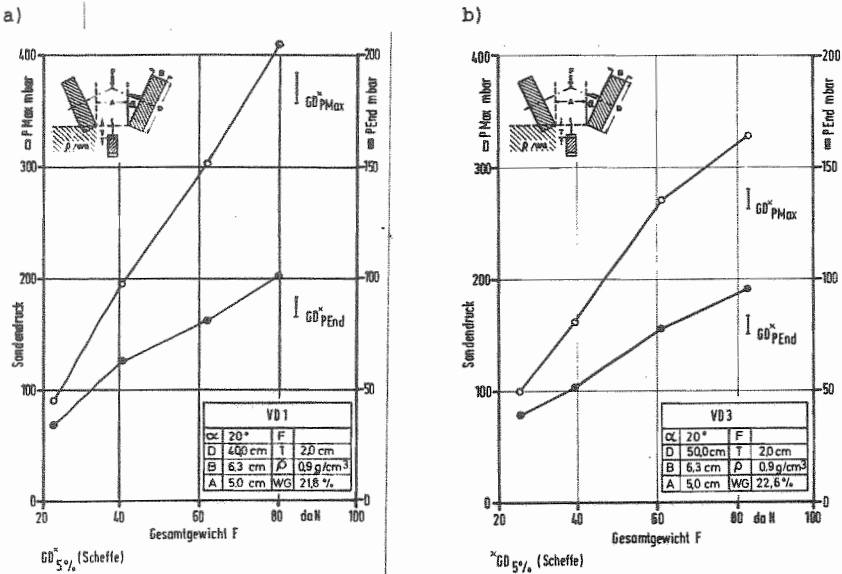


Abbildung 4.19 a, b: Abhängigkeit des Sondendruckes vom Rollengesamtgewicht bei 40 cm (a) und 50 cm (b) Durchmesser der Druckrollen

In beiden Fällen führt die stufenweise Gewichtserhöhung jeweils zu einer signifikanten Zunahme des maximalen Sondendruckes. Die Erhöhung des Druckrollengesamtgewichtes von 22.3 auf 80.0 daN führt in VD1 zu einer Druckerhöhung von 91.9 auf 409.5 mbar (Tabellen siehe Anhang). Der Enddruck wird weniger beeinflusst durch die Gewichtszunahme, wobei ebenfalls signifikante Unterschiede zu verzeichnen sind. Hier führt eine Gewichtserhöhung von 22.3 auf 80.0 daN zu einer Druckerhöhung von 34.8 auf 100.5 mbar.

Im hier untersuchten Belastungsbereich für P_{Max} liegen annähernd lineare Zusammenhänge vor.

Die Graphen aus VD1 (Abb. 4.19 a) lassen sich mit den folgenden Regressionsgleichungen beschreiben:

VD1

n = 76

$$P_{\text{Max}} = - 29.34 + 5.47 F \quad B_R = 94.7 \% \quad (6)$$

$$P_{\text{End}} = 13.51 + 1.10 F \quad B_R = 85.8 \% \quad (7)$$

Die Graphen aus VD3 (Abb. 4.19 b) entsprechen folgenden Regressionsgleichungen:

VD3

n = 68

$$P_{\text{Max}} = - 0.05 + 4.14 F \quad B_R = 94.7 \% \quad (8)$$

$$P_{\text{End}} = 12.9 + 1.03 F \quad B_R = 91.8 \% \quad (9)$$

Die Steigungen der Geraden liegen bei diesen Voreinstellungen für P_{Max} bei 5.47 für einen Durchmesser von 40.0 cm und 4.14 für 50.0 cm. Der Enddruck wird weitaus weniger vom Gesamtgewicht beeinflusst mit einer Steigung von 1.1 für 40.0 cm Durchmesser und 1.03 für 50.0 cm Durchmesser. Die Bestimmtheitsmaße B_R liegen für alle vier Gleichungen über 85 %. Der Sondendruck kann demnach mit einer hohen Wahrscheinlichkeit durch das Rollengewicht erklärt werden.

Wie beschrieben, entstehen durch die Bodenverdichtung beim Abrollen der Druckrollen rechts und links der Furche Spuren. Inwiefern sich an Hand der Bodenverformung Rückschlüsse auf das Verdichtungsverhalten des Bodens ziehen lassen, ist in den Abbildungen 4.20 a und b zu sehen. Aufgetragen sind jeweils die Spurtiefe z , die verdrängte Fläche z_F , die Rollenaufstandsfläche z_A und das verdrängte Bodenvolumen z_V in Abhängigkeit von F . Die x-Achse beschreibt die Zunahme des Druckrollengesamtgewichtes. Die linke y-Achse beschreibt z und z_F und die rechte y-Achse z_A bzw. z_V . z_F , z_A und z_V sind

jeweils für beide Rollen berechnet, um die Vergleichbarkeit mit dem Sondendruck zu gewährleisten.

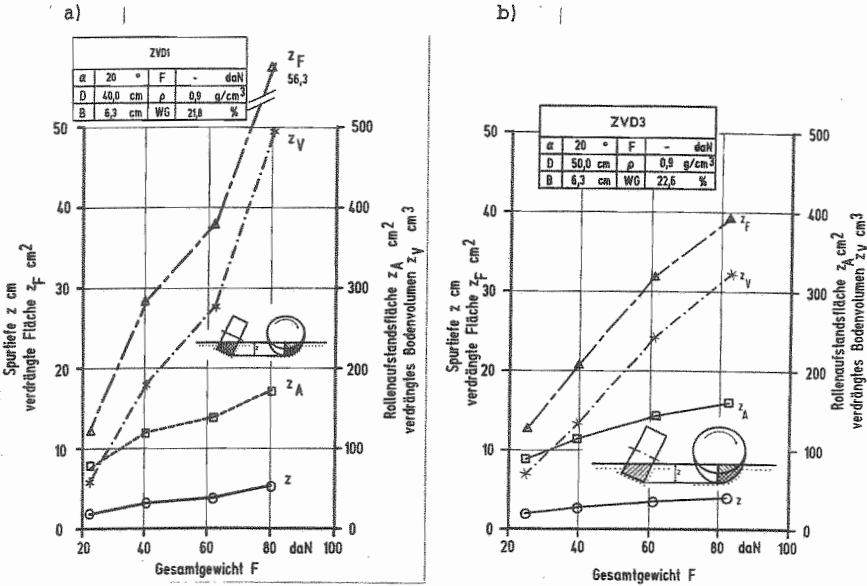


Abbildung 4.20 a, b: Spurtiefe z , verdrängte Fläche z_F , Rollenaufstandsfläche z_A und verdrängtes Bodenvolumen z_V in Abhängigkeit vom Rollengesamtgewicht bei 40 cm (a) und 50 cm (b) Rollendurchmesser

z , z_F wie auch z_A und z_V zeigen eine dem Verlauf des Sondendruckes vergleichbare von F linear abhängige Tendenz. Die Verläufe der einzelnen Parameter sind ebenfalls mit Hilfe von Regressionsgleichungen erfaßt.

ZVD1 (Abb. 4.20 a)

$n = 40$

$$z = 0,77 + 0,06 F \quad B_R = 97,1 \% \quad (10)$$

$$z_F = 3,86 + 0,738 F \quad B_R = 97,2 \% \quad (11)$$

$$z_A = 45,20 + 1,60 F \quad B_R = 95,3 \% \quad (12)$$

$$z_V = -114,9 + 7,21 F \quad B_R = 95,3 \% \quad (13)$$

ZVD3 (Abb. 4.20 b)

n = 32

$$z = 1.24 + 0.03 F \quad B_R = 96.4 \% \quad (14)$$

$$z_F = 2.20 + 0.46 F \quad B_R = 96.5 \% \quad (15)$$

$$z_A = 61.89 + 1.24 F \quad B_R = 93.1 \% \quad (16)$$

$$z_V = - 39.91 + 4.48 F \quad B_R = 97.5 \% \quad (17)$$

Für z_A ist in Abbildung 4.20 b der schwach degressive Kurvenverlauf zu erkennen, wie er aus Abbildung 3.6 zu erwarten wäre. Zu berücksichtigen ist, daß der Meßbereich der Druckrollenuntersuchungen nur einen Ausschnitt aus dem Gesamtkurvenverlauf darstellt. Der hohe x-Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von z_A steht für den bei geringer Spurtiefe stark steigenden Kurvenverlauf von z_A . Entsprechend ist der Kurvenverlauf für z_V durch die lineare Gleichung geglättet.

Wird das Druckrollengesamtgewicht auf die Rollenaufstandsfläche bezogen, errechnet sich der Flächendruck an der Bodenkontakfläche. Dieser steigt mit zunehmender Belastung, d.h. gegenüber dem Gesamtgewicht nimmt die Rollenaufstandsfläche nicht proportional zu (Tab. 4.5 a und b).

Tabelle 4.5: Spurtiefe z , verdrängte Fläche z_F , Rollenaufstandsfläche z_A , verdrängtes Bodenvolumen z_V und der Kontaktflächendruck F/z_A in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht für Rollendurchmesser von 40 cm (a) und 50 cm (b).

a)

ZVD1 F - daN D 40.0 cm B 6.3 cm
 α 20 ° ρ 0.9 g/cm³ WG 21.8 %

Bodenver- formung	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		22.3	40.2	61.8	80.0
z (cm)	20	1.97 a*	3.19 b	3.92 c	5.33 d
z_F (cm ²)	20	12.0 a	28.4 b	38.2 c	57.0 d
z_A (cm ²)	20	75 a	121 b	140 c	173 d
z_V (cm ³)	20	58 a	181 b	278 c	496 d
F/ z_A (mbar)	20	297	332	441	462

* TUKEY ($\alpha_i = 0,05$)

b)

ZVD3 F - daN D 50.0 cm B 6.3 cm
 α 20 ° ρ 0.9 g/cm³ WG 22.6 %

Bodenverformung	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		24.8	39.2	60.9	82.5
z (cm)	20	2.01 a*	2.64 b	3.47 c	3.99 d
z _F (cm ²)	20	12.60 a	20.92 b	32.06 c	39.10 d
z _A (cm ²)	20	87 a	115 b	143 c	159 d
z _V (cm ³)	20	69 a	134 b	243 c	324 d
F/z _A (mbar)	20	285	341	426	519

* TUKEY ($\alpha_i = 0,05$)

Der mittlere Flächendruck liegt für beide Versuche immer über dem in der Furche bestimmten maximalen Sondendruck. Der höchste mittlere Kontaktflächendruck wurde in ZVD3 mit 519 mbar bestimmt.

Aufgrund der tiefen Spur für ZVD1 und damit hohen Rollenaufstandsfläche ist der mittlere errechnete Flächendruck bei F = 80 daN geringer als von VD3 mit 50 cm Rollendurchmesser. Trotzdem kann ein höherer maximaler Sondendruck in der Furche gemessen werden.

Wegen des größeren Durchmessers der Druckrollen in ZVD3 (Gleichung 14 - 17) sind die Steigungen für F aller Gleichungen geringer als bei ZVD1 (Gleichung 10 - 13).

4.3.4.4 Druckrollenbreite B

Der Einfluß der Druckrollenbreite auf den Sondendruck ist in Abbildung 4.21 a dargestellt. Drei verschiedene Rollenbreiten (4.2 cm, 6.3 cm, 8.4 cm) wurden bei zunehmendem Gesamtgewicht untersucht. Der Rollendurchmesser beträgt bei allen drei Varianten 40.0 cm. Wegen extremer Spurtiefe konnte die Variante mit einer Rollenbreite von 4.2 cm nur bis 40 daN belastet werden. Eine Druckrollenverbreiterung um 2.1 cm führt bei jeder Gewichtsklasse zu einer signifikanten Reduzierung von P_{Max} und P_{End}.

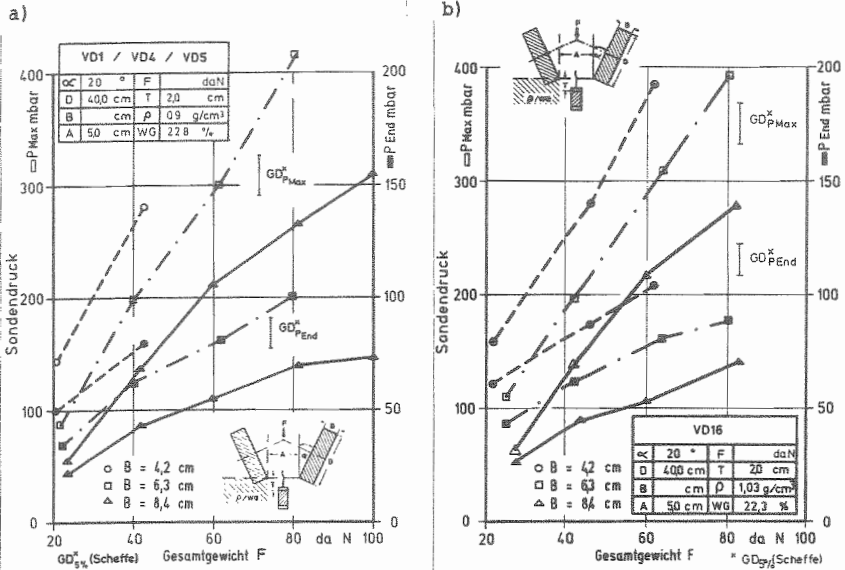


Abbildung 4.21 a, b: Sondendruck in Abhängigkeit von Druckrollenbreite und Rollengesamtgewicht in VD1, 4, 5 (a) und VD16 (b)

Die Regressionsgleichungen dieser Beziehung lauten:

VD1,4,5

n = 202

$$P_{Max} = 237.81 + 4.17 F - 34.52 B \quad B_R = 88.7 \% \quad (18)$$

$$P_{End} = 81.91 + 0.86 F - 9.52 B \quad B_R = 78.2 \% \quad (19)$$

In Abbildung 4.21 b (VD16) ist derselbe Zusammenhang jedoch in einer anderen Versuchsreihe dargestellt. Ebenfalls sind signifikante Unterschiede zwischen den drei Rollenbreiten vorhanden. Die Regressionsgleichungen für diese Beziehung lauten:

VD16

n = 249

$$P_{Max} = 237.55 + 4.61 F - 35.55 B \quad B_R = 91.1 \% \quad (20)$$

$$P_{End} = 94.11 + 0.82 F - 10.49 B \quad B_R = 78.0 \% \quad (21)$$

Mit einer Steigung von - 34.52 bzw. - 35.55 ist die starke negative Abhängigkeit des maximalen Sondendruckes von der Rollenbreite zu erkennen. Der Enddruck wird ebenfalls deutlich von der Rollenbreite (- 9.5 bzw. - 10.5) und vom Rollengesamtgewicht (0.86 bzw. 0.82) beeinflusst.

Bei konstantem Rollengewicht ist es möglich, den Einfluß der Druckrollenbreite B ohne andere Störgrößen aufzuzeigen. In den Abbildungen 4.22 und 4.23 ist der Sondendruck bzw. die Spurtiefe in Abhängigkeit von der Druckrollenbreite bei einem konstanten Druckrollengewicht von 60 daN festgehalten.

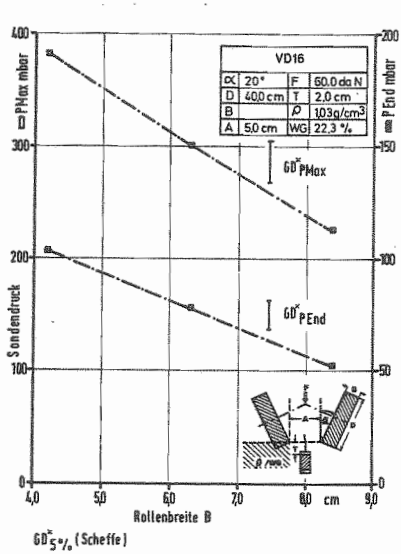


Abbildung 4.22: Sondendruck in Abhängigkeit von der Rollenbreite

Die Verbreiterung der Druckrollen verursacht eine starke Abnahme des maximalen wie auch des Enddruckes. Die Verdoppelung der Rollenbreite von 4.2 auf 8.4 cm führt in diesem Fall bei 40 cm Durchmesser zu einer Reduzierung des maximalen Sondendruckes von 382 mbar auf 217 mbar. Der Enddruck geht zurück von 103 mbar auf 53 mbar.

Eine Rollenverbreiterung hat, siehe Abbildung 4.23, die Verringerung der maximalen Spurtiefe z zur Folge. Gleichzeitig verringern sich z_F und z_V ,

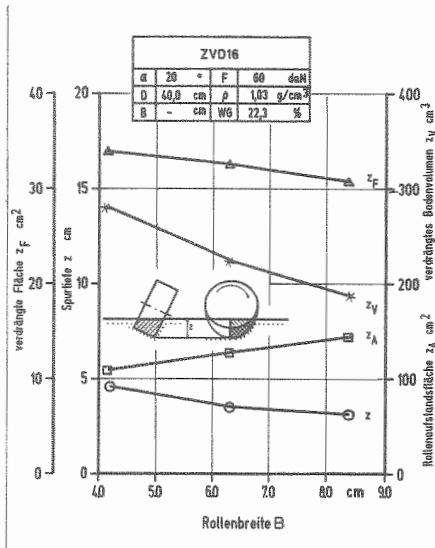


Abbildung 4.23: Spurtiefe, verdrängte Fläche, Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen in Abhängigkeit von der Rollenbreite

obwohl ein waagrecht oder schwach positiv steigender Kurvenverlauf zu erwarten wäre. Die Rollenaufstandsfläche z_A verhält sich hierzu reziprok. Je größer die Rollenbreite, um so größer wird die Rollenaufstandsfläche. Der Flächendruck an der Rollenkontakfläche wird geringer.

4.3.4.5 Druckrollendurchmesser D

Der Einfluß des Rollendurchmessers D liegt in den Versuchen VD1 und VD3 (Abb. 4.19 bis 4.20) vor, wobei wegen versuchstechnischer Unterschiede keine eindeutige Vergleichbarkeit besteht.

Ein exakter Vergleich liegt in Versuch VD16 vor, der in den Abbildungen 4.24 bis 4.26 dargestellt wird und im Versuch VD20, bei dem nur die Spurtiefe bei senkrechten Druckrollen erfaßt wurde (Abb. 4.27).

In Abbildung 4.24 a wird das Verhalten des Sondendruckes bei 30,0, 40,0 und 50,0 cm Durchmesser und einer Rollenbreite von 8,4 cm, in Abhängigkeit von der Zunahme des Rollengesamtgewichtes von 20 auf 80 daN vorgestellt. Wie zu Anfang beschrieben, besteht dieselbe, große Abhängigkeit zwischen Sondendruck und Rollengesamtgewicht. Dagegen wird durch die Änderung des Druckrollendurchmessers kein signifikanter Unterschied im Sondendruck zwischen 30,0, 40,0 und 50,0 cm Durchmesser erreicht.

Tendenziell ist durch eine Durchmesserergrößerung eine Reduzierung des maximalen Sondendruckes zu erzielen, wie auch in VD1 und VD3 zu erkennen war. Für P_{End} ist keinerlei Einfluß durch den Durchmesser festzustellen (Gleichung 23).

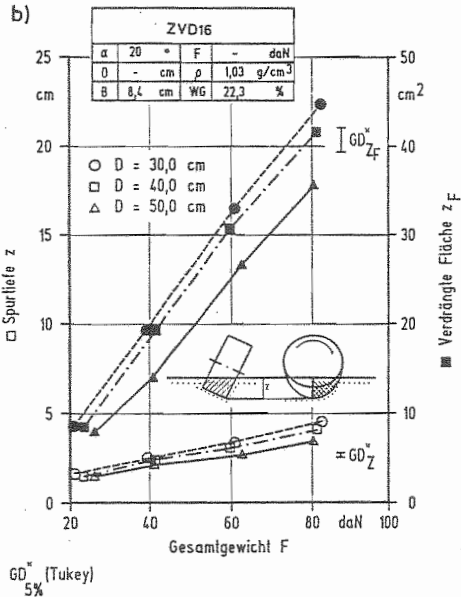
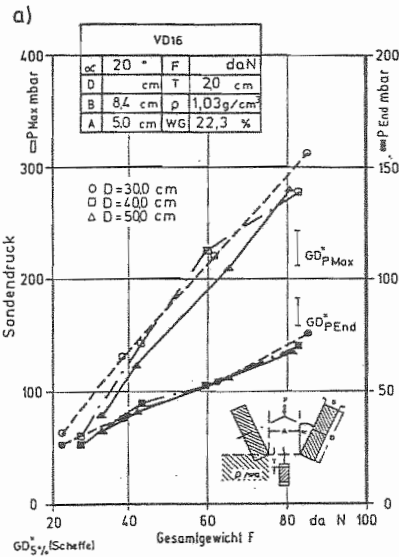


Abbildung 4.24 a, b: Sondendruck (a), Spurtiefe und verdrängte Fläche (b) in Abhängigkeit von Rollendurchmesser und Gesamtgewicht

Die Regressionsgleichungen für den hier beschriebenen Fall mit einer Rollenbreite von 8.4 cm lauten:

VD16

n = 268

$$P_{\text{Max}} = 6.97 + 3.91 F - 0.81 D \quad \text{BR} = 91.9 \% \quad (22)$$

$$P_{\text{End}} = 10.99 + 0.73 F \quad - \quad \text{BR} = 72.5 \% \quad (23)$$

In Abbildung 4.24 b ist für dasselbe Beispiel die Spurtiefe z und die verdrängte Fläche z_F dargestellt. Ein Rollendurchmesser von 50.0 cm verursacht eine geringere Spurtiefe als ein Durchmesser von 40.0 oder 30.0 cm.

Entsprechend verhält sich die verdrängte Fläche z_F , die ebenfalls aufgrund der geringeren Spurtiefe bei größeren Rollen sinkt. Wie Tabelle 4.6 verdeutlicht, verhalten sich z_A und z_V uneinheitlich.

Tabelle 4.6: z , z_F , z_A , und z_V in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht und der Rollenbreite

ZVD16 F - daN D - cm B 8.4 cm
 α 20 ° ρ 1.03 g/cm³ WG 22.3 %

Bodenverformung	Rollenbreite (cm)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		20	40	60	80
z (cm)	30.0	1.58 ab*	2.55 d	3.27 fg	3.83 h
	40.0	1.39 a	2.39 d	3.16 f	3.71 h
	50.0	1.21 a	2.07 c	2.81 e	3.41 g
z_F (cm ²)	30.0	8.24 a	19.72 c	33.10 ef	43.50 g
	40.0	7.16 a	18.52 c	30.74 e	41.00 g
	50.0	6.06 a	13.62 b	25.62 d	35.38 f
z_A (cm ²)	30.0	48 a	95 bc	130 d	148 e
	40.0	49 a	102 c	145 e	166 f
	50.0	47 a	91 b	143 e	173 f
z_V (cm ³)	30.0	32 a	92 b	179 c	262 d
	40.0	32 a	100 b	188 c	279 d
	50.0	30 a	76 b	169 c	255 d

* TUKEY ($\alpha_i = 0,05$)

Der Zusammenhang, Sondendruck in Abhängigkeit vom Rollendurchmesser bei drei verschiedenen Rollenbreiten, ist in Abbildung 4.25 für ein Rollengesamtgewicht von 40.0 daN dargestellt. Gegenüber der Rollenbreite ist der Einfluß

des Rollendurchmessers als unbedeutend zu erkennen. In der Tendenz ist eine Verringerung des maximalen Sondendruckes bei steigendem Rollendurchmesser von 30.0 auf 40.0 cm zu erkennen. Es muß berücksichtigt werden, daß die Grenzen für die Veränderung des Druckrollendurchmessers, wegen Überschreitung der möglichen Bauhöhe einer Pflanzmaschine und wegen des Gewichtes, viel enger sind als für die Rollenbreite.

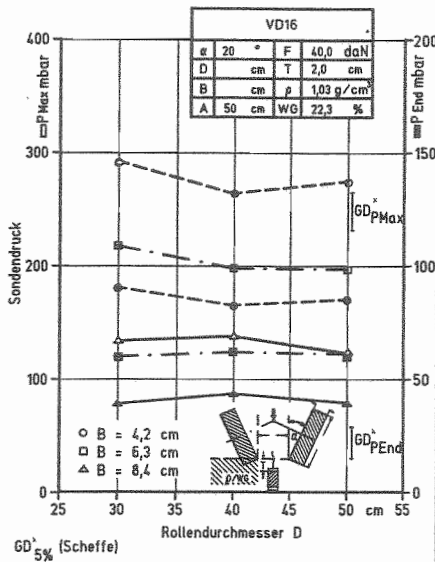


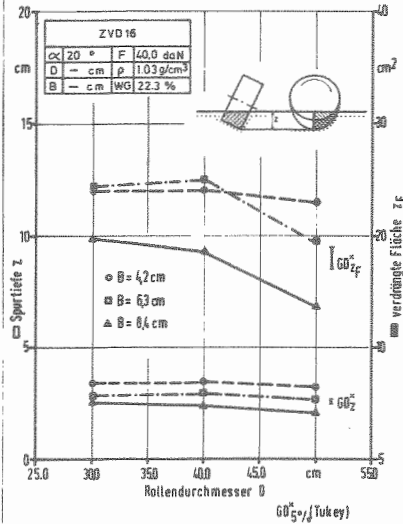
Abbildung 4.25: Sondendruck in Abhängigkeit von Rollendurchmesser und Rollenbreite

Spurtiefe und verdrängte Fläche verhalten sich für gleiche Rollenbreiten ähnlich (Abb. 4.26 a). Eine Durchmessererhöhung führt zwischen 40.0 und 50.0 cm zu einer Spurtiefen- bzw. Flächenverringerng. Weniger Boden wird in Richtung Furche verdrängt, wobei die Spurtiefenreduzierung aufgrund der Breitenänderung weitaus deutlicher ausfällt. Der Kurvenverlauf für B = 4.2 cm ist untypisch und möglicherweise auf eine starke Grabwirkung der schmalen Rollen zurückzuführen.

Der Verlauf der Meßwerte der Rollenaufstandsfläche und des verdrängten Volumens sind nicht eindeutig (Abb. 4.26 b). Weder für z_A noch für z_V ist ein Einfluß des Rollendurchmesser zu erkennen, obwohl anzunehmen wäre, daß

bei größerem Durchmesser die Rollenaufstandsfläche zunimmt (siehe hierzu Tabellen im Anhang).

a) .



b)

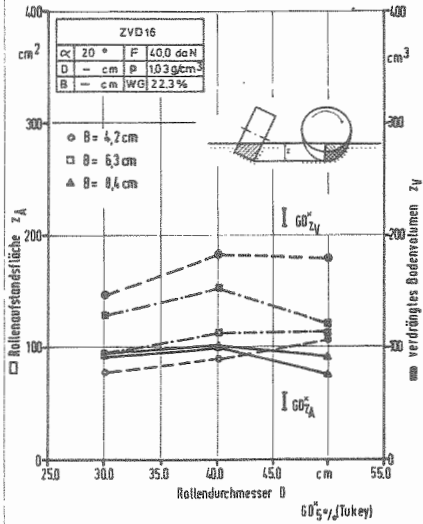


Abbildung 4.26 a, b: Spurtiefe, verdrängte Fläche (a), Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen (b) in Abhängigkeit von Rollendurchmesser und Rollenbreite

Um den Einfluß des Anstellwinkels auszuschließen, wurde ein weiterer Versuch mit senkrecht gestellten Druckrollen hinter dem Furchenschar durchgeführt. Wegen des geringen Raumes zwischen den Druckrollen war es nicht möglich Sondendrucke zu erfassen, so daß eine Interpretation nur anhand der Spurtiefe möglich ist. Aus Abbildung 4.27 ist abzulesen, daß eine Zunahme der Druckrollenbreite zu einer Reduzierung der Spurtiefe und umgekehrt zu einer Erhöhung der Rollenaufstandsfläche führt. Die verdrängte Fläche sinkt bei Erhöhung der Rollenbreite von 6.3 auf 8.4 cm Breite.

Der Einfluß des Rollendurchmessers ist schwierig zu interpretieren. Eine Steigerung des Rollendurchmessers führt wie in Versuch VD16 zu einer Reduzierung der Spurtiefe (Ausnahme D = 50.0 cm, B = 4.2 cm). Die Rollenaufstandsfläche steigt in jedem Fall bei Zunahme des Rollendurchmessers. Gleichzeitig zeigt die verdrängte Fläche eine uneinheitliche Tendenz.

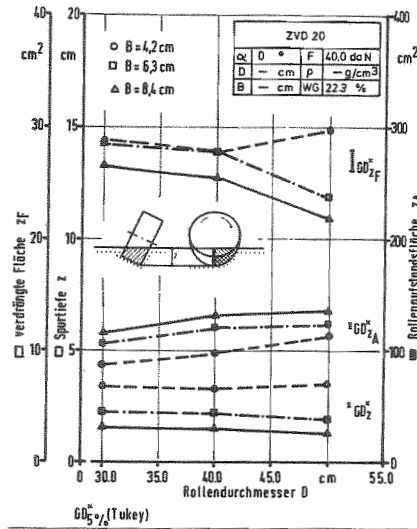


Abbildung 4.27: Spurtiefe, verdrängte Fläche und Rollenaufstandsfläche in Abhängigkeit vom Rollendurchmesser und Rollenbreite bei senkrechten Druckrollen

Zwischen 30.0 und 40.0 cm Durchmesser ist sie schwach sinkend und verringert sich dann für B = 6.3 und 8.4 cm. Der Anstieg für B = 4.2 cm ist entsprechend VD16 nicht zu erklären.

4.3.4.6 Druckrollenanstellwinkel α

Durch Änderung des Druckrollenanstellwinkels ist es möglich, die Druckrichtung zu verändern, wie bereits mit den Druckstempelversuchen nachgewiesen werden konnte. Der Einfluß des Winkels auf die Höhe des Sondendruckes wurde in vier Versuchen bestimmt. In den drei in diesem Kapitel beschriebenen Versuchen erfolgt die Messung konstant bei einer Tiefe von 2.0 cm. Die Höhe des Druckes in unterschiedlicher Meßtiefe T bei geändertem Anstellwinkel wird im nächsten Kapitel besprochen.

Auf Abbildung 4.28 a ist der Sondendruckverlauf über dem Gesamtgewicht bei drei verschiedenen Anstellwinkeln dargestellt. Der maximale Sondendruck ist stark vom Anstellwinkel beeinflusst. Bei 30 ° werden die höchsten Werte erzielt. Weniger deutlich ist der Einfluß des Anstellwinkels auf den Enddruck. Das degressive Verhalten des Enddruckes ab 60 daN Gesamtgewicht bei 30 ° Anstellwinkel ist voraussichtlich auf Bodenbruch im Oberboden zwischen den Druckrollen zurückzuführen. (Die Berechnung der Regressionen erfolgt aus diesem Grund für P_{Max} ohne 30 °/ 80 daN und für P_{End} ohne 30 °/ 60 und 80 daN).

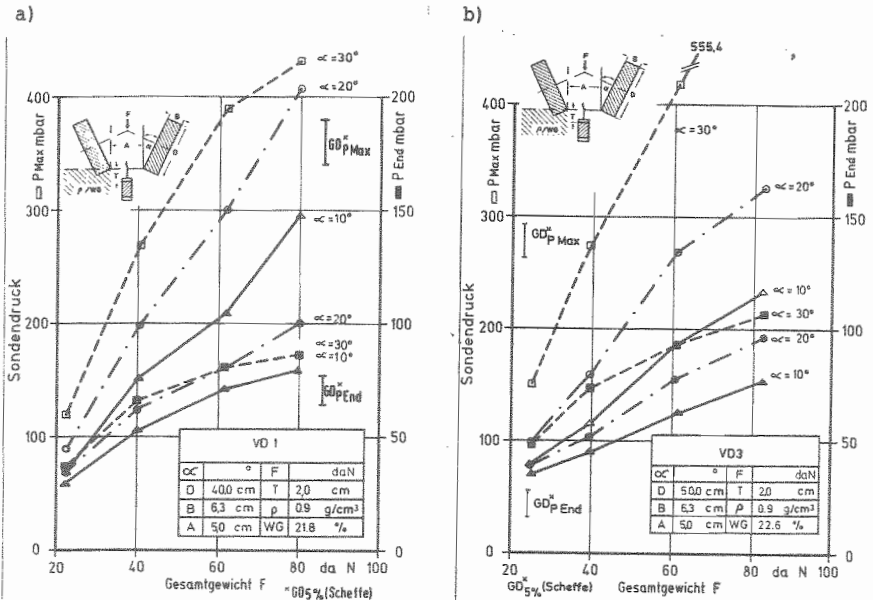


Abbildung 4.28 a, b: Sondendruck in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Rollengesamtgewicht bei 40 cm (a) und 50 cm (b) Rollendurchmesser

Die Regressionsgleichungen für das in Abbildung 4.28 a beschriebene Beispiel lauten:

VD1

n = 178

$$P_{Max} = - 142.20 + 5.11 F + 6.30 \alpha \quad B_R = 90.0 \% \quad (24)$$

$$P_{End} = - 1.82 + 1.05 F + 0.74 \alpha \quad B_R = 82.2 \% \quad (25)$$

Eine Steigerung von α um 10° erhöht den Sondendruck in der Furche um ca 60 mbar. Dies entspricht einer Mehrbelastung der Druckrollen von 12 daN. In anderen Worten ausgedrückt, ist es möglich, zur Erzielung eines konstanten Druckes am Wurzelballen, unterschiedliche Belastungen der Druckrollen über den Winkel auszugleichen.

Die Spurtiefe, die verdrängte Fläche, die Rollenaufstandsfläche und das verdrängte Bodenvolumen sind in Tabelle 4.7 dargestellt. Aufgrund der Zunahme des Anstellwinkels ist eine signifikante Zunahme der Spurtiefe zu erkennen. Die verdrängte Fläche und die Rollenaufstandsfläche sind für einen Winkel von 10° und 20° konstant und erfahren eine deutliche Erhöhung für 30° Anstellwinkel (außer bei $F = 80$ daN). Das verdrängte Bodenvolumen zeigt ebenfalls eine sprunghafte Zunahme von 10° und 20° auf 30° Anstellwinkel. Voraussichtlich ist diese starke Volumenzunahme auf horizontales Ausweichen des Bodens in Richtung Furchenmitte zurückzuführen.

Tabelle 4.7: z , z_F , z_A und z_V in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht und Anstellwinkel.

ZVD1 F - daN D 40.0 cm B 6.3 cm
 α - ° ρ 0.9 g/cm³ WG 21.8 %

Bodenverformung	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		22.3	40.2	61.8	80.0
z (cm)	10	1.51 a	2.86 c	3.69 e	4.87 g
	20	1.97 b	3.19 d	3.92 f	5.33 i
	30	2.79 c	3.88 e	5.13 h	5.63 k
z_F (cm ²)	10	12.2 a	29.6 c	40.2 e	55.2 g
	20	12.0 a	28.4 c	38.2 e	57.0 g
	30	18.0 b	33.4 d	51.6 f	59.0 h
z_A (cm ²)	10	79 a	123 c	144 e	170 f
	20	75 a	121 c	140 e	173 g
	30	90 b	131 d	164 f	176 g
z_V (cm ³)	10	53 a	189 c	289 d	472 g
	20	58 a	183 c	278 e	496 g
	30	108 b	238 d	436 f	527 h

* TUKEY ($\alpha_1 = 0,05$)

In Abbildung 4.28 b wird gezeigt, daß eine Erhöhung des Anstellwinkels von 10° auf 30° bei 50.0 cm Rollendurchmesser zu einer deutlichen Steigerung des

maximalen wie auch des Enddruckes führt. Ab einem Gesamtgewicht von 40 daN sind die Unterschiede signifikant gesichert.

Die Regressionsgleichungen für den beschriebenen Fall lauten:

VD3

n = 207

$$P_{\text{Max}} = - 191.18 + 4.67 F + 9.53 \alpha \quad B_R = 87.3 \% \quad (26)$$

$$P_{\text{End}} = - 5.71 + 0.92 F + 1.27 \alpha \quad B_R = 86.0 \% \quad (27)$$

Gegenüber VD1 ist der Einfluß des Gesamtgewichtes, wie schon in Kapitel 4.3.4.3 beschrieben, wegen des größeren Durchmessers geringer. Dagegen hat der Anstellwinkel, soweit eine Vergleichbarkeit mit VD1 vorliegt, bei D = 50.0 cm mit einer Steigung von 9.53 bzw. 1.27 einen größeren Einfluß auf den Sondendruck. Eine Reduzierung von α um 10 ° gleicht eine Zunahme von F = 20 daN bei P_{Max} aus.

Abbildung 4.29 zeigt den Sondendruck, aufgetragen über dem Anstellwinkel für Rollenbreiten von 4.2, 6.3 und 8.4 cm bei einem konstanten Rollengesamtgewicht von 41.6 daN.

Die Steigerung des Anstellwinkels von 10 auf 30 ° verursacht eine Verdopplung des Maximal- und Enddruckes bei allen drei untersuchten Rollenbreiten. Ein deutlicher Sprung ist zwischen 20 ° und 30 ° Anstellwinkel zu verzeichnen.

Die Regressionsgleichungen für die Abhängigkeit des Sondendruckes von Rollenbreite und Anstellwinkel lauten:

VD17

n = 180

$$P_{\text{Max}} = 309.19 - 36.17 B + 6.60 \alpha \quad B_R = 84.1 \% \quad (28)$$

$$P_{\text{End}} = 108.90 - 10.07 B + 0.90 \alpha \quad B_R = 73.2 \% \quad (29)$$

Es wurde eine lineare Schätzfunktion zur Beschreibung dieses Zusammenhanges gewählt, obwohl eine schwach progressive Beziehung vorliegt.

An dieser Stelle wird der starke Einfluß der Druckrollenbreite mit einer Steigung von 36.17 gegenüber 6.60 für den Anstellwinkel auf den maximalen Sondendruck deutlich. Eine Druckrollenverbreiterung um 2.0 cm von z.B. 6.0 cm auf 8.0 cm verringert den Sondendruck um 70 mbar. Eine Druckverringern in der selben Höhe verlangt vom Anstellwinkel eine Reduzierung um ca. 11 °. Beim Enddruck verursacht eine Winkeländerung nur noch eine Druckveränderung mit dem Multiplikator 0.9 im Vergleich zur Druckrollenbreite mit 10.07.

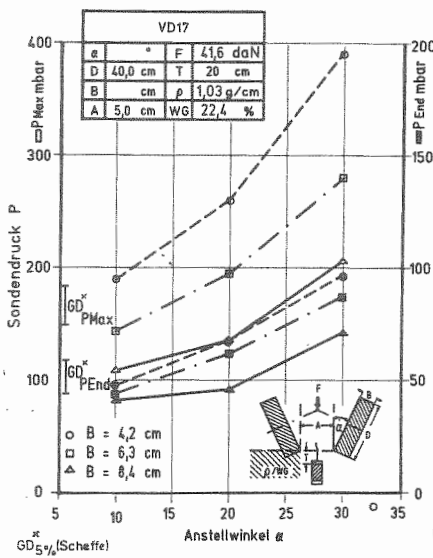


Abbildung 4.29: Sondendruck in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Rollenbreite

Die Spurtiefe z verhält sich fast entsprechend dem Sondendruck (Abb. 4.30, Rollenbreite 6.3 cm). Sie steigt bei steigendem Anstellwinkel. Eine bessere Interpretationsmöglichkeit bietet die verdrängte Fläche. Mit zunehmendem Anstellwinkel wird mehr Boden verdrängt. Eine deutliche Zunahme ist hier ebenfalls zwischen 20 ° und 30 ° Anstellwinkel zu verzeichnen. Die Rollenaufstandsfläche, als Hauptursache für die Höhe des Flächendruckes, steigt ebenfalls, aber im Verhältnis zur verdrängten Fläche nur unterproportional an. Das verdrängte Bodenvolumen, die Menge an Boden, die verdichtet wird, um die Räder abzustützen, verhält sich entsprechend der verdrängten Fläche.

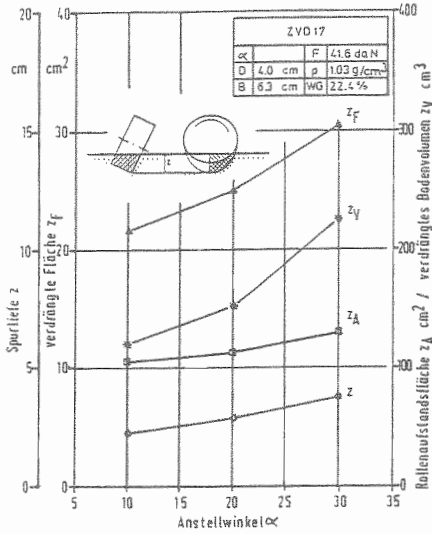


Abbildung 4.30: Spurtiefe, verdrängte Fläche, Rollenaufstandsfläche und verdrängtes Bodenvolumen in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Im vorliegenden Fall wird deutlich, wie schwierig die Übertragung des sichtbaren Ergebnisses - die geschlossene Furche und die Spurtiefe z - auf den Sondendruck bzw. den Druck am Wurzelballen ist. In der Tendenz verhalten sich in diesem Fall Sondendruck und verdrängte Fläche bzw. verdrängtes Volumen ähnlich, obwohl die Rollenaufstandsfläche bei konstanter Belastung steigt und damit der Flächendruck sinkt. Es ist anzunehmen, daß die Druckrichtung in diesem Fall hauptbestimmend für den Sondendruck ist.

4.3.4.7 Regressionsgleichungen aus F, B, D, α

Die verschiedene Wertigkeit des Druckrollengesamtwertes F, der Druckrollenbreite B, des Druckrollendurchmessers D und des Anstellwinkels α zur Beschreibung des Druckes in der Pflanzfurche wird in den folgenden vierfaktoriellen Regressionsgleichungen behandelt. Es handelt sich um eine Zusammenfassung aller vorgestellten Versuche. Der Gültigkeitsbereich liegt für F

zwischen 20 und 80 daN, für B zwischen 4.2 und 8.4 cm, für D zwischen 30 und 50 cm und für α zwischen 10 und 30 °.

$$\begin{aligned} n &= 1426 & B_R &= 87.6 \% \\ P_{\text{Max}} &= 126.08 + 4.43 F - 35.72 B - 0.79 D + 7.52 \alpha & (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= 1426 & B_R &= 75.1 \% \\ P_{\text{End}} &= 79.51 + 0.84 F - 10.26 B - 0.17 D + 0.88 \alpha & (31) \end{aligned}$$

Die Rollenbreite verursacht mit einer negativen Steigung von 35.72 bzw. 10.26 die weitreichendste Änderung der Schätzfunktion; eine Rollenverbreiterung reduziert P_{Max} wie auch P_{End} . Der Anstellwinkel α hat mit einer positiven Steigung von 7.52 bzw. 0.88 schon einen weitaus geringeren Einfluß. Das Druckrollengesamtgewicht zeigt ebenfalls eine geringere Wirkung mit einer Steigung von 4.43 bzw. 0.84.

Es muß bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, in welcher Größenordnung die einzelnen Parameter in die Gleichung eingehen. Der Meßbereich von F liegt zwischen 20 und 80 daN, B zwischen 4.2 und 8.4 cm, also um eine Zehnerpotenz geringer. Damit ist es möglich, einen vorgegebenen Sondendruck bei einer Erhöhung von F z.B. durch eine Verbreiterung von B auszugleichen.

Der Einfluß des Rollendurchmessers mit einer negativen Steigung von 0.79 bzw. 0.17 ist weitgehend vernachlässigbar.

Die Regressionsgleichungen für z , z_F , z_A und z_V verhalten sich für den vorliegenden Fall wie folgt:

$$\begin{aligned} n &= 608 & B_R &= 89.1 \% \\ z &= 2.85 + 0.04 F - 0.30 B - 0.02 D + 0.06 \alpha & (32) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= 608 & B_R &= 87.3 \% \\ z_F &= 16.84 + 0.58 F - 1.85 B - 0.28 D + 0.34 \alpha & (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= 608 & B_R &= 85.2 \% \\ z_A &= -9.85 + 1.46 F + 1.66 B + 0.78 D + 0.64 \alpha & (34) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= 608 & B_R &= 84.0 \% \\ z_V &= 19.0 + 5.22 F - 24.53 B - + 4.13 \alpha & (35) \end{aligned}$$

z , z_F , z_A und z_V nehmen bei steigendem Druckrollengesamtgewicht und größerem Anstellwinkel zu. Mit der Verwendung breiterer oder im Durchmesser größerer Rollen werden z , z_F und z_V gleichzeitig reduziert (negative Steigung). z_A verhält sich gegensinnig. Sie nimmt zu (positive Steigung) bei Rollenverbreiterung wie auch bei Durchmessererhöhung. Der Flächendruck reduziert sich damit.

4.3.4.8 Meßtiefe T

Um die Druckverteilung über die Tiefe in der Pflanzfurche zu bestimmen, wurden Meßdurchgänge mit Drucksonden in verschiedenen Tiefen durchgeführt. Die mögliche maximale Meßtiefe T richtet sich nach dem Furchenschar bzw. der Tiefeneinstellung des Furchenschares. Der Drucknehmer mißt den Mitteldruck auf der gesamten Länge der Meßmembran von 3.0 cm, so daß bei jeder Tiefe der Druck aus einem Bodenbereich von 3.0 cm erfaßt wird.

In Abbildung 4.31 ist der Druckverlauf in der Pflanzfurche bei einem Anstellwinkel von 20° , einem Rollendurchmesser von 40.0 cm, einer Rollenbreite von 8.4 cm und einem Rollengesamtgewicht von 59.8 daN vorgestellt. Die Druckerfassung erfolgte in einer Meßtiefe zwischen 1.0 und 8.0 cm in Abständen von 1.0 bzw. 0.5 cm. Zwischen 1.0 und 3.0 cm Meßtiefe besteht kein signifikanter Unterschied beim maximalem Sondendruck. Das Druckmaximum wird bei 2.0 cm Meßtiefe erreicht. Mit Zunahme der Meßtiefe erfolgt eine

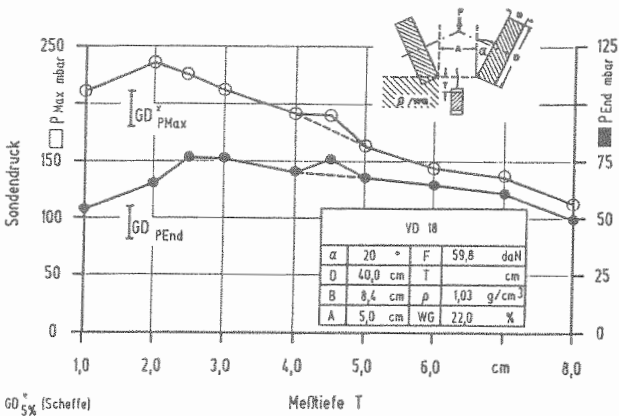


Abbildung 4.31: Sondendruck über die Meßtiefe

kontinuierliche Abnahme des Sondendruckes. Der Sprung in einer Tiefe von 4.5 cm ist auf einen nachträglich nicht erklärbaren Versuchsfehler zurückzuführen. Der Enddruck erreicht erst bei 2.5 cm Meßtiefe sein Maximum. Zwischen 2.0 und 6.0 cm Meßtiefe besteht kein signifikanter Unterschied im Enddruck. In größerer Tiefe baut sich die Druckspannung weniger schnell ab als an der Oberfläche, so daß der Verlauf flacher ist als für P_{Max} .

In Abbildung 4.32 wird der Sondendruck bei Meßtiefen zwischen 1.0 und 5.0 cm und 10, 20 und 30 ° Anstellwinkel gezeigt. Das Schar wurde in seiner Tiefe während der Meßreihe nicht verändert.

Der maximale Sondendruck erreicht für alle Winkel bei 2.0 cm Meßtiefe sein Maximum. Mit zunehmender Tiefe verringert sich der Druck an der Sonde. Eine Zunahme des Anstellwinkels von 10 auf 20 ° bzw. auf 30 ° verursacht eine signifikante Erhöhung des maximalen Sondendruckes, wie auch in Kapitel 4.3.4.6 besprochen wurde.

Die Enddrücke erreichen ihr Maximum erst in einem Tiefenbereich zwischen 2.0 und 4.0 cm. Der Verlauf ist mit zunehmender Tiefe fast waagrecht. Zwischen 10 ° Anstellwinkel und 30 ° Anstellwinkel besteht ein signifikanter Unterschied im Enddruck. Tendenziell ist P_{End} für 10 ° < 20 ° < 30 ° Anstellwinkel (Tabelle siehe Anhang).

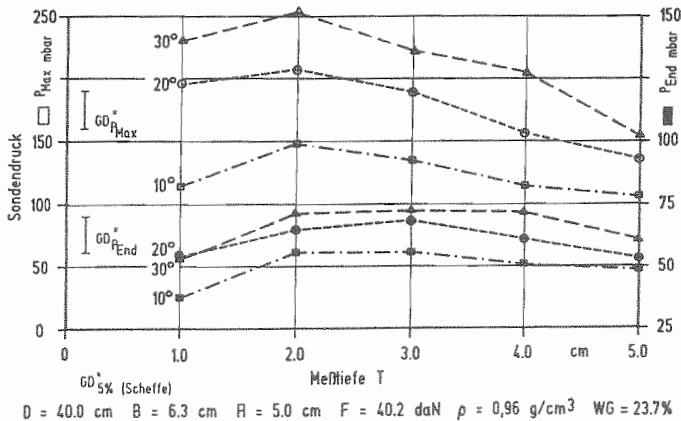


Abbildung 4.32: Sondendruck über die Meßtiefe in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

4.3.4.9 Druckrollenabstand A

Durch die Erhöhung des Druckrollenabstandes A ist die Höhe des Sondendruckes zu beeinflussen. Die Entfernung zwischen der Rollenkontaktfläche und der Meßstelle nimmt zu.

Die Versuche, die in Abbildung 4.33 und 4.34 dargestellt sind, wurden unabhängig voneinander durchgeführt. Die konstant gehaltenen Parameter sind angegeben. Der Versuch in Abbildung 4.33 ist mit einem Druckrollengesamtgewicht von 40.2 daN, in Abbildung 4.34 mit 61.8 daN durchgeführt. Der untersuchte Druckrollenabstand liegt zwischen 4.0 und 10.2 cm bzw. 13.6 cm.

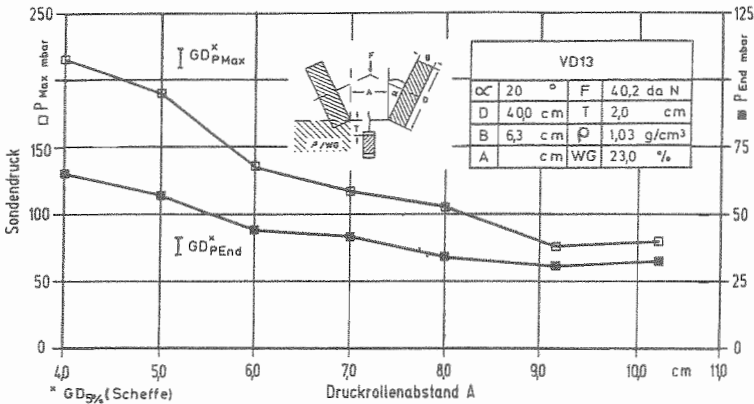


Abbildung 4.33: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand

Mit Zunahme des Abstandes zwischen den Rollen, d.h. mit Vergrößerung des Abstandes der Druckrollen von der Drucksonde, verringert sich in beiden Fällen der Druck in der Furche. Die Abflachung der Druckkurven zwischen 5.0 cm und 4.0 cm Druckrollenabstand ist voraussichtlich auf Bodenbruch zurückzuführen. Besonders deutlich wird dieses Verhalten in Abbildung 4.34 für den Enddruck. Die elastische Spannung des Bodens entweicht an die Oberfläche.

Der Druckverlauf in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand ist nicht linear, sondern entspricht in etwa einer logarithmischen Funktion mit der Gleichung (nach SACHS 1984)

$$y = c + d \cdot \ln A$$

$$d < 0$$

$$(36)$$

Die genauen Meßwerte sind im Anhang aufgeführt. Eine Abstandsverbreiterung von 5.0 auf 6.0 cm verringert P_{Max} in Abbildung 4.33 von 182 mbar auf 133 mbar, also um 27 %. Entsprechend führt eine Abstandsverbreiterung in Abbildung 4.34 von 5.2 cm auf 5.7 cm zu einem Druckrückgang von 42 mbar, was einer 13 %-igen Reduzierung vom Ausgangswert entspricht. In einem Abstand von 5 bis 6 cm zwischen den Rollen verursacht eine Abstandsänderung von 0.1 cm eine Änderung von P_{Max} um 2.5 %.

In der multiblen Regression konnte der Einfluß des Druckrollenabstandes nicht berücksichtigt werden, da aus versuchstechnischen Gründen nur zwei Versuchsdurchläufe mit dieser Fragestellung durchgeführt werden konnten.

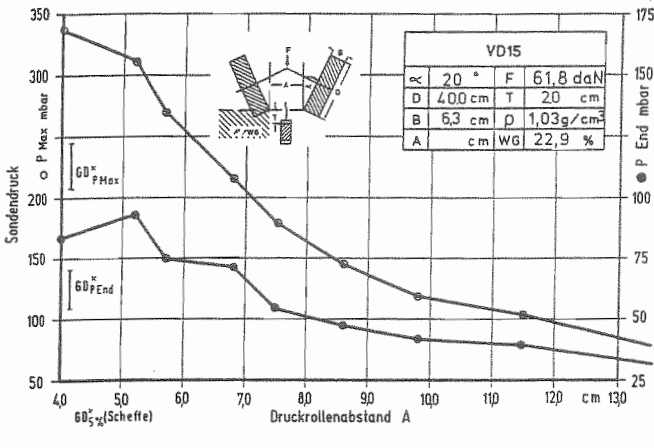


Abbildung 4.34: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand

Der Verlauf von P_{End} ist vergleichbar P_{Max} . Mit größerem Rollenabstand und sinkendem P_{Max} ist wie bei den vorhergehenden Untersuchungen ein flacherer Kurvenverlauf zu verzeichnen.

Die starke Abhängigkeit des erfaßten Sondendruckes vom Druckrollenabstand A verdeutlicht, daß bei der Gerätevoreinstellung zur Erzielung gleicher Ausgangsbedingungen eine hohe Exaktheit verlangt wird. Ein Teil der Reststreuung der vorgestellten Regressionsgleichungen ist auf Abweichungen im Rollenabstand zurückzuführen.

5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse aus den Druckstempel- und Drucksondenversuchen

Die im letzten Kapitel gewonnenen Ergebnisse beziehen sich auf die Vorgänge im Boden beim Schließen der Furche und dem Andrücken des Bodens mit den Druckrollen.

An die Druckrollen wird die Anforderung gestellt, daß sie einen optimalen Bodenschluß zwischen umgebenden Boden und Wurzelballen erzeugen sollen. Dabei ist der Begriff des optimalen Bodenschlusses nicht klar definierbar - vergleichbar mit dem Begriff der Bodengare oder dem physikalischen Bodenzustand für ein optimales Wachstum einer Pflanze (CZERATZKI 1966, 1972).

Die grundlegenden Einflußfaktoren werden im folgenden behandelt. Die Untersuchungen erfolgten mit Druckstempeln und Drucksonden. Anschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse auf praxisübliche Pflanzmaschinen angewandt.

5.1 Grundlagenuntersuchungen

Bei der Durchführung der Sondendruckversuche in der Bodenrinne erwies sich die entwickelte hydraulische Drucksonde als geeignet, die Schubspannungen in der schließenden Furche zu erfassen (siehe Kap. 4.3.1.1).

Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß es sich bei den Sondendrücken nur um Relativwerte handelt, die keine direkte Aussage über die durch die Schubspannung verursachte Verdichtung des Bodens zulassen (BOLLING 1987, SÖHNE 1951, 1952). Eine direkte Aussage wäre nur mit vergleichenden Messungen möglich, die jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätten.

Für den Einsatz in Böden mit größeren Aggregaten sind die Sonden ungeeignet, weil die Druckverteilung über die Meßmembran ungleich wird und Meßfehler auftreten.

5.1.1 Druckrollenparameter

Der Bodendruck in der Furche, gemessen als maximaler Sondendruck P_{Max} , wird durch die folgenden Druckrollenparameter beeinflusst:

- das Druckrollengesamtgewicht F
- die Rollenbreite B
- der Durchmesser der Rollen D
- der Anstellwinkel zur Senkrechten α
- das Laufflächenprofil
- der Abstand der Rollen zueinander A

Außerdem können der Bodenwassergehalt WG und die Bodenlagerungsdichte ρ das Ergebnis beeinflussen.

Zwischen dem maximalen Sondendruck P_{Max} und dem Druckrollengesamtgewicht F , der Druckrollenbreite B , dem Druckrollendurchmesser D und dem Anstellwinkel α bestehen lineare Beziehungen, die durch Regressionsgleichung 30 beschrieben werden.

$$n = 1426 \qquad B_R = 87.6 \%$$

$$P_{Max} = 126.1 + 4.4 F - 35.7 B - 0.8 D + 7.5 \alpha \qquad (30)$$

Die Wertigkeit der einzelnen Parameter für den Gültigkeitsbereich beschreibt Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Spannweite von P_{Max} , z , z_F , z_A und z_V für den Gültigkeitsbereich von F , B , D und α , eingesetzt in die Regressionsgleichungen

	Gültigkeitsbereich	Spannweite				
		P_{Max} (mbar)	z (cm)	z_F (cm ²)	z_A (cm ²)	z_V (cm ³)
F	20.0 - 80.0 daN	+ 265	+ 2.4	+ 34.8	+ 87.6	+ 313
B	4.2 - 8.4 cm	- 150	- 1.3	- 7.8	+ 7.0	- 103
D	30.0 - 50.0 cm	- 15	- 0.4	- 5.6	+ 15.6	-
α	10.0 - 30.0 °	+ 150	+ 1.2	+ 6.8	+ 12.8	+ 82

Mit 265 mbar verändert das Druckrollengesamtgewicht am weitreichendsten den maximalen Sondendruck. Die Druckrollenbreite und der Anstellwinkel besitzen einen ähnlich hohen Einfluß auf den Druck in der Furche. Der Druckrollendurchmesser spielt mit 15 mbar Druckveränderung im Gültigkeitsbereich nur eine untergeordnete Bedeutung.

Im folgenden werden die Einflußfaktoren einzeln diskutiert.

Der maximale Sondendruck verhält sich zum Rollengesamtgewicht F in allen Versuchen weitgehend linear. Mit einer hohen Bestimmtheit verursacht eine Gewichtserhöhung eine Drucksteigerung in der geschlossenen Furche. Der höchste Druck, der in den Versuchen an der Sonde gemessen wurde, betrug 555 mbar (VD3).

Nach SÖHNE (1952, 1953, 1956) und BOLLING und SÖHNE (1982) ist die Druckspannung im Oberboden direkt abhängig vom Kontaktflächendruck. Da bei Druckrollen mit zunehmender Belastung die Spurtiefe und damit die Rollenaufstandsfläche steigt, wäre zu erwarten gewesen, daß der Sondendruck nicht linear ansteigt.

Das lineare Druck/Einsinkverhalten der Druckrollen widerspricht den bekannten Tatsachen, wonach in Ackerböden kein HOOKE'sches Gesetz gilt (BOLLING 1987, SÖHNE 1952). Möglicherweise liegen im Versuchsboden für den untersuchten Kontaktflächendruck bis 519 mbar (ZVD3) noch lineare Beziehungen vor.

Durch eine Veränderung der Rollenbreite B ist es möglich, den Druck in der Furche entscheidend zu beeinflussen. Im untersuchten Gültigkeitsbereich ist eine Spannweite von 150 mbar Druck am Ballen möglich (Gl. 30). Ausschlaggebend für die hohe Steigung der Schätzfunktion von 35.7 für B sind verschiedene Gründe.

Zum ersten vergrößern breitere Rollen die Rollenaufstandsfläche und reduzieren gleichzeitig die Spurtiefe, wie den Regressionsgleichungen für z und z_A zu entnehmen ist (Gl. 32 und 34). Damit ist der Kontakt-

flächendruck reduziert und aufgrund der geringeren Spurtiefe wird weniger Boden seitlich in Richtung Furche verdrängt.

Außerdem ist nach BOLLING (1987) unter Stempeln oder Rädern der Druck dort am höchsten, wo der Boden am wenigsten durch seitliches Fließen ausweichen kann. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in den Druckstempelversuchen zu belegen (siehe Abb. 4.6 - 4.8). Werden breitere Druckrollen eingesetzt, so stützt sich die Druckrolle auf einer größeren Breite auf dem Boden ab. Der Ort des maximalen Druckes ist somit weiter von der Furchenmitte entfernt und der Druck in der Furche ist reduziert.

Weiterhin bewirkt eine Verbreiterung der Druckrollen, daß selbst bei gleicher angenommener Spurtiefe, die Rolleninnenkante, die der Furche am nächsten liegt, weniger tief in den Boden einsinkt. An dieser Stelle wird weniger Boden in Richtung Furche verdrängt. Der Druck wird ebenfalls geringer.

Aus der Reifenmechanik ist bekannt, daß mit Hilfe von im Durchmesser größeren Reifen der Kontaktflächendruck reduziert wird (KOOLEN und KUIPERS 1983). Für den Sondendruck im Oberboden zwischen den Rollen kann dieser Einfluß nur begrenzt nachgewiesen werden. Eine Erhöhung des Rollendurchmessers D von 30 auf 50 cm verursacht nur eine maximale Druckverringerung von 16 mbar (Gl. 30). Der Kontrollwert P_{End} verhält sich entsprechend.

Eine Erklärung wurde im Vergleich der Sondendruckmeßergebnisse mit den Ergebnissen der Spurtiefenmessung gesucht. Es zeigt sich, daß eine Durchmesservergrößerung nur zu einer geringfügigen Reduzierung der Spurtiefe führt, bei gleichzeitiger deutlicher Zunahme der Rollenaufstandsfläche. Möglicherweise bewirken der flachere Einlaufwinkel größerer Rollen, oder das geringere Aufwerfen von Boden vor größeren Rollen oder die langsamere Verdichtung des Bodens durch die längere Aufstandsfläche, daß der Sondendruck bei größer werdenden Rollen nur geringfügig beeinflusst wird.

Von POPE (1969) aber auch BOLLING (1987) u.a. wurde beobachtet, daß Stempel mit kleiner Vorschubgeschwindigkeit und langsame Rollen tiefer in den Boden einsinken und damit einen höheren Druck ausüben als solche mit größerer Geschwindigkeit. Eine eindeutige Wertung dieses Effektes ist aus der Literatur nicht möglich.

Je größer der Anstellwinkel α , desto höher ist der Druck in der Pflanzfurche und zwar über die gesamte Meßtiefe T. Dieses Ergebnis kann sowohl mit den Drucksondenversuchen als auch mit den Stempelversuchen belegt werden.

Die durch waagrechte Schubspannung ausgelöste horizontale Bodenverlagerung nimmt unter schrägen Druckstempeln und Druckrollen mit zunehmendem Anstellwinkel zu. Sie verdichten bei gleicher Druckkraft eine größere Bodenmenge. Damit nimmt die Spurtiefe zum einen über den Anstieg des Winkels und zum anderen wegen des größeren, in horizontaler Richtung verdrängten Bodenvolumens, zu.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Berechnungen von STEINER (GL. 4 nach BOLLING 1987). Er konnte belegen, daß ein Stempel bei gleichem vertikalen Druck um so weiter in den Boden einsinkt, je größer der Winkel α_0 ist. Die Menge an in horizontaler Richtung durch Schubspannung verdichtetem Boden steigt analog dazu an.

In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse aus den Druckstempeluntersuchungen zusammengefaßt. Dargestellt ist die Bodenverformung mit den Kraftwirkungslinien im Bereich der Furche (A/2).

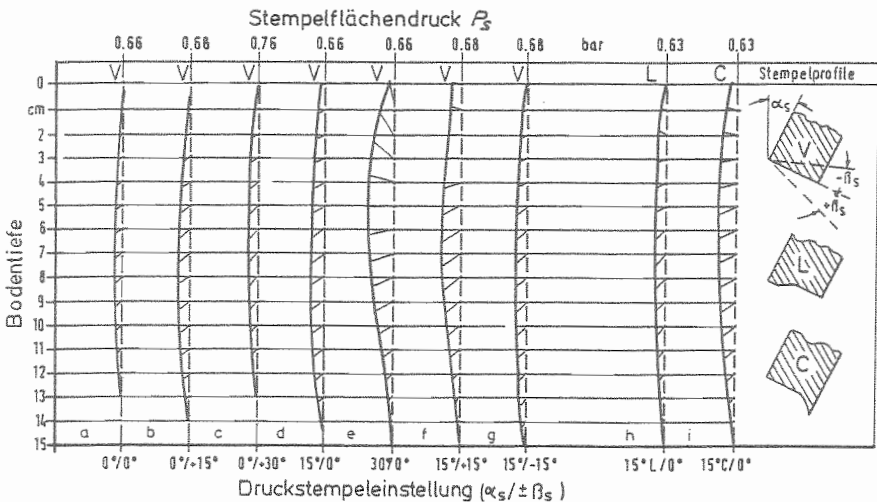


Abbildung 5.1: Kraftwirkungslinien unter Druckstempeln in der Furche

Eine senkrechte Druckeinleitung, ohne oder mit zusätzlicher seitlicher Anstellung der Stempelaufstandsfläche in Furchenrichtung, verursacht eine relativ geringe verdichtende Wirkung in der Furche (Abb. 5.1 a, b, c), und ist damit ungeeignet für Pflanzmaschinen. Erst die Veränderung der Druckrichtung erhöht bei gleichem Stempelflächendruck den Betrag der Kraftwirkungslinien merklich (Abb. 5.1 d, e). Die aufwärts gekrümmten Wirkungslinien bei einer Abwinkelung von $\alpha_S = 30^\circ$ werden durch Scherkräfte ausgelöst. Dies hat zur Folge, daß es zu unerwünschtem Bodenbruch zwischen den Druckrollen kommt. Der Boden entweicht nach oben. Daraus ist zu folgern, daß zu hohe Anstellwinkel ungeeignet für die Einbettung sind.

Mit zunehmender Tiefe unterscheiden sich die Darstellungen aus Stempel- und Drucksondenversuchen. P_{End} verdeutlicht die aus den Stempelversuchen bekannte Druckverteilung über die Tiefe besser. Und zwar gibt die elastische Verformung analog wie in den Stempelversuchen nicht die unmittelbare Beanspruchung des Bodens wieder, sondern das Ergebnis dieser Beanspruchung in Form der Reaktionskraft.

Wie Tab. 5.1 zeigt, verursacht eine Winkeländerung im Bereich von 10 bis 30° eine Druckänderung in 2 cm Meßtiefe von ca. 150 mbar. Die Gesamtregressionsgleichung verschweigt, daß die Druckzunahme nicht vollkommen linear ist, sondern daß von 20° auf 30° Anstellwinkel eine überproportionale Druckzunahme vorliegt (Abb. 4.29). Diese überproportionale Druckzunahme ist auf Schervorgänge im Oberboden zurückzuführen, wie sie auch in den Stempelversuchen nachgewiesen werden konnten (Abb. 5.1 e).

Für kleine Jungpflanzen, die flach gepflanzt werden, kann der Druckverlauf über die Tiefe zu Schwierigkeiten beim Bodenschluß führen. Denn in den obersten 2 bis 3 cm des Bodens wird entweder noch nicht die höchste Druckspannung erreicht oder der Boden weicht durch Bodenbruch nach oben aus und verschüttet die Pflanze.

Als optimal für die Einbettung sind daher waagrechte Kraftwirkungslinien anzusehen. Richtung und Betrag sollten möglichst ab der Bodenoberfläche über die ganze Pflanztiefe gleich sein.

Durch eine Änderung der Druckrichtung kann dieser Anforderung nicht entsprochen werden, da der höchste Bodendruck, sichtbar an der Länge der Kraftwirkungslinien, im Bereich der tiefsten Einsinkung, d.h. im am weitesten von der Furche entfernten Bereich der Spur auftritt.

Trotz dieser Tatsache soll ein konstanter Druck über die gesamte Furchentiefe mit waagrechten Kraftwirkungslinien vorherrschen. Durch eine zusätzliche Abwinkelung der Stempellauffläche ($+ \beta$) bei schräger Druckrichtung ist diese Möglichkeit gegeben (Abb. 5.1 f, i). Hiermit wird auch kleinen, flach zu pflanzenden Jungpflanzen ein ausreichender Bodenschluß vermittelt.

Eine zweite Möglichkeit stellt das Laufflächenprofil von "L" dar (Abb. 5.1 h). Das Profil verursacht eine hohe Einsinktiefen und damit hohe Verdichtung direkt an der Furche und reduziert gleichzeitig durch die negative Abwinkelung ($- \beta$) das verdrängte Bodenvolumen und damit die Spurtiefe.

Weiterhin wird der Druck in der schließenden Furche vom Druckrollenabstand, von der Bodenlagerungsdichte und vom Bodenwassergehalt beeinflusst. Diese Einflußfaktoren sollen im folgenden diskutiert werden.

Wie u.a. BOLLING (1987) und HORN (1980) in ihren Untersuchungen mit Drucksonden feststellten, nimmt der erfaßte Druck mit der Entfernung zwischen Reifenkontaktfläche und Drucksonde ab. Dieser Einfluß kann ebenfalls in den Druckstempelversuchen beobachtet werden (siehe Abb. 4.33, 4.34). Die Druckabnahme in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand A verhält sich nicht linear, sondern entspricht aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Druckspannung einer logarithmischen Funktion. Je weiter der Meßort von der Druckrolle entfernt ist, um so geringer wird die relative Druckabnahme.

Zu belegen ist diese Druckabnahme mit den Druckstempelversuchen. Der Betrag der Kraftwirkungslinien wird kleiner, je weiter der Abstand zur Stempelauffläche wird (Abb. 4.6 - 4.8).

Für die vorliegenden Versuchsbedingungen kann erwartet werden, daß eine Rollenabstandsveränderung von 0.1 cm in einem Bereich zwischen 5 und 6 cm

Rollenabstand eine Veränderung des maximalen Sondendruckes von 2.5 % vom Ausgangswert bewirkt.

Bei vielen auf dem Markt befindlichen Pflanzmaschinen ist bereits die Möglichkeit der Rollenabstandsänderung zur Druckregulierung gegeben. Eine Beeinflussung der Spurtiefe ist damit nicht machbar.

Die physikalischen Eigenschaften von Ackerböden verändern sich u.a. mit dem Grad der Vorverdichtung und dem Bodenwassergehalt (HORN 1980, KNITTEL 1975, KRICK 1971, SÖHNE 1952, SOMMER und ZACH 1986). Für pflanzfertige Böden gilt, daß sie wegen ihrer Lockerung und dem relativ hohen Wassergehalt leicht zu verdichten sind.

In den Untersuchungen zeigt sich aber, daß bei Änderung der Lagerungsdichte kaum Auswirkungen auf den maximalen Druck in der Furche und keine Auswirkungen auf den verbleibenden Enddruck zu verzeichnen sind. Nur in der Tendenz ist eine Reduzierung des maximalen Druckes bei höherer Lagerungsdichte zu erkennen.

Dieses Ergebnis widerspricht den Erfahrungen aus der Bodenmechanik (s.o.) und den Ergebnissen von SCHAAF (1981).

Daß kaum ein Einfluß der Dichte vorliegt, ist zum Teil damit zu begründen, daß das vorlaufende Schar den Boden lockert und den Einfluß der Bodenvorverdichtung ausgleicht. Außerdem muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß der Versuchsboden einen schlechten Gefügezustand besitzt, so daß dieses Ergebnis nicht ohne weiteres auf andere Böden zu übertragen ist.

Das Einsinkverhalten der Druckrollen verhält sich so, wie es aus der Literatur zu erwarten ist (s.o.). Eine höhere Lagerungsdichte führt zur Ausbildung einer geringeren Spur. Dieses Mißverhältnis zwischen der Spurtiefe und dem Sondendruck in der Furche ist nachvollziehbar, da die Druckrollen mit den Außenkanten außerhalb des gelockerten Bodens abrollen und damit direkt durch die Vorverdichtung in ihrer Spurbildung beeinflußt werden.

Die Spurtiefe verhilft damit zu keiner Aussage über die Höhe des Druckes am Pflanzort in Abhängigkeit von der jeweiligen Vorverdichtung.

Der Einfluß des Bodenwassergehaltes WG auf den Sondendruck ist mit den durchgeführten Versuchen ebenfalls nicht abschließend zu klären.

BOLLING (1987) konnte in seinen Untersuchungen mit Drucksonden einen direkten Einfluß des Bodenwassergehaltes auf die Verdichtbarkeit nachweisen. In der Tendenz sind dessen Ergebnisse zu belegen. Ein höherer Wassergehalt steigert den Druck in der Sonde, sinkender Wassergehalt verringert den Druck. Deutlich ist der Einfluß auf den elastischen Sondendruck zu verzeichnen. Die Aggregate feuchter Böden haften besser aneinander und bauen damit weniger schnell den elastischen Druck ab.

Diese Beziehung gilt jedoch nur unterhalb der Wassersättigung eines Bodens, die in den Versuchen nicht erreicht wurde.

5.1.2 Spurtiefe

Ein weiteres Ziel der Arbeit war es zu überprüfen, ob es möglich ist, an Hand der Spurtiefe z Aussagen über den in der Furche herrschenden Druck zu treffen.

Bei der Interpretation und Übertragung der Spurtiefenmessungen auf den Druck in der Furche ist zu berücksichtigen, daß der Meßort des Sondendruckes neben den Druckrollen liegt.

Änderungen der Spurtiefe können sich nur bei Variation des Druckrollengesamtgewichtes F, der Druckrollenbreite B, dem Druckrollendurchmesser D und dem Anstellwinkel α ergeben.

$$\begin{aligned} n &= 608 & B_R &= 89.1 \% \\ z &= 2.85 + 0.04 F - 0.30 B - 0.02 D + 0.06 \alpha & (32) \end{aligned}$$

Zum besseren Vergleich der Regressionsgleichungen miteinander bzw. zu deren Wertung sind in Tabelle 5.1 die Spanweiten in Abhängigkeit von den vier untersuchten Druckrollenparameter im jeweiligen Gültigkeitsbereich aufgetragen.

Die Spurtiefe z zeigt wie der maximale Sondendruck ein fast lineares Druck-/Einsinkverhalten (Gl. 32). Dies widerspricht den Erfahrungen, daß der Einsinkverlauf wegen des Anstellwinkels, bis die Rolle über die gesamte

Breite am Boden aufsteht, ungleichmäßig sein müßte. Eine Erklärung für diese Abweichung ist nur insofern möglich, als daß durch das vorauslaufende Schar der Boden seitlich in Richtung Rollenlauffläche aufgeworfen wird und damit auch bei geringer Spurtiefe ein Bodenkontakt über die gesamte Rollenbreite besteht.

Die Regressionsgleichung für die Spurtiefe z (Gl. 32) verhält sich zu der Regressionsgleichung für den maximalen Sondendruck P_{Max} (Gl. 30) am ähnlichsten. Das Druckrollengesamtgewicht F , die Druckrollenbreite B und der Anstellwinkel α geben, multipliziert mit dem Faktor 110, relativ gut die Steigung für P_{Max} wieder. Die Steigung für den Rollendurchmesser D ist zusätzlich um den Faktor 3 zu korrigieren (siehe Tab 5.1).

Liegt für die beschriebenen Versuchsbedingungen bei zwei Pflanzmaschinen eine gleiche Spurtiefe vor, so kann daraus geschlossen werden, daß der Bodendruck in der Furche bei beiden Maschinen ähnlich groß ist, vorausgesetzt der Druckrollenabstand A und der Durchmesser D sind gleich groß. Die Regressionsgleichungen gelten selbstverständlich nur im untersuchten Gültigkeitsbereich.

Aus der Spurtiefe errechnen sich die abgeleiteten Größen wie die verdrängte Fläche z_F , die Rollenaufstandsfläche z_A und das verdrängte Bodenvolumen z_V .

Die verdrängte Fläche z_F zeigt ein lineares Verhalten mit zunehmender Spurtiefe (Abb. 3.6), es besteht aber bei konstanter Spurtiefe keine direkte Beziehung zum Rollendurchmesser.

Das Ergebnis aus den Druckstempelversuchen und die Berechnung nach STEINER (Gl.4, nach BOLLING 1987) decken sich mit den Berechnungen der verdrängten Fläche bei steigendem Anstellwinkel.

Als Modell für den in der Furche herrschenden Druck ist z_F ungeeignet, da sie nur eine Aussage über die Gesamtmenge an verdrängtem Boden macht.

Die Rollenaufstandsfläche z_A und das verdrängte Bodenvolumen z_V stellen ebenfalls keine direkte Beziehung zum Sondendruck in der Furche her. Wie in Abbildung 3.4 zu beobachten ist, nähert sich die Rollenaufstandsfläche mit steigender Einsinktiefen z einem Grenzwert. Das verdrängte Volumen dagegen nimmt überproportional zu.

Für die Rollenaufstandsfläche z_A ist zu beachten, daß eine Druckrollenverbreiterung wie auch eine Durchmessererhöhung, zu einem Anstieg der Rollenkontaktfläche führen (siehe auch Gl. 34 und Tab. 5.1). Zu erwarten wäre eine Reduzierung des Flächendruckes und damit Verringerung des Sondendruckes. Dieser Einfluß konnte nicht nachgewiesen werden. An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß bei der Berechnung von z_A von einem gleichmäßigen Kontaktflächendruck über die Rollenbreite ausgegangen wurde. Diese Annahme, wie sie nach BOLLING (1987) für senkrechte Rollen gilt, ist damit für schräge Druckrollen nicht haltbar.

Als letzte Größe ist das verdrängte Bodenvolumen z_V anzusprechen (Gl. 35). Es sagt aus, welche Menge an Boden verdrängt werden muß, um die Druckrollen am Boden abzustützen. Ein Einfluß des Durchmessers ist statistisch nicht abzusichern. Von der Tendenz her ist der Verlauf dieser Schätzfunktion ebenfalls ähnlich der von P_{Max} , wobei wie für z_F die Steigungen für B und α als zu gering anzusehen sind.

5.1.3 Beispiel einer Anwendung

Die diskutierten Ergebnisse aus Gleichung 30 und 32 bieten die Möglichkeit, eine Wertung verschiedener Pflanzmaschinen in bezug auf den zu erwartenden Pflanzdruck in der Furche aufgrund deren jeweiliger Spurtiefen durchzuführen. Die absoluten Werte gelten nur für die in dieser Arbeit vorliegenden Bedingungen. Das Verhältnis der einzelnen Einflußfaktoren zueinander dürfte auch auf andere Bedingungen unter Vorbehalt übertragbar sein. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf andere Bodenbedingungen ist nur durch vergleichende Messungen möglich.

Durch Anwendung von Gleichung 30 können bei einer mehrreihigen Pflanzmaschine Druckunterschiede am Wurzelballen, die durch unterschiedliche Gewichte der Pflanzpersonen verursacht werden, durch Veränderungen der Einstellungsparameter der Druckrollen ausgeglichen werden. Ebenfalls wird es möglich, abzuwägen, mit welcher Maßnahme bei geringstem baulichen Aufwand, z.B. eine große Spurtiefe, zu reduzieren ist (Gl. 32) .

So wird in dem hier vorgestellten Beispiel ein Gewichtsunterschied von 20 daN zwischen zwei Pflanzaggregaten angenommen. Das eine Pflanzaggregat mit einem Gesamtgewicht von 80 daN verursacht bei Druckrollen mit einer Rollenbreite von 6 cm, einem Rollendurchmesser von 40 cm und einem Anstellwinkel von 20° bei einem Rollenabstand von 5 cm einen Maximaldruck von 385 mbar bei einer Spurtiefe z von 4.65 cm. Das andere Pflanzaggregat bringt, wegen einer leichteren Pflanzperson, nur ein Gesamtgewicht von 60 daN auf die Waage. Es bewirkt damit bei den selben Einstellungsparametern nur einen maximalen Sondendruck von 296 mbar an der Pflanze bzw. eine Spurtiefe von 3.85 cm.

Ein Ausgleich des Bodendruckes in der Furche ist durch eine Änderung der Pflanzaggregateneinstellung am schweren Gerät möglich. Die Rollenbreite und der Durchmesser bleiben konstant, aber der Anstellwinkel wird auf 10° reduziert. Durch diese Maßnahme verringert sich der Druck in der Furche auf 310 mbar und die Spurtiefe reduziert sich ebenfalls auf 4.05 cm. Selbstverständlich ist es ebenfalls möglich, das leichte Pflanzaggregat durch Auflage von Gewichten auszugleichen, wenn eine höhere Verdichtung am Pflanzort gewünscht wird.

5.2 Anwendung der Ergebnisse bei praxisüblichen Pflanzmaschinen

Nachdem Untersuchungen an der Versuchspflanzmaschine mit getrennt voneinander arbeitenden Pflanzschar und Druckrollen vorgestellt wurden, stellt sich die Frage, inwieweit die Ergebnisse auf praxisübliche Pflanzmaschinen anwendbar sind.

Aus diesem Grund wurde der Einfluß des Ausgangsgewichtes und der Zuladung auf den Sondendruck und die Spurtiefe bei den Pflanzmaschinen "A" und "L" untersucht (siehe Abb. 2.2 u. 2.3 c).

Die Druckrollen von "A" besitzen eine Rollenbreite B von 6.0 cm, einen Rollendurchmesser D von 40.0 cm, einen Anstellwinkel α von 23.5° und einen Rollenabstand A von 5.5 cm. Das Leergewicht des Gerätes beträgt 45.5 daN. Die Druckrollen der Pflanzmaschine "L" besitzen eine Druckrollenbreite von 7.9 cm, einen Durchmesser D von 51.0 cm (die Druckrollen sind profiliert, siehe Abb. 2.8), einen Anstellwinkel α von 15° und einen Rollenabstand A von 4.6 cm. Die Pflanzmaschine wiegt leer 66 daN.

Bei beiden Pflanzmaschinen sind das Furchenschar und die Druckrollen fest miteinander verbunden. Die Befestigung an der Geräteschiene erfolgt bei "L" über ein Parallelogramm, bei "A" über eine drehbare Achse. Bei "A" belasten die Pflanzpersonen die Druckrollen direkt mit ihrem Gewicht. Bei "L" kann das Gewicht variiert werden, je nachdem ob der Sitzplatz vor oder hinter dem Parallelogramm eingehängt ist.

Nach Gleichung 2 stützt sich nur ein Teil des Gerätegesamtgewichtes über die Druckrollen am Boden ab. Der Rest wird über das Pflanzschar und die Aufhängung abgeleitet.

Daß dies der Fall ist, ist in Tabelle 5.2 für die Abstützung über das Pflanzschar dargestellt. Die vom Schar unabhängigen Druckrollen der Versuchspflanzmaschine "V" sinken, hier jeweils dargestellt bei zwei Gesamtgewichten, mit vorlaufendem Schar tiefer ein als ohne Schar. Gerade umgekehrt verhält es sich bei den Pflanzmaschinen "A" und "L", bei denen Schar und Druckrollen fest miteinander verbunden sind. Mit Schar bilden sie bei beiden Zuladungen eine flachere Spur aus als ohne. Die Rollen sind demnach geringer belastet, weil ein Teil der Gewichtskraft benötigt wird, um das Schar im Boden zu führen.

Tabelle 5.2: Spurtiefe von "V", "A" und "L" ohne (-) und mit (+) Furchenschar, dargestellt bei jeweils 2 Gesamtgewichten ("V") bzw. 2 Zuladungen ("A", "L").

Furchenschar "-", "+"		Spurtiefe z					
		Versuchspfl.maschine "V"		"A"		"L"	
	(daN)	40.2	61.8	0	20.6	0	20.6
"-"	(cm)	2.60	3.41	2.42	3.17	2.44	3.06
	S	0.10	0.13	0.14	0.20	0.34	0.31
"+"	(cm)	2.79	3.86	2.21	3.02	2.33	2.93
	S	0.09	0.21	0.21	0.25	0.17	0.19

Eine Erklärung hierzu bietet PIETSCH (1977) an. Schare ohne Fußabrundung erfahren bis zu einem Winkel von $\mu < 60^\circ$ bis 70° der Scharvorderkante eine

Vertikalkraft nach oben. Mit Fußabrundung und $\mu = 90^\circ$, der Fall liegt bei "A" vor, überwiegt ebenfalls die Vertikalkraft nach oben.

Der Sondendruckverlauf für "A" und "L" ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Geräte wurden zusätzlich zum Ausgangsgewicht mit einer Zuladung F_{Zu} von 0 bis 100 daN belastet.

Der maximale Sondendruck in der Furche unter "A" zeigt ab $F_{Zu} = 20$ daN ein fast lineares Verhalten. Die Druckkurve von "L" nähert sich degressiv einem Grenzwert an. Der Verlauf des Enddruckes ist für "A" und "L" weitgehend linear. "L" verursacht eine höhere elastische Verdichtung als "A". Dieses Verhalten ist möglicherweise auf die Profilierung der Druckrollen von "L" zurückzuführen (siehe Abb. 5.1 h).

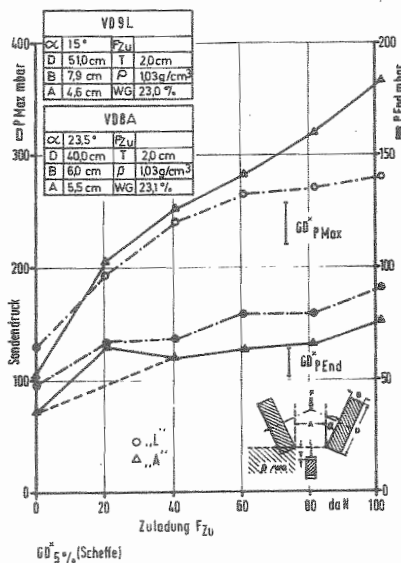
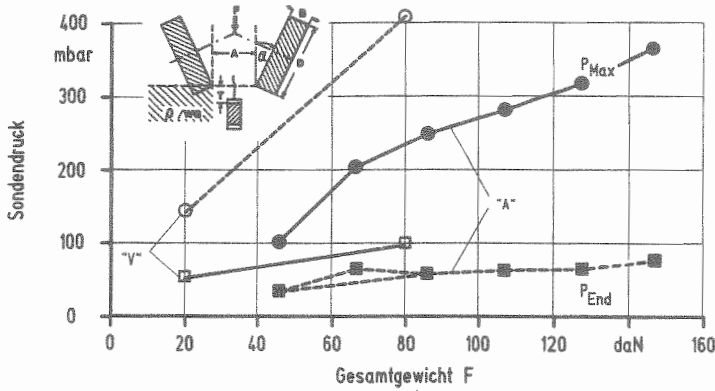


Abbildung 5.2: Sondendruck in Abhängigkeit von der Zuladung bei den Pflanzmaschinen "A" und "L"

An Hand der Abbildungen 5.3 und 5.4 a, b wird abschließend die Frage diskutiert, inwiefern sich die Ergebnisse aus den Drucksondenversuchen ("V") und Spurtiefenmessungen (Gl. 30 - 35) auf die Versuche mit den Pflanzmaschinen

"A" und "L" in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht anwenden lassen. Das Gesamtgewicht berechnet sich hier aus dem Gerätegewicht und der Zuladung.

- a) VD8A: Gew 45,5 daN $\alpha = 23,5^\circ$ D = 40,0 cm B = 6,0 cm A = 5,5 cm $\rho = 1,03 \text{ g/cm}^3$ WG = 23,0 %
 V: $P_{\text{Max}} = 126,08 + 4,43 F - 35,72 B - 0,79 D + 7,52 \alpha$
 $P_{\text{End}} = 79,51 + 0,84 F - 10,26 B - 0,17 D + 0,88 \alpha$



- b) VD8A: Gew 45,5 daN $\alpha = 23,5^\circ$ D = 40,0 cm B = 6,0 cm A = 5,5 cm $\rho = 1,03 \text{ g/cm}^3$ WG = 23,0 %
 V: $z_F = 16,84 + 0,58 F - 1,85 B - 0,28 D + 0,34 \alpha$
 $z_A = -9,85 + 1,46 F + 1,66 B + 0,78 D + 0,64 \alpha$

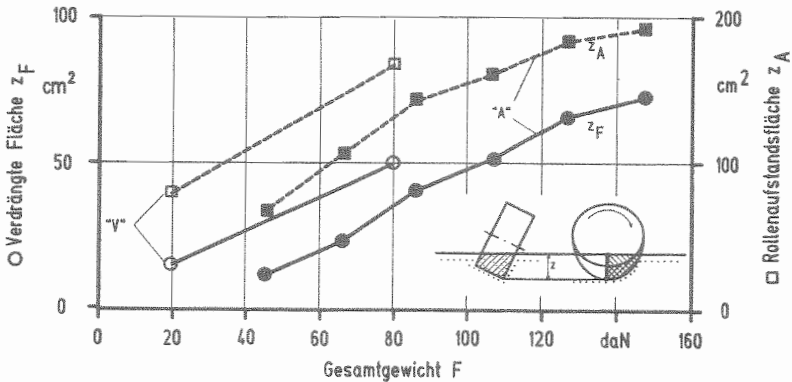


Abbildung 5.3 a, b: Sondendruck (a), verdrängte Fläche und Rollenaufstandsfläche (b) in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht von "A" im Vergleich mit Versuchspflanzmaschine "V"

In beiden Versuchen wird deutlich, daß der gemessene Sondendruck wie auch die Spurtiefe bzw. die daraus berechnete verdrängte Fläche und die Rollenaufstandsfläche für "A" und "L" geringer sind als die über die Regressionsgleichungen aus den Gerätedaten berechneten Werte ("V").

Die Steigungen für P_{Max} und P_{End} für "V" sind bei geringerem Gesamtgewicht ähnlich denen von "A" und "L". Die Unterschiede im y-Achsenabschnitt resultieren daraus, daß die Pflanzmaschinen sich neben den Druckrollen auch über das Schar und den Geräterahmen abstützen. Dadurch werden von den Druckrollen zwischen 20 und 30 daN weniger am Boden abgestützt, wobei die Abweichung mit steigender Zuladung zunimmt. Da die Regressionsgleichungen von "V" für einen Rollenabstand A von 5.0 cm ausgelegt sind, erhöht sich P_{Max} für "A" um 12.5% und verringert sich für "L" um ca. 10 %.

Bezogen auf das Gesamtgewicht verursacht "L" einen sehr viel geringeren maximalen Sondendruck als "A", obwohl das Ausgangsgewicht um 20.5 daN höher liegt. Dieses Verhalten ist auf die unterschiedlichen Druckrollenparameter zurückzuführen, wie über die Regressionsgleichungen zu belegen ist. Bei "L" ist zu beobachten, daß die Kurve für den Enddruck weitgehend mit "V" übereinstimmt. Der mögliche Grund ist das Profil der Druckrollen.

Der degressive Kurvenverlauf für P_{Max} bei "L" ist mit den in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht eindeutig zu klären.

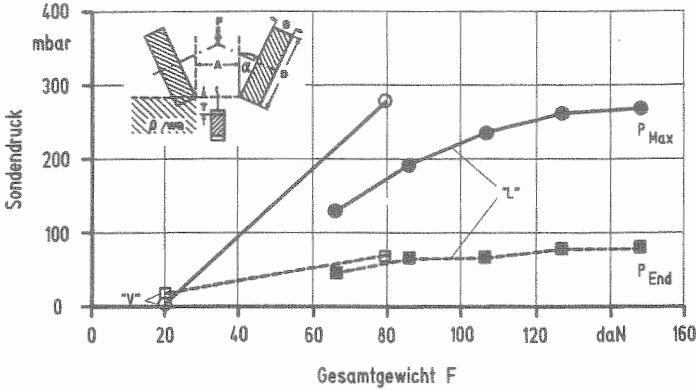
z_F und z_A verhalten sich in weiten Bereichen linear. In diesen Darstellungen konnte die Spurtiefe z als Parameter wegen des Rollenprofils von "L" nicht gewählt werden.

Die Diskrepanz im Verlauf zwischen Sondendruck und Spurtiefe ist unklar. "L" verfügt aufgrund der größeren, breiteren und weniger abgewinkelten Druckrollen über eine größere Rollenaufstandsfläche als "A" bei einer geringeren verdrängten Fläche. Die geringere verdrängte Fläche von "L" wird von der negativen Abwinkelung der Rollenaufstandsfläche ($-\beta$) mit beeinflusst. Die Steigungen der Schätzfunktionen für "V" sind ähnlich "A" und "L", wobei ebenfalls der Schareinfluß zu berücksichtigen ist.

a) VD9L: Gew 66,0 daN $\alpha = 15^\circ$ D = 51,0 cm B = 7,9 cm A = 4,6 cm $\rho = 1,03 \text{ g/cm}^3$ WG = 23,0 %

$$V: P_{\text{Max}} = 126,1 + 4,43 F - 35,72 B - 0,79 D + 7,52 \alpha$$

$$P_{\text{End}} = 79,51 + 0,84 F - 10,26 B - 0,17 D + 0,88 \alpha$$



b) VD9L: Gew 66,0 daN $\alpha = 15^\circ$ D = 51,0 cm B = 7,9 cm A = 4,6 cm $\rho = 1,03 \text{ g/cm}^3$ WG = 23,0 %

$$V: z_F = 16,84 + 0,58 F - 1,85 B - 0,28 D + 0,34 \alpha$$

$$z_A = -9,85 + 1,46 F + 1,66 B + 0,78 D + 0,64 \alpha$$

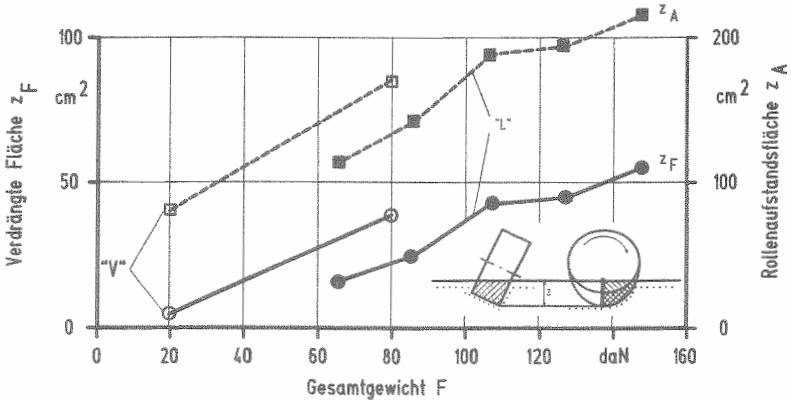


Abbildung 5.4 a, b: Sondendruck (a), verdrängte Fläche und Rollenaufstandsfläche (b) in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht von "L" im Vergleich mit Versuchspflanzmaschine "V"

Schlußfolgernd sind die in den Grundlagenuntersuchungen bestimmten Regressionsgleichungen auf praxisübliche Pflanzmaschinen nur bedingt anzuwenden. Aus der Fülle von Einflußfaktoren, die den Druck am Ballen bestimmen, wurden die durch die Druckrollen verursachten untersucht. Für eine allgemeingültige Aussage gilt es weitere noch unbekannte Parameter zu bestimmen.

Zum ersten wird die Abstützung über das Pflanzschar und über die Aufhängung in der Regressionsgleichung nicht berücksichtigt, zum zweiten fehlen weitere Erkenntnisse über den Einfluß der Laufflächenform und des Rollenabstandes auf die Druckausbreitung und zum dritten ist der Schließvorgang vom Schar-ende bis zu den Druckrollen weitaus komplexer als anfangs angenommen, so daß der Schareinfluß ebenfalls berücksichtigt werden muß.

6. Praxisuntersuchungen zur Beschreibung der Einflüsse von Jungpflanzenanzucht und Pflanzung auf den Anwacherfolg

Im Gemüsebau dient der Vorgang des Verpflanzens dazu, die Pflanze aus dem Anzuchttraum an ihren Endstandort zu bringen, welchen sie bis zur Ernte beibehält. Dabei gelangt die Pflanze in eine neue Umgebung, in der Licht, Temperatur, Verdunstung, Bodenfeuchte und Nährstoffverfügbarkeit vollkommen verschieden von den Ausgangsbedingungen sein können. Ballenlose Pflanzen aus Vermehrungsbeeten, sogenannte Ziehpflanzen, erleiden hierbei relativ große Wurzelverluste. Bei Jungpflanzen in Erdpreßtöpfen oder aus Anzuchtplatten sind die Wurzelverluste stark verringert.

Ideal wäre es, die Pflanze in die neue Umgebung ohne jegliche Störung ihres normalen Wachstums umzusetzen. Doch oft kommt es zu Schwierigkeiten, da es fast unmöglich ist, eine Pflanze ohne den sogenannten Verpflanzschock ins Feld umzubetten. Nach dem Verpflanzen entstehen Turgorverluste, Welkesymptome bis zu Blattnekrosen. Unter extremen Bedingungen kann der Verpflanzschock so groß werden, daß die Pflanze abstirbt. Normalerweise ertragen die Jungpflanzen jedoch einen gewissen Pflanzstreß. Dies variiert jedoch je nach Pflanzenart und Anzuchtverfahren.

Der Verpflanzschock kann die Zeit auf dem Feld bis zur Ernte verzögern. Außerdem ist ein Einfluß auf den Ertrag und die Qualität des Gemüses möglich (Mc. KEE, 1981).

Die Einflußfaktoren, die diesen Verpflanzschock mit beeinflussen, und damit den Anwacherfolg und späteren Kulturerfolg bestimmen, sind in Abbildung 1.1 aufgeführt. Wie sie sich im einzelnen auswirken, wird im anschließenden Kapitel beschrieben.

6.1 Fähigkeit der Pflanze zum Ertragen von Verpflanzstreß

Ganz allgemein besteht die Fähigkeit einer Jungpflanze das Verpflanzen zu überstehen darin, Streßsituationen leicht zu ertragen.

Eine schnelle Erholung nach dem Verpflanzen hängt von der Fähigkeit der Pflanze ab, möglichst schnell wieder Wasser und Nährstoffe durch ein zum

Teil gestörtes Wurzelsystem aufnehmen zu können bzw. neue Wurzeln bilden zu können. Letzteres ist besonders wichtig bei ballenlosen Pflanzen.

In den USA wurden die üblicherweise angebauten Gemüsearten unabhängig vom Anzuchtverfahren in drei Gruppen eingeteilt. Beurteilt wurde ihre Fähigkeit auf das Verpflanzen zu reagieren bzw. es zu überstehen (LOOMIS, 1925, Mc. KEE, 1981).

Gruppe 1: Die Pflanzen sind leicht verpflanzbar. Sie bilden schnell neue Wurzeln aus, bei gleichzeitig langsamem Sproßwachstum (z.B. Rosenkohl, Kopfkohl, Kopfsalat).

Gruppe 2: Die Pflanzen reagieren empfindlicher auf Verpflanzen. Sie besitzen eine geringere Wurzelregenerationsfähigkeit als die Pflanzen der Gruppe 1, haben aber ebenfalls ein langsames Sproßwachstum während der Anwuchsphase (z.B. Blumenkohl, Sellerie, Zwiebel).

Gruppe 3: Diese Pflanzen überleben normale Verpflanzverfahren (ballenlos nicht). Sie verfügen über eine sehr langsame Wurzelneubildung bei gleichzeitig starkem Sproßwachstum (z.B. Gurke, Kürbis).

Die Verwendung von in Erdpreßtöpfen oder in Anzuchtplatten gezogenen Jungpflanzen verringert die Verletzung und den Verlust von Wurzeln, mindert dadurch den Verpflanzstreß und erhöht damit die Überlebenschancen nach dem Verpflanzvorgang.

6.2 Anzuchtverfahren, deren Einfluß auf Anwacherfolg und Ertrag

Eine Auswahl der heute im Gartenbau eingesetzten Anzuchtverfahren und ihre Eigenschaften sind in Abbildung 6.1 zusammengestellt. Die üblichen Substrate sind meist auf Torfbasis. Sie unterscheiden sich damit in ihren physikalischen wie auch chemischen Eigenschaften von den weitgehend mineralischen Ackerböden.

Die Anzucht ballenloser Pflanzen ist nicht mit aufgeführt, da sie nur noch für wenige Kulturen von Bedeutung ist (Porree, Schnittlauch). Aufgrund der starken Wurzelverluste bei der Entnahme sind Ausfälle bei der Pflanzung zu erwarten.






Anzuchtverfahren	Ballenform	I		II		Ballenmaße (mm)	Volumen (cm ³)	Pfl./Kiste Platte (Pfl./40x60cm)	Anzuchtdichte (Pfl./m ²)
		Tiefe	Breite	Tiefe	Breite				
Erdpreßtopf		-	+	30	30		27	216	900
		-	+	40	40		64	126	525
		-	+	50	50		125	77	320
Paperpot		+	-	50	40		38	192	800
		+	-	50	50		55	130	616
		+	-	50	60		90	80	428
Zapfencontainer "Stamp"		-	-	33	24/19		12	240	1000
		-	-	39			35/25	28	140
Zapfencontainer "Veffi"		-	-	48	27/10		16	260	1165
		-	-	48	32/-		25	160	698
umhüllter Container "Cultoplant"		+	+	40	20		13	252	1050
		+	+	50	20		16	252	1050

Abbildung 6.1: Anzuchtverfahren von Ballenpflanzgut (I Substrat mit Umhüllung, II Substrat verdichtet)

Ganz allgemein werden Anzuchtverfahren mit umhüllten Ballen (Paperpot, Cultoplant) von denen mit nicht umhüllten Ballen unterschieden.

Erdpreßtöpfe werden, wie der Name schon sagt, durch Zusammenpressen von Spezialsubstraten auf Torfbasis erzeugt. Die gewünschte Festigkeit der Ballen wird über die Substratmenge beim Preßvorgang geregelt. Ein teilweises Verwurzeln der Ballen untereinander bedingt einen gewissen Wurzelverlust und damit Streß bei der Entnahme.

Bei der Kultur in Anzuchtplatten (Zapfencontainer) wächst dagegen jede Jungpflanze in einem abgeschlossenen Abteil. Das Torfsubstrat ist locker in die Vertiefungen eingefüllt. Der Zusammenhalt des Substrates entsteht erst durch die Vernetzung der Pflanzenwurzeln. Durch sogenanntes "Airpruning", d.h., daß die Anzuchtplatten nicht auf dem Erdboden stehen, sondern auf Gestellen frei in der Luft hängen, wird die Verzweigung der Wurzeln im Ballen und

damit die Ballenstabilität gefördert. Zusätzlich wird ein Durchwurzeln durch das Abzugsloch in den Untergrund verhindert.

Bei den umhüllten Verfahren (Paperpot, Cultoplant) wird die Ballenfestigkeit anfangs nur durch das Umhüllungsmaterial und später ebenfalls durch die Wurzeln bewirkt. Die Anzucht von Cultoplant-Töpfen erfolgt im Einzelstand in Anzuchtplatten.

Für die Verwendung in teilautomatischen Pflanzmaschinen mit Zuführung der Jungpflanzen in den Boden über Fallstufen, eignen sich aufgrund ihrer Ballenmaße und Ballenstabilität am ehesten die umhüllten Verfahren und die in Anzuchtplatten gezogenen Pflanzen.

6.2.1 Anzuchtfläche

Größe und Gestalt der Jungpflanzen zum Pflanztermin werden vom Platzangebot und vom Substratvolumen, welches bei der Anzucht zur Verfügung stehen, beeinflusst. Auf engem Raum entsteht frühzeitiger eine Konkurrenz auf Licht, Wasser und Dünger; die Pflanzen bleiben kleiner. Trotzdem muß berücksichtigt werden, ob und in welchem Maße sich die Jungpflanzengröße auf den Ertrag, die Kulturdauer (Aussaat bis Ernte) und die Zeitspanne zwischen Pflanzung und Ernte auswirkt.

Untersuchungen mit Kopfsalat (MÜLLER u. HARTMANN 1985), Blumenkohl, Kopfkohl und Brokkoli (DUPAULT und WATERS 1985, CSIZINSKY 1983, BIRKENSHAW 1982), Chinakohl (KRATKY 1982), Sellerie (LIU und FÖLSTER 1988) und Tabak (MORRISON 1975) weisen eindeutig nach, daß Substratvolumen und Anzuchtfläche je Pflanze positiv mit der Jungpflanzengröße korrelieren. Ein Einfluß auf den späteren Ertrag konnte bei gleichem Alter der Jungpflanzen nicht nachgewiesen werden. Größere Einheitlichkeit des Erntegutes wurde bei Chinakohl und Salat von WANG et al. (1979) bei der Anzucht in kleinen gegenüber der Anzucht in großen Erdpreßtöpfen beobachtet. Bei Frühsommerblumenkohl fand BIRKENSHAW et al. (1982) weniger schoßende Pflanzen bei kleinen Ausgangspflanzen als bei großen. Größere Ausfälle waren bei MÜLLER und HARTMANN (1985) dadurch zu verzeichnen, daß kleine Jungpflanzen empfindlicher gegen Vogelfraß sind.

COX (1984 a) versuchte ohne Erfolg bei Salat, Lauch, Blumenkohl und Sellerie einen Einfluß der Ballenform bei gleichem Anzuchtsubstratvolumen auf den späteren Ertrag zu belegen.

Bei gleicher Kulturdauer sind damit die ökonomisch günstigeren, platzsparenden Verfahren mit Substratvolumen zwischen 10 und 20 cm³ den weniger günstigen, großvolumigen Verfahren vorzuziehen. Es ist zu berücksichtigen, daß eine geringere Wasser- und Düngerspeicherkapazität bei der Anzucht höhere kulturtechnische Fähigkeiten voraussetzt. Außerdem sind nach dem Auspflanzen weniger Reserven im Ballen verfügbar, worauf sich die Pflanz- und Kulturtechnik einstellen muß.

6.2.2 Einfluß des Verpflanzalters auf Kulturdauer und Ertrag

Fast alle Gemüsearten können im frühen Sämlingsstadium ohne Verpflanzschock verpflanzt werden (LOOMIS 1925, Mc. KEE 1981). Je später dieser Verpflanzschock in der Entwicklung einer Pflanze auftritt, desto stärker wird sie in ihrem normalen Wachstum gestört (Mc. KEE 1981) und desto gravierender kann sich dieser Einfluß auf die Pflanze auswirken.

Der Einfluß des Verpflanzalters auf die Kulturdauer muß bei allen Versuchsergebnissen relativiert werden. Und zwar ob die Gesamtkulturdauer, bestehend aus Anzuchtdauer und Zeit auf dem Feld, oder nur die Periode zwischen Verpflanztermin und Ernte, möglichst kurz sein soll.

Daß die Gesamtkulturzeit direkt von der Anzuchtdauer abhängig ist, wurde von WANG et al. (1979) bei Kopfkohl und Chinakohl nachgewiesen. SMITH (1986) kam bei Kopfkohl zum entsprechenden Ergebnis. Die Erntereife wird bei kurzer Anzuchtdauer mit jungen Pflanzen früher erreicht als mit älteren, fand BOA et al. bei Salat (1979). Ein Verpflanzalter von vier Wochen bei Kopfkohl (SMITH 1986) und Chinakohl vier Wochen bzw. sechs Wochen bei Kopfsalat (WANG et al. 1979) und drei Wochen bei Blumenkohl (OTT 1980) erbrachte die geringste Gesamtkulturzeit.

Aufgrund der geringen Pflanzenmassenzunahme während der Anzucht zeigte sich, daß eine drei Wochen längere Anzucht die Zeit zwischen Pflanzung und Ernte

nur um drei bis fünf Tage verkürzt (SMITH, 1986). Soweit kein überständiges Pflanzenmaterial eingesetzt wird, führt eine längere Anzuchtdauer zu kürzeren Feldtagen.

Bei Blumenkohl und Kopfkohl wurde von SMITH (1986) und OTT (1980) die Tendenz beobachtet, daß ein höherer Ertrag mit jüngerem Verpflanzalter zu erzielen ist. Insgesamt ist Blumenkohl schwierig zu erfassen. Eine zu frühzeitige Induktion der generativen Phase während der Anzucht kann zu ungenügend ausgebildeten bzw. zu schießenden Köpfen führen (BIRKENSHAW 1982, OTT 1980).

Hieraus folgernd können im Sommer kleine Jungpflanzen gepflanzt werden, die weniger Pflanzstreß erleiden und in Frühzeitigkeit und Ertrag keine Nachteile, möglicherweise sogar Vorteile bringen. Für eine Pflanzung im Frühjahr, wo die Frühzeitigkeit der Ernte im Vordergrund steht, sind große, ältere Jungpflanzen im Vorteil.

6.3 Empfindlichkeit von Blatt und Wurzel

Wie oben beschrieben, führt das Verpflanzen zu einer Störung des Wachstums. Dieser Verpflanzschock ist um so größer, je mehr Wurzel- bzw. Blattverlust auftreten.

Untersuchungen über den Einfluß von Einkürzungen von Sproß und Wurzel auf das Wachstum von Sellerie wurden von ZINK (1964) durchgeführt. Jeder Rückschnitt, ob von Wurzel oder von Blatt, verringert das Wachstum proportional der Menge, die bei der Pflanze entfernt wird.

Entsprechende Erfahrungen gewann SABOTA (1981) bei Zwiebeln. Ein Rückschnitt des Laubes vor der Pflanzung reduzierte den Ertrag um 29 %.

6.4 Einfluß des Pflanzvorganges auf den Anwacherfolg

Neben der Bedeutung der Jungpflanze bzw. des Jungpflanzenanzuchtverfahrens für den Anwachs- und Kulturerfolg, üben Pflanzeneinbettung und Bodenzustand,

aber auch Umwelt und Kulturführung, entscheidenden Einfluß auf den Anwachs-
erfolg aus (Abb. 1.2). Die einzelnen Bereiche sind nicht eindeutig vonein-
ander abzugrenzen bzw. zu behandeln, sondern sind vielmehr oft eng miteinan-
der vernetzt.

6.4.1 Pflanzeneinbettung und Bodenvorbereitung

Bei der Pflanzeneinbettung ist darauf zu achten, daß die Jungpflanze mit
ihrem Ballen möglichst ohne Belastung senkrecht in der richtigen Tiefe im
Boden abgelegt wird. Anschließend sollte der Ballen ausreichend mit Boden
bedeckt und angeedrückt werden.

Die Anforderungen an das Pflanzbett sind den Anforderungen an ein optimales
Saatbett vergleichbar (ESTLER 1984). Die Bearbeitungstiefe entspricht in
etwa der Pflanztiefe. Ein verdichteter Boden hemmt das Wurzelwachstum.
TAYLOR und RATCLIFF (1969) konnte den Nachweis führen, daß eine direkte Be-
ziehung zwischen dem im Boden abgelesenen Penetrometerwert und dem Wurzel-
wachstum besteht.

Die Exaktheit der Pflanzbettvorbereitung hat sich nach dem Anzuchtverfahren
zu richten. Je kleiner die Ballen sind, um so größer ist die Anforderung an
die Bodenvorbereitung. Ein Ballen mit 2 cm Durchmesser und 3 cm Tiefe kann
schlecht von Bodenaggregaten derselben Partikelgröße gleichmäßig umschlossen
werden. Das Ergebnis wäre ein schlechter Kontakt zwischen Boden und Ballen.
Der Ballen und der ihn umgebende Oberboden trocknet schneller aus. Zusätz-
lich ist die Wurzeldurchdringung des Bodens durch das Vorhandensein einer
trockenen Luftschicht an den Stellen, wo kein Kontakt zwischen Ballen und
Boden vorliegt, behindert (YONTS et al. 1984).

Die Pflanztiefe ist so zu wählen, daß die Ballen mit Erde abgedeckt sind, um
eine erhöhte Verdunstung durch das Substrat (Dochteffekt) zu verhindern. Zu
tiefe Pflanzung kann bei empfindlichen Kulturen (Kopfsalat) zu einem erhöh-
ten Ausfallrisiko führen. Zusätzlich ändert sich der Habitus von Kopfsalat-
pflanzen bei zu tiefer Pflanzung. Tief gepflanzte Köpfe sind dichter und
konischer gewachsen. Als Grund wird von MARVEL und HAVIS (1952) der Boden-

druck des umgebenden Bodens angegeben. Abhilfe kann eine Pflanzung auf einen kleinen Damm verschaffen.

Bei Kopfkohl ergibt eine Tiefpflanzung einen höheren Ertrag als eine flache Pflanzung (PORTUGAL 1984, MILLER et al. 1969). Gleichmäßiger dagegen werden die Köpfe bei flacher bis mitteltiefer Pflanzung (MILLER et al. 1969).

6.4.2 Boden- und Substratwasser

Nach dem Verpflanzen stellt der Ballen ein Speicherorgan für Wasser und Dünger über eine gewisse Zeit dar. Größere Ballen können mehr Wasser speichern als kleinere. Somit können Jungpflanzen in zur Blattmasse relativ großen Anzuchtgefäßen eine längere Zeit ohne Bewässerung nach der Pflanzung auf dem Feld überleben.

Wie schon beschrieben, reagieren Pflanzen unterschiedlich auf das Verpflanzen. So reagieren verschiedene Pflanzenarten auch unterschiedlich auf Trockenstreß. Kopfsalat reagiert viel empfindlicher als Kopfkohl oder Tomaten (LOOMIS 1925). Auch reagieren kompakte Jungpflanzen weniger empfindlich auf Trockenstreß als vergeilte. Eine Abhärtung vor dem Pflanzen wirkt sich vorteilhaft aus.

KRATKY, COX und Mc. KEE (1980) untersuchten die Beziehung Ballenwassergehalt und Bodenwassergehalt und fanden bei Blumenkohl, daß der Wassergehalt des Substratballens größeren Einfluß auf das Wachstum hat als der Wassergehalt des umgebenden Bodens. Die Pflanzen erlitten weniger Streß mit nassem Ballen als mit trockenem Ballen bei einer Pflanzung in nassen Boden. Die Wurzellänge der neugebildeten Wurzeln war nicht vom Bodenwassergehalt, aber vom Ballenwassergehalt abhängig. Durch eine direkt auf die Pflanzung folgende Bewässerung konnte bei Salat und Lauch ein gleicher Ertrag bei trockenem wie auch bei nassem Ballen erzielt werden (COX 1984 b). Ganz ohne Bewässerung war der Ertrag eindeutig geringer, wobei die hauptsächliche Einbuße durch Ausfälle bald nach der Pflanzung zu verzeichnen war.

Ähnliche Ergebnisse fand COX (1984 c) bei Versuchen mit Kopfsalat in Töpfen. Eine Jungpflanze mit einem Ballen, der durch punktuelltes Bewässern von oben

nach der Pflanzung feucht gehalten wurde, reagierte eindeutig positiv gegenüber einer Jungpflanze, die nur von unten bewässert wurde.

Der Grund dafür, daß ein feuchter Ballen den Anwachserfolg erhöht, ist mit Hilfe der Wasserbindungseigenschaften von Torfsubstraten bzw. des umgebenden, meist mineralischen Bodens zu begründen.

Die maximale Wasserspeicherkapazität von Torfsubstraten liegt je nach dem Gehalt an Weißtorf bei über 60 Vol.-% (Abb. 6.2). 25 % des gebundenen Wassers sind leicht verfügbar zwischen PF 1 bis 1.7. 15 % liegen als Pufferwasser vor bei PF 1.7 bis 2., 15 Vol.-% sind schwerer verfügbar mit einem PF-Wert über 2. Circa 5 Vol.-% des gebundenen Wassers sind nicht verfügbar (de BOODT und VERDONCK 1972, BUNT 1976, GUTSER 1984, PUUSTJÄRVI 1974).

Die Feldkapazität durchschnittlicher landwirtschaftlich genutzter Böden liegt zwischen PF 1,7 und 4,2 (MOSER 1984, SCHEFFER et al. 1979).

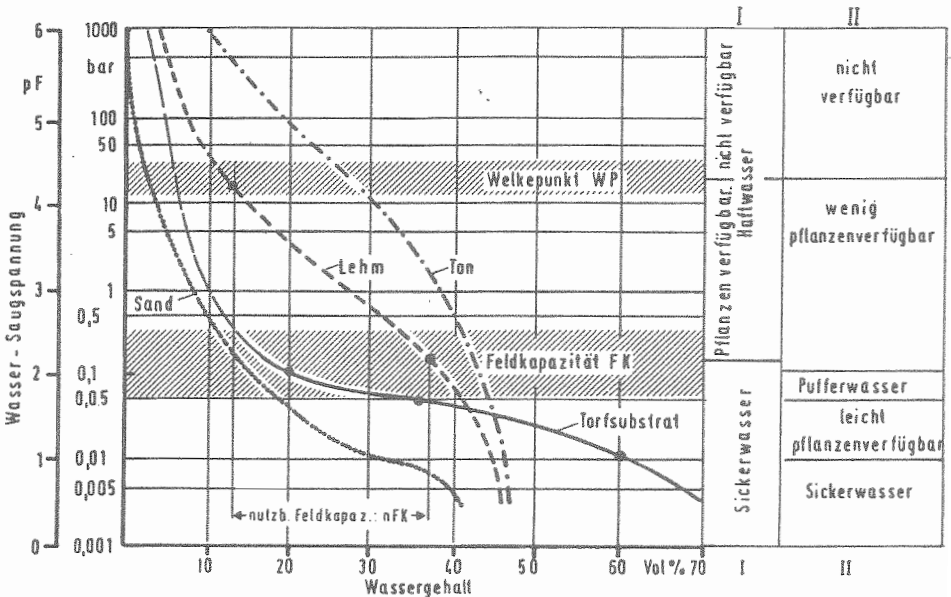


Abbildung 6.2: Verfügbarkeit von Wasser in Freilandböden (I) im Vergleich mit Torfsubstraten (II). (nach de BOODT u. VERDONCK 1972, MOSER 1984, SCHEFFER et al. 1979)

Sie beginnt damit dort, wo dem Torfsubstrat schon 25 Vol.-% des gebundenen Wassers entzogen sind. Zusätzlich muß ein für die teilautomatische Pflanzung geeigneter Boden oberflächlich leicht abgetrocknet sein und liegt damit etwa im Bereich von 70 % Versorgungskapazität. Dies entspricht einem PF-Wert von 2.0 bis 2.5. Dem Torfsubstrat verbleiben bei dieser Wasserspannung weniger als 15 Vol.-% an Wasser.

Da sich Wasser in der flüssigen Phase im Boden aufgrund des hydraulischen Potentialgradienten (HANKS u. ASHCROFT 1980) in Richtung der höheren Saugspannung bewegt, kommt es nach der Pflanzung zu einer Wasserbewegung aus dem nassen Wurzelballen in Richtung Boden. Der Wassertransport aus dem Ballen findet so lange statt, bis ein Gleichgewicht in der Saugspannung zwischen Ballen und Boden besteht. Es bildet sich eine "Feuchtezwiebel" aus, die sich je nach Bodenart und Bodenfeuchte, d.h. nach der jeweiligen Wasserleitfähigkeit des Bodens, schneller oder langsamer ausdehnt (BRÜCKNER 1987).

Das Ballensubstrat, in welchem über 50 % des Wassers nur schwach gebunden ist, trocknet damit relativ stark aus. Gepflanzte Jungpflanzen benötigen daher mehr Wasser als ungepflanzte, denn zum üblichen Wasserverbrauch über Evapotranspiration kommt die Abgabe an den Boden (COSTELLO u. PAUL 1975).

6.4.3 Umwelteinflüsse

Die Umweltbedingungen können im Freiland nur bedingt verändert werden. Eine Verfrühung ist durch Abdecken mit Vlies oder Folie möglich.

An heißen Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung und geringer Luftfeuchte empfiehlt es sich, die Pflanzung am frühen Morgen oder abends durchzuführen, um den Verpflanzungsstreß möglichst gering zu halten.

Schlechtwetterperioden können durch Zwischenlagerung im Kühlraum überbrückt werden (MAFF 1985).

7. Untersuchung der Belastungsempfindlichkeit von Jungpflanzen mit klein- volumigem Substratballen

Teilmechanische Pflanzverfahren verlangen Jungpflanzen mit haltbaren Substratballen, die den Pflanzvorgang ohne großen Verpflanzschock überstehen.

Auf dem Weg aus dem Anzuchtgefäß bis in den Boden sind die Jungpflanzen unterschiedlichen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Diese treten bei der Entnahme aus der Anzuchtplatte durch Zugkräfte an den Blättern auf und bei der Bevorratung in der Handfläche durch Druck, Scherung und Quetschung. Weiterhin können sie bei der Übergabe an das Magazin oder die Pflanzgreifer, bei der Ablage in die Furche über Greifer oder beim freien Fall und abschließend bei der Einbettung, unterstützt durch die Druckrollen, entstehen. Verletzungen an Wurzeln und Blättern, Substrat- und Wasserverlust sind dadurch zu erwarten.

Trotz der hohen Belastung der Jungpflanzen durch den Pflanzprozeß mit Pflanzmaschinen liegen bisher keine Untersuchungen über die Empfindlichkeit der Pflanze, insbesondere des Wurzelballens, vor.

7.1 Dynamische und statische Druckbelastung

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Wurzelballen bei der Handhabung zerfallen oder zerplatzen, wie sie sich bei der Pflanzung verhalten und wie sie auf den seitlich auftreffenden Druck bei der Einbettung durch Druckrollen reagieren, wurde der Widerstand von Substratballen bei seitlich auftreffendem statischen Druck bestimmt. Dieses starke seitliche Zusammenpressen der Wurzelballen ist in der Praxis besonders auf dichten Böden zu beobachten.

Eine dynamische Belastung der Jungpflanzenballen durch Schlag tritt bei teilmechanischen Pflanzmaschinen bei der Übergabe der Pflanzen aus dem Magazin in die geöffnete Furche durch freien Fall auf. Empfindliche Ballen (Erdpreßtöpfe) reagieren mit Substrat- und Wurzelverlust, was den Verpflanzschock vergrößert. Hierzu wurden Untersuchungen an Wurzelballen durchgeführt, die nach Durchqueren einer Fallstrecke auf eine Holzplatte auftreffen. Der Grad der Ballenverformung und der Substratverlust wurden erfaßt.

7.2 Jungpflanzenanzucht

Die Untersuchungen wurden bis auf einen Vergleichsversuch bei statischer Druckbelastung mit rundkonischen Zapfencontainern ("St") mit 12 cm³ Volumen durchgeführt (Abb. 6.1). Die Gründe für die Auswahl dieses Verfahrens sind die fast zylindrische Ballenform, die einen Vergleich mit den Drucksonden zuläßt, keine Umhüllung, um ein selbsttätiges Befüllen zu ermöglichen und das geringe Ballenvolumen. Weiterhin zeichnet sich dieses Verfahren durch stabile Anzuchtpaletten aus, die Vorteile bei der Handhabung bieten. Zum Vergleich der Verfahren wurden in zwei Versuchen die Jungpflanzen in umgekehrt pyramidenförmigen Zapfencontainern ("Ve") mit 16 cm³ Ballenvolumen und in umhüllten Containern ("Cu") mit einer Tiefe von 4 cm und einem Volumen von 13 cm³ untersucht (siehe Abb. 6.1).

Als Anzuchtsubstrate wurden Torfkultursubstrat (TKS), TKS/Sand-Gemisch im Verhältnis 1 : 10 und Einheitserde (Ehe) eingesetzt.

Die untersuchten Jungpflanzen waren Kopfsalat der Sorte "Cindy" von der Firma NICKERSON-ZWAAN und Weißkohl der Sorte "Golden Cross, F 1" von der Firma AGRISAAT.

Die Jungpflanzen wurden im Winter im Gewächshaus und im Sommer in einem ungeheizten, seitlich offenen Folienhaus angezogen. Um eine Belüftung der Anzuchtplatten von unten zu gewährleisten ("Airpruning"), standen sie auf nach unten offenen Tischgestellen. Die Bewässerung über Sprühdüsen war über eine Zeitschaltuhr gesteuert. Mit jeder Bewässerung wurde automatisch gedüngt (0,1 % Flory 2). Die Bewässerungsdauer war so geschaltet, daß immer maximale Feldkapazität im Substrat erzielt wurde.

Die Anzuchtdauer betrug je nach Jahreszeit längstens 5 Wochen.

7.3 Druckbelastung der Wurzelballen

Zur Bestimmung der statischen Druckbelastung der Wurzelballen wurden Anzuchtverfahren, Substrat, Substratdichte, Durchwurzelungsgrad und Substratwassergehalt variiert.

7.3.1 Material und Methode der statischen Druckbelastung

Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 7.1 a schematisch dargestellt. Der Druckstempel verdichtet den Ballen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 cm pro Minute aus 2,15 cm mittlerem Durchmesser auf einen definierten Endabstand a von 0,8 cm. Mit steigender Verdichtung wird die wegabhängige Druckkraft größer. Mit dem Erreichen der Wassersättigung aufgrund der Volumenverringerung wird Wasser aus den Grobporen ausgepreßt, welches beim normalen Pflanzvorgang vom umgebenden Boden aufgenommen würde.

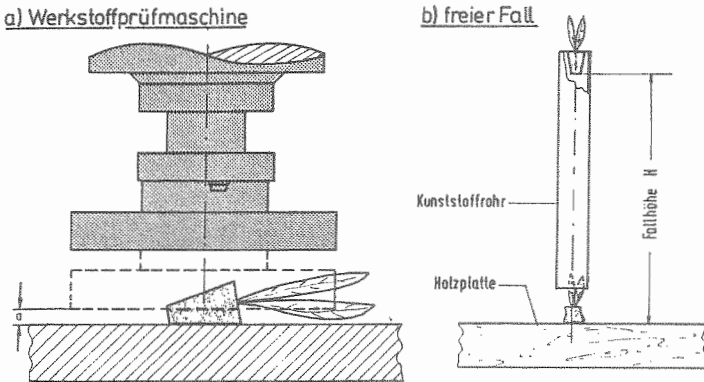


Abbildung 7.1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der statischen (a) und dynamischen (b) Druckempfindlichkeit

Der Endabstand von 8 mm war in Vorversuchen bestimmt worden. Bei der Druckuntersuchung in der Bodenrinne liegt der maximal erreichte hydrostatische Druck bei 0,5 bar, was einem Flächendruck von 5 N/cm^2 entspricht. Bei einer berechneten Querschnittsfläche von $7,1 \text{ cm}^2$ des Anzuchtverfahrens "St" ergibt sich ein durchschnittlicher Flächendruck von $35,5 \text{ N}$. Dieser Druck wurde in Vorversuchen bei einem Endabstand a von 8 mm zwischen Druckstempel und Druckplatte ermittelt.

Zum Versuch wurden die Jungpflanzen aus verschiedenen Anzuchtplatten willkürlich entnommen. Anschließend erfolgte der Verdichtungsprozess. Der Druckanstieg wurde kontinuierlich aufgezeichnet. Von jeder gepreßten Jungpflanze wurde Pflanzenfrischgewicht und Ballenfrischgewicht, Ballentrocken-

gewicht und je nach Versuchsziel die Ballenabmessungen vor und nach dem Preßvorgang mit der Meßlehre erfaßt. Ein Wurzelballen wird als um so stabiler eingestuft, je höher die benötigte Druckkraft zum Erreichen des Endabstandes ist.

7.3.2 Versuchsergebnisse

Die Wurzelballen der Jungpflanzen bewiesen bei der Durchführung der Versuche zur statischen Belastungsempfindlichkeit eine vorher nicht erwartete Stabilität und Festigkeit. Weder größerer Substratverlust noch sichtbare Wurzelverletzungen konnten festgestellt werden.

7.3.2.1 Substratdichte

In Abbildung 7.2 wird an Hand von 8 Regressionsgleichungen demonstriert, daß die benötigte Druckkraft F_B (y - Achse) bei zunehmender Ballentrockendichte ρ_B steigt. Hier handelt es sich um Kopfsalat- und Kopfkohljungpflanzen aus unterschiedlichen Anzuchtverfahren und mit unterschiedlichen Substraten

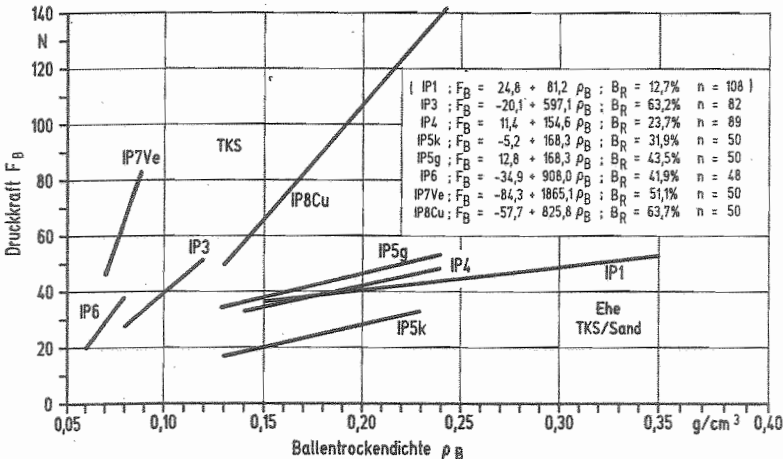


Abbildung 7.2: Einfluß der Ballentrockendichte auf die Verformungsdruckkraft

(siehe Tab. 7.1). Trotz der verfahrensgleichen Befüllung der Anzuchtplatten mit Substrat liegt jeweils eine erhebliche Spannweite der Ballentrockendichte vor. Es zeigt sich, daß der Anstieg der Ballentrockendichte mit einem Bestimmtheitsmaß von 12.7 % bis 63.7 % die Druckkraftzunahme erklärt. Die verbleibende Reststreuung für IP1 ($B_R = 12.7\%$) ist sehr hoch. 87 % sind auf unerfaßte Einflußgrößen zurückzuführen.

Die Regressionsgleichungen für Ballen aus reinen Torfsubstraten ohne Zuschlagsstoffe besitzen eine größere Steigung und liegen in ihren Bestimmtheitsmaßen höher als die Regressionen für Wurzelballen aus Torfmischsubstraten.

Ein dichter Ballen ist bei unverändertem Substrat mit gleichem Kraftaufwand weniger stark zu verformen als ein lockerer Ballen.

Tabelle 7.1: Druckkraft F_B bei den Anzuchtssystemen "St", "Cu", und "Ve", in Abhängigkeit von der Art des Substrates, der Substratdichte und dem Jungpflanzenfrischgewicht.

Kultur		Kopfsalat			Kopfkohl		Kopfsalat		
Versuch		IP1	IP3	IP4	IP5k	IP5g	IP6	IP7Ve	IP8Cu
Anzuchtsys.		"St"	"St"	"St"	"St"	"St"	"St"	"Ve"	"Cu"
Substrat		Ehe	TKS	Ehe	T/S	T/S	TKS	TKS	TKS
n		108	82	89	50	50	48	50	50
ρ_B	(g/cm ³)	0.21	0.10	0.19	0.17	0.16	0.07	0.07	0.18
	S	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.004	0.004	0.03
Jp	(g)	1.36	1.44	1.04	1.50	2.34	1.05	1.05	1.25
	S	0.38	0.32	0.21	0.17	0.17	0.15	0.24	0.22
F_B	(N)	42.6	37.9	41.4	24.1	40.3	27.1	53.8	94.6
	S	6.1	5.9	6.6	5.7	6.1	6.0	10.5	26.3
	(.01)	b*	b	b	a	b	a	c	d

* SCHEFFE ($\alpha_1 = 0.01$)

7.3.2.2 Jungpflanzenfrischgewicht

Einen ähnlich starken Einfluß auf die zur Verdichtung benötigte Druckkraft hat die Durchwurzelung des Ballens, bestimmt über das Jungpflanzenfrischgewicht. Es wurde zugrunde gelegt, daß bei gleichen Ausgangsbedingungen eine positive Korrelation zwischen Pflanzenfrischgewicht und Wurzelmasse besteht (KUPERS 1978). Die Annahme wurde durch eigene Beobachtungen bestätigt.

Der Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes auf die benötigte Druckkraft ist in Abbildung 7.3 für dieselben Versuche aus Tabelle 7.1 aufgetragen. Es besteht eine positive Korrelation zwischen Durchwurzelungsgrad und Verdichtungsempfindlichkeit. Die hierzu aufgetragenen Bestimmtheitsmaße zwischen 8.2 % und 45.2 % lassen erkennen, daß diese Aussage weniger stark gesichert ist als die Abhängigkeit von der Ballentrockendichte.

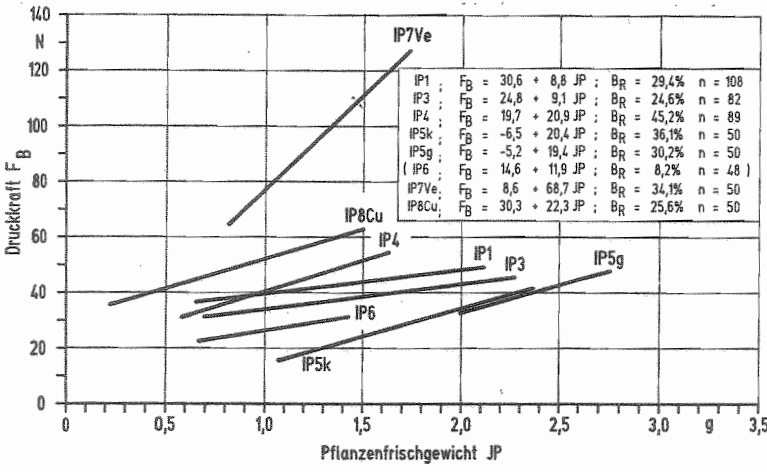


Abbildung 7.3: Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes auf die Verformungsdruckkraft

In Abbildung 7.6 b ist der Einfluß des Jungpflanzengewichtes auf die benötigte Druckkraft in Form eines Histogrammes aufgetragen. Es handelt sich hier um Kohlpflanzen, die im Abstand von 14 Tagen untersucht wurden. Die schwach durchwurzelten Ballen (Jungpflanzengewicht = 1,50 g) zeigen eine hochsignifikant geringere benötigte Druckkraft zum Verdichten auf 8 mm

Endabstand, als die besser durchwurzelten Ballen (Jungpflanzenfrischgewicht = 2.34 g) (siehe auch Tab. 7.1).

Wegen der besseren Vernetzung des Ballens durch die Wurzeln größerer Jungpflanzen ist die Ballenfestigkeit erhöht.

7.3.2.3 Jungpflanzenfrischgewicht und Substratdichte

Der gemeinsame Einfluß von Jungpflanzenfrischgewicht und Substratdichte auf die benötigte Druckkraft wurde mit Hilfe der zweifaktoriellen Regressionsanalyse untersucht.

Die graphische Auswertung der Regressionsfunktionen ist in den Abbildungen 7.4 und 7.5 dargestellt. Der gepunktete Bereich stellt den durch Meßwerte abgesicherten Gültigkeitsbereich dar.

Gleichung 37 (Abb. 7.4) gilt für Kopfsalat in TKS; Gleichung 38 ebenfalls für Kopfsalat aber in Einheitserde (Abb. 7.5). Die durchschnittliche Dichte von TKS beträgt 0.1 g/cm^3 ; von Einheitserde 0.2 g/cm^3 . Das durchschnittliche Jungpflanzenfrischgewicht ist für IP3 1.44 g (Abb. 7.4); bei IP4 sind die Pflanzen deutlich kleiner mit 1.04 g Frischgewicht (Abb. 7.5).

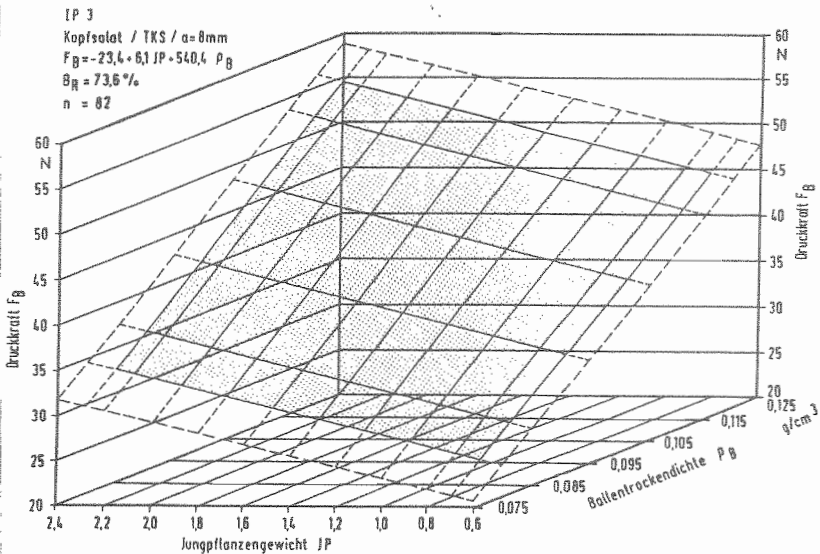


Abbildung 7.4: Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes und der Ballentrockendichte (TKS) auf die Verformungsdruckkraft

Die Regressionsgleichungen sind im folgenden aufgetragen:

IP3

$$F_B = - 23.4 + 6.1 JP + 540.4 \rho_B \quad n = 82 \quad B_R = 73.6 \% \quad (37)$$

IP4

$$F_B = - 6.56 + 20.0 JP + 140.5 \rho_B \quad n = 89 \quad B_R = 64.7 \% \quad (38)$$

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 73.6 bzw. 64.7 % kann über die Ballendichte und das Jungpflanzenfrischgewicht die zur Verdichtung benötigte Druckkraft erklärt werden. Eine gegenseitige Abhängigkeit der Einflußfaktoren Dichte und Jungpflanzenfrischgewicht ist in diesem Wertebereich nicht zu beobachten.

Substratdichte und Ballendurchwurzelung korrelieren positiv mit der zur Ballenverdichtung benötigten Druckkraft.

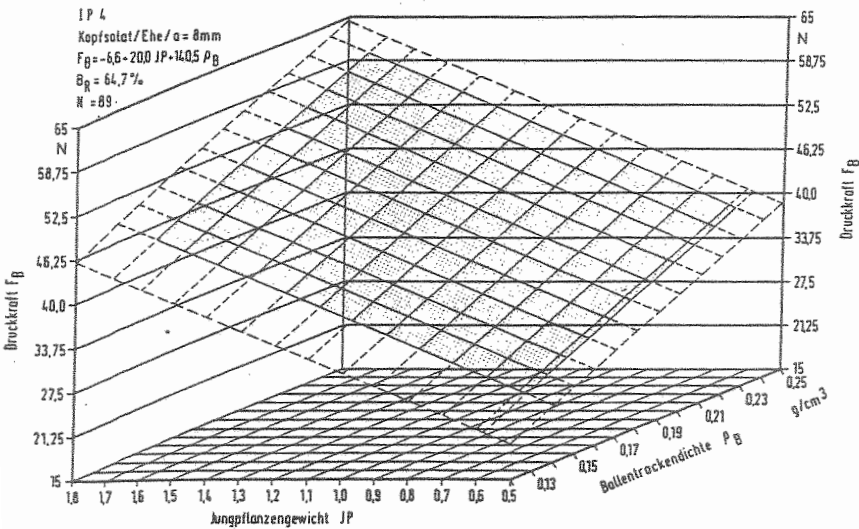


Abbildung 7.5: Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes und der Ballentrockendichte (Ehe) auf die Verformungsdruckkraft

7.3.2.4 Substratwassergehalt

Es ist zu erwarten, daß der Substratwassergehalt WG die Verdichtbarkeit der Wurzelballen entsprechend gewachsenen Böden (BOLLING 1987) beeinflusst. Hierzu wurde der Wassergehalt in dem für die Jungpflanzen vertretbaren Bereich verändert. Ein Teil der Pflanzen wurde auf maximale Feldkapazität bewässert, der andere Teil wurde für 24 Stunden trocken gehalten.

Abbildung 7.6 a gibt das Ergebnis dieser Untersuchung wieder. Weder für TKS noch für Ehe liegt ein signifikanter Unterschied in der Druckkraft vor. In der Tendenz sind feuchte Ballen verdichtungsempfindlicher als trockene. Der Einfluß ist jedoch vergleichsweise gering.

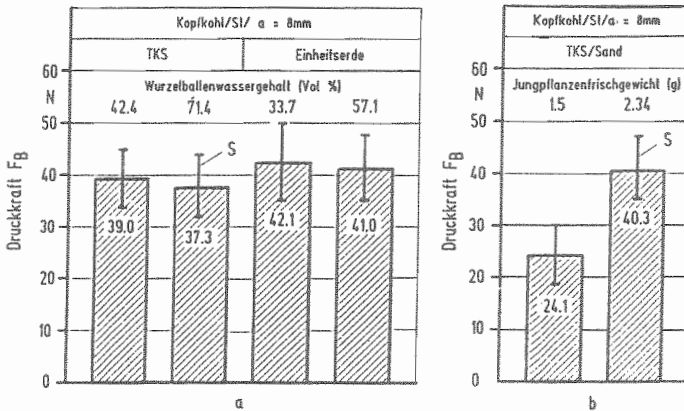


Abbildung 7.6: Einfluß des Ballenwasserhautes (a) und des Jungpflanzenfrischgewichtes (b) auf die Verformungsdruckkraft

Für IP3 (TKS) ist der Einfluß des Substratwassergehaltes regressionsanalytisch zu belegen. Gegenüber Gleichung 37 steigt das Bestimmtheitsmaß auf $B_R = 77.1\%$. Für IP4 bei Ehe besteht keine direkte Beziehung.

IP3

n = 82

$$F_B = - 17.8 - 0.7 WG + 5.8 JP + 532.0 \rho_B \quad B_R = 77.1\% \quad (39)$$

Für den Einsatz in der Praxis ist diese Versuchsfrage unrelevant, da es für einen optimalen Pflanzeerfolg, wie schon beschrieben, ausschlaggebend ist,

daß die Ballen maximal mit Wasser bzw. besser mit Düngerlösung gesättigt sind. Außerdem sind für die sichere Funktionsweise von Pflanzmaschinen mit Pflanzeneingabe durch freien Fallen schwerere und damit nasse Wurzelballen von Vorteil.

Im für die Pflanze vertretbaren Feuchtigkeitsbereich ist kein Einfluß des Substratwassergehalts auf die Ballenfestigkeit zu erkennen.

7.3.2.5 Art des Substrates

Der Einfluß des Anzuchtsubstrates, dessen spezifisches Gewicht (Dichte) und des jeweiligen Anzuchtverfahren ist mit den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen nicht vollständig zu klären.

In Tabelle 7.1 sind die untersuchten Substrate mit der jeweiligen Dichte aufgetragen. Je nach Substratzusammensetzung und Vorverdichtung ("Cu") unterscheidet sich das spezifische Gewicht.

In Abbildung 7.7 ist die Druckkraft in Abhängigkeit von den verschiedenen Anzuchtsubstraten, getrennt nach zwei Jungpflanzengrößen von Kopfsalat, aufgetragen. Aufgrund des Tonanteils in Einheitserde ist die Trockendichte mehr als doppelt so hoch als die von TKS. TKS (b) läßt sich bei kleinen, schlecht durchwurzelten Ballen signifikant leichter verdichten als Einheitserde (a).

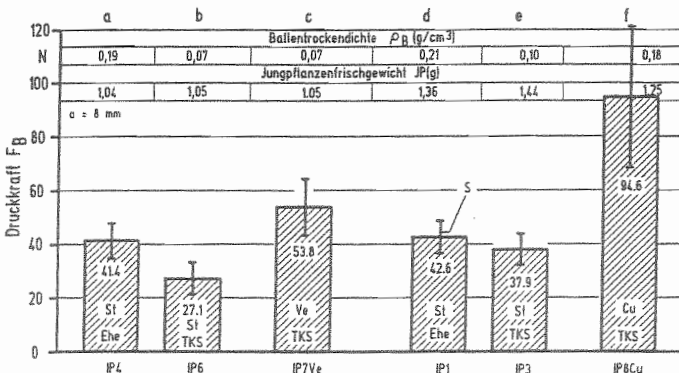


Abbildung 7.7: Einfluß des Jungpflanzenfrischgewichtes, des Substrates und des Anzuchtverfahrens auf die Verformungsdruckkraft

Der Vergleich von "Ve" (c) mit "St" (b) ist nur bedingt zulässig, da unterschiedliche Ballenmaße und Volumina vorliegen.

Für kräftigere Salatjungpflanzen ist zwischen locker gefülltem Torfsubstrat (d) und Einheitserde (e) kein signifikanter Unterschied in der Druckkraft vorhanden. Dagegen verursachen die Ballen des Anzuchtverfahrens "Cu", dessen Ballen verdichtet und zusätzlich umhüllt sind, eine hochsignifikant höhere Druckkraft als "St" bei fast entsprechendem Ballenvolumen.

Die Dichte unterschiedlicher Substrate läßt keine Aussage über die Empfindlichkeit von Jungpflanzenballen auf statische Belastung zu. Vorverdichtete bzw. umhüllte Substratballen sind unempfindlicher gegenüber Druckkräften. Bei gleicher Druckkraft werden diese Ballen weniger stark verdichtet.

7.3.2.6 Rückstellverhalten nach Druckbeaufschlagung

Die Druckbeaufschlagung der Ballen führt zu einer elastischen und plastischen Verdichtung. Nach kurzfristigem Preßvorgang verformen sich die Ballen wieder rück, wobei die Ausgangsform in keinem Fall erreicht wird. Ein Ballen ohne Zusammenhalt im Substrat würde mehr oder weniger stark zerfließen oder zerbrechen.

In Abbildung 7.8 a und b sind 6 Versuche mit dem Anzuchtverfahren "St" dargestellt. Aufgetragen ist die Ballendicke h_n bzw. Ballenbreite b_n nach der kurzzeitigen Verdichtung auf einen Endabstand $a = 8$ mm im Verhältnis zum mittleren Ausgangsdurchmesser von 21.5 mm. Es werden Kopfsalat mit unterschiedlichen Anzuchtsubstraten (a), und Kopfkohljungpflanzen mit verschiedener Größe untersucht (b).

Einheitserde zeigt ein signifikant stärkeres Fließverhalten bzw. geringeres Rückstellverhalten als TKS (Abb. 7.8, a).

TKS läßt sich, wie die vorherigen Versuche zeigen, relativ leicht verdichten, besitzt aber gleichzeitig ein starkes Rückstellverhalten bei guter Durchwurzelung. Eindeutige Aussagen bezüglich der Substratwahl sind jedoch nicht möglich.

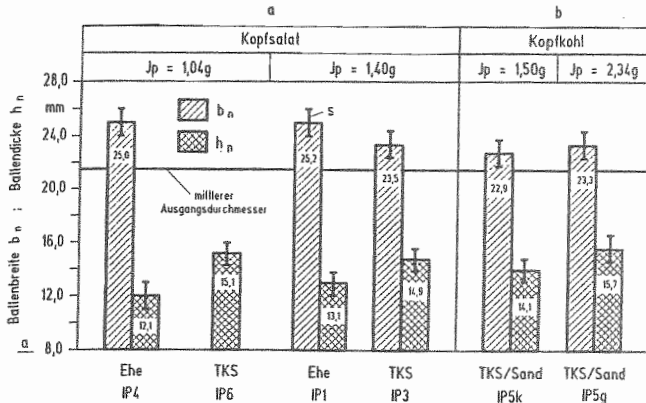


Abbildung 7.8 a, b: Rückstellverhalten des Wurzelballens in Abhängigkeit von Substrat, Jungpflanzenfrischgewicht und Pflanzenart

Die Durchwurzelung wirkt sich im Rückstellverhalten der Ballen positiv aus (Abb. 7.8 b). Gut durchwurzelte Ballen zeigten in der Tendenz eine höhere Rückstellung als schlecht durchwurzelte Ballen. Hier handelt es sich um Kopfkohljungpflanzen in TKS-Sandgemisch, die im Abstand von zwei Wochen untersucht wurden. Eine Auswertung mit Hilfe von Regressionsanalysen blieb ohne Erfolg.

In Anzuchtplatten angezogene Jungpflanzenballen aus Torfsubstraten reagieren unempfindlich auf seitliche Druckbeaufschlagung und verfügen über eine relativ hohe elastische Rückverformung. Ein Zerfallen oder Zerfließen der Ballen, wie es mit mineralischen Böden geschehen würde, konnte nicht beobachtet werden.

7.4 Dynamische Stoßbelastung von Jungpflanzenballen

In üblichen Magazinpflanzmaschinen mit Pflanzeneingabe über freien Fall wird die Jungpflanze über eine Fallstufe von bis zu 0.8 m Höhe der Furche zugeführt. Durch Führungselemente wird der freie Fall bei kleinvolumigen Jungpflanzen kaum gebremst. Die Jungpflanzen treffen auf der Furchensole mit einer berechneten Fallgeschwindigkeit von ca. 4 m pro Sekunde auf. Die

Ballen verformen sich, gegebenenfalls fällt ein Teil des Substrates ab, schlimmstenfalls zerfällt der gesamte Ballen, was einen erheblichen Verpflanzschock verursachen dürfte.

7.4.1 Versuchsdurchführung

Um die Belastung des Jungpflanzenballens beim Auftreffen auf den Boden nachzuvollziehen, wurde eine maximale freie Fallstrecke von 0.8 m durch ein Kunststoffrohr (Durchmesser 8 cm) auf eine Holzplatte gewählt. (Abb. 7.1). Alle Versuche wurden mit im Anzuchtverfahren "St" vorgezogenen Jungpflanzen durchgeführt. Und zwar mit Kopfsalat und Kopfkohljungpflanzen der beschriebenen Sorten. Die Anzuchtsubstrate waren TKS, Einheitserde und TKS/Sand.

Die Versuchsfrage ist, inwiefern sich die Ballenform nach dem Fall verändert und wie groß der Substratverlust in Abhängigkeit von der Art des Substrates und der Durchwurzelung ausfällt.

7.4.2 Versuchsergebnisse der dynamischen Stoßbelastung

Auf die dynamische Belastung durch Stoß reagieren die Ballen mit Formveränderung und Substratverlust.

7.4.2.1 Formveränderung

Der Stoß auf die Ballensohle führt zu einer Verkürzung des Ballens bei gleichzeitiger Durchmesserzunahme. In Abbildung 7.9 ist der Zusammenhang zwischen Längenabnahme und Durchmesserzunahme nach dem freien Fall aufgetragen. Es handelt sich hier um Kopfkohl in TKS/Sandgemisch. Das Substrat war während der Anzucht zusammengesackt, so daß die Ausgangslänge nur 31.5 statt 35 mm beträgt und damit der mittlere Durchmesser wegen der konischen Form der Ballen ebenfalls nur 20.8 mm vor der Belastung mißt.

Die Ballen sind nach der Behandlung signifikant kürzer und breiter. Das Ballenvolumen nimmt durch dynamische Belastung zu.

Es kommt zu einer Lockerung der Substratvernetzung, die Ballentrockendichte sinkt. Die Lockerung des Substratverbandes bei dynamischer Stoßbelastung ist

bei einmaliger Beaufschlagung ohne Bedeutung. Mehrmalige Fallstufen sind jedoch zu vermeiden.

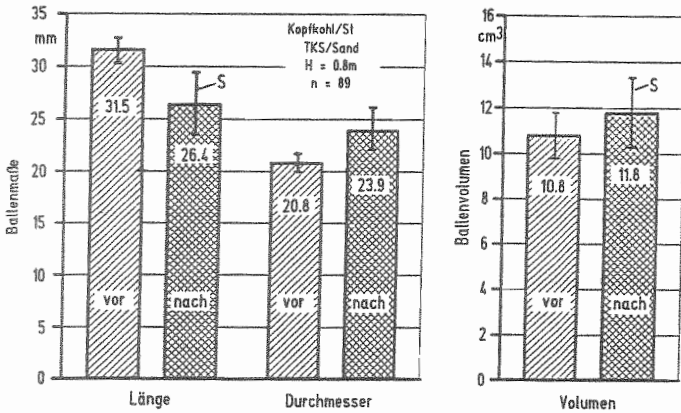


Abbildung 7.9: Formveränderung von Wurzelballen bei dynamischer Belastung

Ballen aus TKS und Ehe zeigen ein ähnliches Verhalten, nur daß sie geringere Längenabnahme bzw. Durchmesserzunahme als die in TKS/Sand angezogenen aufweisen (Tab. 7.2). Eine Formveränderung von mehr als 15 % des Ausgangsmaßes ist in keinem Fall nachzuweisen. Als Grund für die hohe Stabilität der Ballen ist anzusehen, daß sich durch die bodenfreie Anzucht ein "Wurzelfilz" im unteren Teil des Wurzelballens ausbildet. Der Wurzelfilz wirkt sozusagen wie ein Stoßdämpfer und vermindert damit die Intensität des Aufpralls.

7.4.2.2 Substratverlust

Die gemessenen Substratverluste sind ebenfalls sehr gering und liegen im Mittel weit unter 10 % von der Gesamtsubstratmenge (Tab. 7.2). Eine Korrelation zwischen den Verlusten und dem Jungpflanzengewicht, der Art des Substrates und der Substratdichte liegt nicht vor. Die erfaßten Werte der Substratverluste liegen nicht normal verteilt vor, außerdem ist die Standardabweichung extrem hoch, so daß eine statistische Verrechnung nicht zulässig ist.

Tabelle 7.2: Verformungsverhalten von Jungpflanzenballen in Abhängigkeit von der Pflanzenart, der Art des Substrates, der Substratdichte und dem Jungpflanzenfrischgewicht.

(l_n = Ballenlänge, d_n = Ballendurchmesser, V_n = Ballenvolumen, Verl = Substratverlust)

Kultur		Kopfsalat		Kopfkohl
Substrat		TKS	Ehe	T/S
n		73	75	89
JP	(g)	1.40 a*	0.97 b	0.70 c
	S	0.32	0.22	0.42
ρ_B	(g/cm ³)	0.11 a	0.20 c	0.17 b
	S	0.01	0.02	0.02
l_n	(mm)	31.4 a	31.2 a	26.4 b
	S	1.8	2.2	2.5
d_n	(mm)	22.0 a	21.6 a	23.9 b
	S	1.0	1.0	1.8
V_n	(cm ³)	11.9 a	11.5 a	11.8 a
	S	1.2	1.0	1.5
Verl	(Gew.-%)	5.83	8.34	4.64
	S	2.97	6.90	4.19

* SCHEFFE ($\alpha_1 = 0.01$)

Der obere Bereich des Ballens wird auch bei schon überständigen Jungpflanzen nicht durchwurzelt. Damit ist bei der Handhabung immer ein geringfügiger Substratverlust zu erwarten, der jedoch in keiner Weise die Qualität des Wurzelballens beeinflusst.

Substratballen verhalten sich bei dynamischer Stoßbelastung auf die Ballensohle unempfindlich. Aufgrund einer Lockerung des Substrats kommt es zu einer Volumenerhöhung. Die Substratverluste liegen in allen Versuchen unter 10 %.

8. Wertung der Ergebnisse zur Belastungsempfindlichkeit von Jungpflanzen

Die Betrachtung und Wertung des Prozesses der Einbettung durch teilautomatische Pflanzmaschinen aus verfahrenstechnischer Sicht ist nicht vollständig, wenn nicht gleichzeitig die Belange der Jungpflanze berücksichtigt werden.

Ein Ziel der Arbeit war, zu untersuchen, wie empfindlich die Wurzelballen von Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren sind bzw. wie und in welchem Maße sich mechanischer Streß in Form von Druck oder Schlag auf die Ballen auswirkt. Wie in den Untersuchungen mit Drucksonden nachgewiesen werden konnte, liegen bei der Einbettung am Wurzelballen Drücke bis 0.5 bar vor, außerdem müssen die Jungpflanzen Fallstufen bis zu 0.8 m Höhe ohne Schaden überstehen.

Mc. KEE (1981), SABOTA (1981) und ZINK (1964) belegen in ihren Untersuchungen, daß jegliche Verletzung von Wurzeln oder deren Verlust zu einer Steigerung des nie ganz vermeidbaren Verpflanzschockes führt. Jeder Verpflanzschock verlängert jedoch die folgende Erholungsphase der Jungpflanzen. Die Zeitspanne bis zur Ernte wird ausgedehnt, was gerade im intensiven Anbau unerwünscht ist.

Wie die Ergebnisse zeigen, können u.a. die folgenden Einflußfaktoren die Stabilität des Wurzelballens beeinflussen:

- das Anzuchtverfahren
- das Anzuchtsubstrat
- die Dichte des Substrates
- der Wassergehalt des Substrates
- der Durchwurzelungsgrad des Substrates, abhängig von Pflanzenart und Größe.

Torfsubstrate bestehen ganz (TKS), oder wie Mischsubstrate, in der Hauptsache (Ehe und TKS/Sand), aus organischer Substanz.

In ihrer Druck/Einsinkbeziehung verhalten sie sich wie Ackerböden. Mit zunehmender Dichte steigt bei gleichem Substrat der Druck zur Erzielung eines bestimmten Enddurchmessers, was in der Bodenmechanik der Einsinktiefte entspricht. Dieser Zusammenhang konnte dort u.a. von KNITTEL (1975), SÖHNE (1952), SOMMER und ZACH (1986) beobachtet werden. Mit zunehmender

Verdichtung sinkt der Gehalt an leicht verdichtbaren Grobporen und der Kraftbedarf zur weiteren Verdichtung steigt.

Allein durch Erfassung der Dichte kann keine Aussage über die benötigte Druckkraft zum Erzielen des Enddurchmessers getroffen werden. Die Art des Substrates, in unserem Fall Torfsubstrat mit Zuschlagstoffen, wie Ton oder Sand, erhöht erheblich das durchschnittliche spezifische Gewicht. Es variiert bei den hier untersuchten Substraten zwischen 0.07 g/cm^3 und 0.21 g/cm^3 und ist damit um das 5- bis 10fache geringer als das von Ackerböden.

Wie die Steigungen der Regressionsgleichungen zeigen, sind Ballen aus reinem Torfsubstrat bei steigender Dichte weniger verdichtungsempfindlich als Ballen aus Mischsubstraten. Dies führt zu dem Schluß, daß Torfpreßsubstrate ohne mineralischen Zusatz hergestellt werden sollten.

Die Ballen des Anzuchtverfahrens "Cu" bestehen ebenfalls aus reinem Torf, sind aber auf das zweifache vorverdichtet (0.18 g/cm^2) und zusätzlich umhüllt. Bei ähnlichen Ballenmaßen wie "St" ist die Druckkraft mehr als doppelt so groß wie bei den nicht verdichteten Ballen in "St".

Richtet sich die Auswahl eines Anzuchtverfahrens rein nach der Ballenfestigkeit, so sind Anzuchtverfahren mit vorverdichteten Ballen auszuwählen. Der Sachverhalt der Steigerung der Ballenfestigkeit durch Vorverdichtung wird in der Praxis bei der Erzeugung von Erdpreßtöpfen eingesetzt. Sie werden ausschließlich durch einen Preßvorgang in ihrer Form gehalten.

Selbstverständlich ist die Vorverdichtung wegen des Substrat-Wasser-Luftverhältnisses begrenzt. Vordringlich muß sich das Anzuchtverfahren nach dem Anzuchterfolg und dem späteren Pflanzenwachstum richten und nicht ausschließlich nach der Ballenstabilität. Durch die größere Vernässungsgefahr bei Substraten mit Zuschlagstoffen aufgrund des geringeren Porenvolumens ist eine Vorverdichtung nur bei reinen Torfsubstraten zu empfehlen.

Ein direkter Vergleich in der Verdichtungsempfindlichkeit zwischen den Substraten ist nur schwer interpretierbar.

Substrate mit Tonzusatz (Ehe) zeigen in der Tendenz bei gleicher Befüllung etwas höhere Festigkeit. Das elastische Rückstellungsverhalten von Ballen aus TKS oder TKS/Sandgemisch ist besser als das von Ballen aus Einheitserde.

Es bildet sich ein Ton-Humus-Komplex aus, der möglicherweise das elastische Verhalten stört.

Der zweite wichtige Faktor für die Ballenfestigkeit ist der **Durchwurzelungsgrad**, bestimmt über das **Jungpflanzenfrischgewicht**.

Das durchschnittliche Jungpflanzenfrischgewicht im Pflanzstadium liegt für Salat und Kohl bei einer Anzuchtdichte von ca 1000 Pflanzen/m² zwischen 1 g und 1.5 g. Die Kohlpflanzen aus Abbildung 6.9 b mit einem Jungpflanzenfrischgewicht von 2.34 g sind bereits etwas überständig.

Durch die bessere Durchwurzelung setzen Wurzelballen von größeren Jungpflanzen dem Druckstempel einen größeren Widerstand entgegen. Sie werden damit bei gleicher Druckkraft weniger zusammengepreßt als schlecht durchwurzelte Ballen.

Erklärungen für diesen Zusammenhang liegen aus der Literatur bisher nicht vor. Es kann jedoch zugrunde gelegt werden, daß bei Ballen kleinvolumiger Jungpflanzen-Anzuchtverfahren ein hohes Wurzel-Substratverhältnis vorliegt. Die Ballen sind im pflanzfertigen Zustand weitgehend mit Wurzeln vernetzt. Besonders im unteren Bereich nahe der Abzugsöffnung liegt ein regelrechter Wurzelfilz vor. Wird jetzt der Ballen seitlich mit einer Druckkraft belastet, kann er aufgrund der Vernetzung nur in geringerem Maße senkrecht zur Druckrichtung ausweichen, bleibt damit dichter, und verursacht eine höhere Druckkraft bei Erreichen des Endabstandes. Die Druckspannung wird zum Teil von den Wurzeln durch Umwandlung in Zugspannung aufgebracht

Ein Einfluß der Durchwurzelung auf das Rückstellverhalten der Jungpflanzenballen kann nicht festgestellt werden.

Aufgrund der hohen Ballenfestigkeit, die durch die Vernetzung der Wurzeln gefördert wird, sind kleinvolumige Anzuchtverfahren für teilmechanische Pflanzverfahren zu empfehlen.

Der Substratwassergehalt ist varianzanalytisch ohne Einfluß für die Verdichtungsempfindlichkeit. Weder bei TKS noch Einheitserde konnten signifikante

Unterschiede im für die Jungpflanze verträglichen Bereich festgestellt werden. Nur in der Tendenz kann bei Einbeziehung des Wassergehaltes in die Regressionsgleichung (Gl. 39) ein schwacher Einfluß geltend gemacht werden, wie das steigende Bestimmtheitsmaß zeigt.

Aus der Bodenmechanik wäre zu erwarten gewesen, daß mit Zunahme des Wassergehaltes eine Abnahme der benötigten Druckkraft vorliegt (BOLLING 1987). Böden mit einem hohen Gehalt an organischem Material gelten im feuchtem Zustand als verdichtungsunempfindlicher als mineralische Böden. Dies widerspricht dagegen den Untersuchungsergebnissen, in denen bei Torfsubstraten mit Zuschlagstoffen keinerlei Einfluß vom Wassergehalt geltend zu machen ist.

Für Torfsubstrate ist gegenüber Freilandböden der vergleichbar hohe Wassergehalt bei Feldkapazität zu berücksichtigen. Beim Verdichtungsvorgang, entsprechend dem Andrückvorgang im Boden, wird ab Erreichen der Wassersättigung aller Grobporen Wasser ausgepreßt. Aufgrund der lockeren Struktur von Torf und der hauptsächlichlichen Wasserbindung in Grobporen kann das Wasser ungehindert entweichen.

Beim Pflanzvorgang ist das Auspressen des Wassers aus dem Ballen als negativ zu betrachten, da das Wasser nach der Entspannung nicht wieder vom Ballen aufgesogen werden kann, sondern vom umliegenden Boden aufgenommen wird. Der für die Pflanze nachteilige Prozeß, daß der Wurzelballen je nach Wasserleitfähigkeit des umgebenden Bodens und Potentialunterschieds zwischen Ballen und umgebenden Boden Wasser verliert, wird beschleunigt (HANKS u. ASHCROFT 1980). Ist die Pflanze nicht in der Lage, kurzfristig neue Wurzeln in den umgebenden Boden zu treiben (LOOMIS 1925, Mc. KEE 1981), besteht die Gefahr, daß sie ohne Bewässerungsmöglichkeit Schaden erleidet.

Ein verformungsstabiler Wurzelballen, der bei der Einbettung nicht zusammengepreßt wird, hat damit einen langsameren Wasserverlust zu verzeichnen. Inwieweit sich dieser Vorteil auf das Anwachsergebnis auswirkt, müßte in Feldversuchen überprüft werden.

Fallstufen bis zu einer Höhe von 0.8 m müssen von den Jungpflanzenballen ohne Schaden überstanden werden. Bei dieser dynamischen Stoßbelastung wird vordringlich ein hoher Zusammenhalt des Wurzelverbandes verlangt.

Von Erdpreßtöpfen, meist mit einem Volumen über 60 cm^3 , ist bekannt, daß sie leicht zerbröckeln und empfindlich auf Schlag, z.B. durch den Aufprall am Boden, reagieren (LABOWSKY 1984 b). Jungpflanzen aus Anzuchtplatten bilden dagegen besonders an der Ballensohle ein dichtes Wurzelnetz aus und sind damit gut gegen dynamische Belastung geschützt. Wie die Untersuchungen zeigen, ändern sich die Ballenmaße nach einer Fallstufe von 0.8 m signifikant. Bezogen auf die Ausgangsmaße werden jedoch nicht mehr als 15 % Längen- oder Breitenänderung registriert. Wurzelverletzungen oder ein Zerfallen der Jungpflanzenballen kann nicht nachgewiesen werden.

Das Ballenvolumen nimmt nach Durchlaufen der Fallstufe zu, d.h. der Ballen wird lockerer. Dies läßt den Schluß zu, daß mehrmalige Fallstufen zu vermeiden sind, um ein Zerfallen des Ballens zu verhindern

Der Substratverlust ist sehr gering. Maximal wurde eine Verringerung von 9.7 % des Ausgangsgewichtes gemessen. Eine Beziehung zum Durchwurzelungsgrad kann in den durchgeführten Untersuchungen nicht belegt werden. Zu berücksichtigen ist, daß die Untersuchung nur mit Jungpflanzen im pflanzfähigen Zustand durchgeführt wurden, bei denen eine ausreichende Ballenvernetzung durch die Wurzeln vorliegt.

Der Substratverlust entsteht im oberen, ungenügend durchwurzelten Bereich der Wurzelballen. Dieser Bodenbereich wird auch von überständigen Pflanzen nicht vollständig durchwurzelt.

Zusammenfassend kann aus den Laborergebnissen gefolgert werden, daß Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren eine ausreichende Ballenstabilität zur Verwendung in teilmechanischen Pflanzmaschinen zeigen. Mit Zunahme der Dichte des Substrates und der Verwendung größerer Jungpflanzen ist eine Steigerung der Ballenfestigkeit bei statischer Belastung zu erzielen. Änderungen im Substratwassergehalt sind nahezu ohne Einfluß auf die Ballenfestigkeit. Auf dynamische Stoßbelastung reagieren die Wurzelballen ebenfalls weitgehend unempfindlich. Ein Substratverlust wird nur im oberen, nicht durchwurzelten Bodenbereich des Ballens beobachtet.

Eine vergleichende Betrachtung aller Einflußfaktoren auf den Anwacherfolg, insbesondere der Ergebnissen aus den Laborversuchen und der mit den Drucksonden festgestellten Daten, erfolgt im anschließenden Kapitel.

9. Gesamtdiskussion der Einflußfaktoren auf den Anwacherfolg

Im folgenden Kapitel wird der gesamte Prozeß der Pflanzung mit teilautomatischen Pflanzmaschinen als Ganzes betrachtet.

Wegen der Fülle von Faktoren, die den Anwacherfolg beeinflussen, war es nur möglich, zu einigen primären Teilaspekten Versuche anzustellen. Zur Wertung aller Ergebnisse wird an dieser Stelle das gesamte Umfeld um den Einbettungsvorgang mit berücksichtigt.

Die Faktoren, die einen direkten Bezug zum Anwacherfolg haben, sind (siehe Abb. 1.1):

- der Bodenzustand
- die Wasserversorgung
- die Jungpflanzenanzucht
- das Pflanzverfahren

Indirekt zu beeinflussen ist der Anwacherfolg durch:

- die Kulturführung
- die Umweltbedingungen

9.1 Boden und Bodenvorbereitung

Ein für die Pflanzung geeigneter Boden sollte bis Schartiefe gelockert und mäßig rückverdichtet sein. Für die Funktion der Pflanzmaschine ist die Lockerung wichtig, denn ein hartes Pflanzbett verhindert das Eindringen des Furchenschares. Außerdem steigt die Zugkraft mit dem Einheitswiderstand des Bodens (SCHAAF 1979, PIETSCH 1977). Ein nicht rückverdichtetes, locker gelagertes Pflanzbett bietet den Pflanzmaschinen ebenso wie dem Schlepper keinen Halt. Tiefe Spuren durch die Druckrollen und Schlepperreifen sind die Folge.

Die Bearbeitungsintensität des Pflanzbettes richtet sich nach der Größe der Wurzelballen. Kleine Wurzelballen (10 bis 20 cm³) verlangen feinere Bodenaggregate als großvolumige Wurzelballen (60 cm³), um einen ausreichenden Boden-/Ballenkontakt zu ermöglichen.

Eine zu feine Bearbeitung fördert die Verschlammungsgefahr.

Außerdem hat sich die Bearbeitungsintensität vor der Pflanzung nach der Pflanztiefe einer Kultur zu richten. Bei flacher, oberflächiger Einbettung (Kopfsalat) sollte der Boden feinkrümeliger sein, als bei einer tieferen Pflanzung (Kopfkohl), bei der auch im gröberen Boden ein ausreichender Bodenschluß vorliegt.

9.2 Wasserversorgung am Pflanzort

Eine optimale Bodenfeuchte zur Pflanzung liegt dann vor, wenn der Boden einen hohen Versorgungsgrad besitzt, aber oberflächlich soweit abgetrocknet ist, daß eine Bearbeitung bis Schartiefe möglich ist und der Boden an der Krume nicht klebt. Pflanzmaschinen sind für nassen, tonhaltigen und damit klebrigen Boden ungeeignet. Die Pflanzeneingabevorrichtungen setzen mit Erde zu und verlieren damit ihre Funktion. Der optimale Pflanztermin liegt dann vor, wenn die Oberfläche soweit abgetrocknet ist, daß der Boden befahrbar bzw. oberflächlich bearbeitbar ist.

Probleme bereitet die Pflanzung von Jungpflanzen mit kleinvolumigen Wurzelballen, die wenig Wasserreserven mitbringen. Dies führt unter Umständen zu Ausfällen, wenn keine Bewässerungsmöglichkeit vorliegt. Die Ballen verlieren Wasser durch die normale Transpiration der Pflanzen, durch Abgabe von Wasser an den sie umgebenden Boden über die hydraulische Leitfähigkeit und, bei flacher Pflanzung mit ungenügender Wurzelabdeckung, durch Verdunstung ("Dochteffekt").

Die Transpiration des Laubes ist kaum zu vermeiden (eventuell durch den Einsatz transpirationshemmender Mittel), aber die Wasserabgabe durch Verdunstung des Ballens ist mit einer optimalen Pflanztechnik auszuschließen. Nicht zu verhindern ist der Wassertransport an den umgebenden Boden.

Torfsubstrate können über 60 Vol.-% an Wasser speichern. Damit verfügt ein Substratballen mit 12 cm³ Volumen über eine für die Pflanze verfügbare Wasserreserve (PF < 4.2) von ca. 6 cm³. Optimale Wachstumsbedingungen liegen in Torf bis zu einer Wasserspannung von PF 1.7 vor, der Pufferwasserbereich reicht bis PF 2 (siehe Abb. 6.3). Bei PF 2 herrscht ein Saugdruck von

0.1 bar. Bei diesem Saugdruck liegen nur noch 15 Vol.-% an für die Pflanze verfügbarem Wasser vor (< PF 4.2).

Freilandböden verhalten sich dagegen in ihrer Wasserspeicherfähigkeit vollkommen anders. Die nutzbare Feldkapazität liegt in einem Bereich zwischen PF 1.7 bis PF 4.2. Ein oberflächlich abgetrockneter Boden, wie er für die Pflanzung gefordert wird, besitzt bis zu einer Tiefe von 5 cm möglicherweise nur noch 70 % der maximalen Feldkapazität. Dieser Wassergehalt entspricht bei sandigem Lehm einer Saugspannung von ca. 0.5 bar. Bei dieser Saugspannung von 0.5 bar stehen dagegen in Torf gerade noch 7 Vol.-% an gering verfügbarem Wasser zur Verfügung.

Dieses unterschiedliche Verhalten in der Wasserhaltefähigkeit von Torf und Freilandböden führt dazu, daß nach der Pflanzung ein Wassertransport entlang des hydraulischen Gradienten, vom Ort der geringen Saugspannung zum Ort der hohen Saugspannung auftritt. Es bildet sich, wie beschrieben, eine "Feuchtezwiebel" aus, die sich je nach Wasserleitfähigkeit weniger schnell oder schneller ausdehnt und damit dem Wurzelballen Wasser entzieht.

Dieser Wassertransport wird zusätzlich durch unsachgemäße Pflanzung unterstützt. Treten bei der Einbettung durch die Druckrollen hohe horizontale Druckspannungen auf, werden die Ballen verdichtet. Das im Torf schwach gebundene Wasser wird ausgepreßt und vom umgebenden Boden wie ein Schwamm aufgesogen. Verfügt die Jungpflanze nicht über die Fähigkeit, in einer relativ kurzen Zeitspanne aus dem Wurzelballen in den umgebenden Boden einzuwurzeln (LOOMIS 1925, Mc. KEE 1981), vertrocknet die Pflanze innerhalb kurzer Zeit.

Welche Möglichkeiten bieten sich, dieses Problem zu verhindern?

Die Jungpflanzen sollten mit einem möglichst feuchten Ballen gepflanzt werden, da die Ballenfeuchte für das Anwachsergebnis von größerer Bedeutung ist als die Bodenfeuchte (KRATKY und Mc. KEE 1980). Ist keine Bewässerungsmöglichkeit vorhanden, sollten größere Wurzelballenvolumina mit höherer Wasserspeicherfähigkeit bevorzugt werden. Außerdem sollte, sofern pflanzenspezifisch möglich, tief in feuchte Bodenschichten gepflanzt werden. Der Pflanztermin sollte außerdem an sonnigen Tagen auf den frühen Morgen, oder noch besser, auf den Abend verlegt werden.

Ein weiteres Verfahren um Trockenschäden zu verhindern ist die punktuelle Bewässerung direkt bei der Pflanzung. Der Erfolg dieses Verfahrens konnte von COX (1984 a) nachgewiesen werden.

Ein Abhärten der Gemüsejungpflanzen vor der Pflanzung verringert ebenfalls die Empfindlichkeit für Wasserstreß (Mc. KEE 1981).

Die beste Möglichkeit Verpflanzstreß zu verhindern, bietet die Überkopfbewässerung direkt nach der Pflanzung. Untersuchungen des Verfassers im Freiland (GEYER 1987) zeigen, daß durch eine Überkopfbewässerung nach der Pflanzung Unterschiede im Pflanzverfahren weitgehend beseitigt werden können. Liegt keine Bewässerungsmöglichkeit vor, muß die Einbettung exakter ausgeführt werden als mit Bewässerung.

9.3 Jungpflanzenanzucht

Die Auswahl des Anzuchtverfahrens in bezug auf optimalen Ertrag und Qualität ist von Mc. KEE 1981 intensiv untersucht worden. Sie hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Bei allen Anzuchtverfahren muß die Gesamtkulturzeit, die sich aus der Zeit im Anzuchtraum und der Zeit im Freiland zusammensetzt, von der reinen Kulturzeit im Freiland unterschieden werden. Je nach Intensivierungsstufe, Kulturart und Jahreszeit sind unterschiedliche Anzuchtverfahren von Vorteil. Bezogen auf die Kosten der Pflanzung, bestehend aus der Jungpflanzenanzucht und der eigentlichen Pflanzung, sind die kleinvolumigen Verfahren im Vorteil.

Für die in dieser Arbeit beschriebenen teilautomatischen Pflanzmaschinen kommen nur Jungpflanzen aus Anzuchtverfahren mit kleinvolumigen Substratballen im Bereich von 10 bis 20 cm³ in Frage (Abb. 6.1).

Die Wurzelballen, ob umhüllt oder nicht, reagieren auf statischen Druck oder dynamischen Stoß weitgehend unempfindlich. Die seitliche Druckbeaufschlagung führt zur Verformung des Ballens. Beim Erreichen der Wassersättigung der Grobporen wird Wasser ausgepreßt. Eine Wurzelbeschädigung ist nicht zu erkennen. Hierzu durchgeführte Untersuchungen zeigen (siehe Kapitel 6), daß der Durchwurzelungsgrad und die Ballentrockendichte die Ballenfestigkeit bei

statischer Druckbelastung proportional beeinflussen. Die größte Stabilität bieten umhüllte Ballen mit vorverdichtetem Substrat.

In einem nicht veröffentlichten Versuch (GEYER 1987) wurde untersucht, wie sich Jungpflanzen verhalten, wenn die Wurzelballen vor der Pflanzung entsprechend den beschriebenen Versuchen aus Kapitel 6 auf einen Endabstand a von 5 mm zusammengepreßt werden. Es war nicht möglich, signifikante Wachstumsunterschiede oder Ausfälle aufgrund dieser Behandlung nachzuweisen.

Es muß berücksichtigt werden, daß die Versuche zur Bestimmung der statischen Druckfestigkeit, mit flachen Druckstempeln durchgeführt wurden und nicht mit scharfkantigen Gegenständen, wie sie zum Teil durch Steine oder ähnliches bei der Pflanzung auftreten können.

Der Ballenwassergehalt ist im für die Pflanze verträglichen Feuchtigkeitsbereich nahezu ohne Belang für die Ballenfestigkeit. Hierdurch wird es möglich, Jungpflanzen vor der Pflanzung maximal zu befeuchten, um eine optimale Konditionierung zu erzielen, ohne Einbußen in der Ballenfestigkeit zu bekommen.

Neben der Belastung der Jungpflanzen beim Pflanzvorgang, durch die Handhabung und den Druck bei der Einbettung, tritt eine Belastung durch dynamischen Stoß, beim Aufprall der Jungpflanzen in die Furche bei einer Ablage durch freien Fall, auf. Hierzu wurden in der Arbeit Untersuchungen durchgeführt. Nach einer Fallstrecke von 0.8 m und dem Aufprall auf eine Holzplatte veränderte sich die Form der Wurzelballen nur geringfügig. Sie wurden kürzer und dicker, wobei die Formveränderung für den Anwacherfolg zu vernachlässigen ist. Außerdem nahm das Ballenvolumen zu. Mehrmalige dynamische Belastungen des Ballens sind zu vermeiden, da sich die Ballen lockern und ein vermehrter Substratverlust die Folge ist. Der Substratverlust nach einem Aufprall belief sich auf unter 10 % der Gesamtsubstratmenge.

Die hohe Stabilität der Wurzelballen von Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren ist darauf zurückzuführen, daß wegen des hohen Wurzel/Substratverhältnisses eine dichte Vernetzung des Ballens entsteht. Zusätzlich bildet sich durch die bodenfreie Anzucht ("Airpruning") ein dichter Wurzelfilz an der Unterseite der Wurzelballen. Dieser Wurzelfilz dämpft den Aufprall der Jungpflanze auf die Furchensohle.

Ganz allgemein muß bei der Pflanzung berücksichtigt werden, daß jeglicher Verlust von Sproßteilen wie auch von Wurzeln den Verpflanzschock vergrößert und damit die Zeit bis zur Ernte verzögert oder den Ertrag reduziert (ZINK 1964, SABOTA 1981).

9.4 Pflanzeneinbettung

Grundsätzlich verläuft die Pflanzeneinbettung bei allen teilmechanischen Pflanzmaschinen für Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren nach demselben Verfahren. Das Pflanzschar öffnet die Furche, über die Pflanzablage wird die Jungpflanze mit der Wurzel in die Furche eingeführt und durch die Druckrollen wird die Furche wieder geschlossen sowie der Boden um den Wurzelballen angedrückt.

Die Furchenscharre von Pflanzmaschinen unterscheiden sich voneinander in der Form der Scharvorderkanten, in ihrer Breite, in ihrer Tiefe und der Länge der Scharflanken. Um einen möglichst geringen Zugkraftbedarf zu verursachen, sollte die Breite des Schar und die Tiefenführung auf die Größe der Jungpflanzen bzw. der Wurzelballen abgestimmt werden können. Nach SCHAAP (1979) und PIETSCH (1977) ist der jeweilige Zugkraftbedarf direkt vom Furchenquerschnitt und progressiv von der Arbeitstiefe abhängig.

Die Furchentiefe richtet sich nach den pflanzenspezifischen Ansprüchen und nach dem Ablageverfahren (Abb. 2.6). Bei Ablageverfahren mit Klemmfingern, Klemmscheiben oder Schnappgreifern wird die Jungpflanze hängend in die Furche eingeführt und erst losgelassen, wenn sie im Boden fixiert ist. Die Furchentiefe ist größer als die Pflanztiefe und das Schar muß viel Boden aus der Furche räumen. Der Zugkraftbedarf ist hoch. Beim Zuschütten der Furche kann trockener Boden von der Oberfläche zwischen Jungpflanzenballen und die Furchensohle rutschen. Der Anschluß an das Bodenwasser kann behindert sein. Bei Pflanzungen ohne Bewässerungsmöglichkeit kann das Durchwurzeln in tiefere Bodenschichten erschwert sein.

Eine Mittelstellung nehmen Geräte mit Auswurfstempeln ein. Der Abstand zwischen Jungpflanzenballenunterkante und Furchensohle ist geringer.

Weniger trockener Boden kann zwischen Jungpflanzenballen und Furchensohle gelangen, als bei obigem Verfahren.

Am geeignetsten für einen exakten Anschluß an das Bodenwasser erscheinen Pflanzenablageverfahren, bei denen der Ballen direkt auf die Furchensohle abgelegt wird. Zwischen Ballen und Furchensohle kann keine trockene Erde eingetragen werden.

Das Einbringen trockener Erde von der Bodenoberfläche in die Furche ist von der Bauart der Scharvorderkante und der Ausformung der Scharflanken abhängig. Enden die Scharflanken im Bereich der Bodenoberfläche früher als an der Furchensohle, kann leichter Boden von der Oberfläche in die Furche gelangen.

Spitze Winkel der Scharvorderkante wie auch Abrundungen (Dorn) bewirken nach WILKINS et al. (1983) ein Aufwerfen von feuchtem Boden an die Oberfläche. Es kommt zu einer Bodenhorizontdurchmischung. Inwieweit die Durchmischung bei einer flachen Einbettung von Vorteil ist, müßte in Versuchen nachgeprüft werden.

Furchenschare und Druckrollen müssen insofern aufeinander abgestimmt sein, als daß das Schar in seinem Breiten/Tiefen-Verhältnis so ausgelegt sein muß, daß seitlich der Furche, neben den Scharflanken, nur so viel Boden aufgeworfen wird, wie von den Druckrollenlaufflächen erfaßt und in die Furche zurückgeschoben werden kann. Ist der seitliche Bodenaufwurf zu groß, so wird ein Teil der Erde nicht in Richtung Furche verdichtet und bleibt nach der Überfahrt der Druckrollen neben der Spur liegen. Die Spurtiefe nimmt zu.

Eine Wertung der Pflanzenablage bezüglich der Einbettungsqualität ist nur bedingt möglich. Geräte mit Ablage durch freien Fall direkt in die Furche besitzen wegen der Fallstrecke eine weniger hohe Ablagegenauigkeit in der Reihe als Geräte mit Klemmvorrichtungen oder Ausdrückstempel.

Bedingung für einen aufrechten Stand der Jungpflanzen bei allen Ablageverfahren ist, daß sie schwach rückwärts geneigt in die Furche eingegeben werden, um den Impuls durch den in Fahrtrichtung in die Furche strömenden Boden auszugleichen.

Eine Beeinträchtigung der Jungpflanzen in ihrem Wachstum durch den Klemmvorgang der Blätter oder das Aufprallen auf die Furchensohle ist bei stabilen Jungpflanzen mit gut durchwurzeltem Ballen auszuschließen, wie die Untersuchungen belegen.

Der Furchenschluß an sich erfolgt durch das Zusammenfallen der Furchenwände, wird aber, wie Untersuchungen von PETKOV und TRAJANOV (1978) belegen, verstärkt durch die Wirkung der Druckrollen. Die Hauptanforderung an die Druckrollen besteht darin, daß die Jungpflanzen senkrecht, mit optimalem Bodenschluß in der gewünschten Tiefe im Boden zum Stehen kommen. Um die Evaporation des Ballens zu minimieren, soll der Wurzelballen wenigstens mit einer dünnen Bodenschicht abgedeckt sein. Ein Zusammenpressen der Wurzelballen, welches unweigerlich zum vorzeitigen Wasserverlust an den umgebenden Boden führt, gilt es beim Andrücken zu vermeiden.

Als wichtigster Parameter wirkt sich das Gesamtgewicht einer Pflanzmaschine auf die Druckkraft in der Furche aus. Eine höhere Belastung der Druckrollen steigert den Druck in der Furche. Bei praxisüblichen Pflanzmaschinen stützt sich ein Teil des Maschinengewichtes (>25 daN siehe Abb. 5.3 - 5.6) über das Schar und den Geräterahmen ab. Wobei die Last, um die nach oben wirkende Vertikalkraft des Schares auszugleichen bzw. das Schar in der gewünschten Tiefe im Boden zu führen, mit zunehmender Lagerungsdichte des Bodens immer größer wird.

Bei einem Gerätevergleich sind solche Pflanzmaschinen zu bevorzugen, bei denen die Anordnung des Sitzplatzes der Pflanzpersonen variabel ist. Je nach gewünschter Bodenbelastung kann damit das Gewicht der Pflanzperson über die Druckrollen auf den Boden wirken oder vom Geräterahmen abgestützt werden. Hierdurch wird es möglich, unterschiedliche Druckkräfte in der Furche am Wurzelballen zu regulieren. Außerdem kann eine starke Belastung der Druckrollen durch eine schwere Arbeitsperson auf sehr weichem, tiefgründigem Boden zu einem "Versinken" der Druckrollen im Boden führen. Eine einwandfreie Pflanzung ist nur noch bedingt möglich.

Der Druckrollenabstand beschreibt die Entfernung zwischen den Rollenkontaktflächen und dem Furchenbereich. Je größer dieser Abstand zwischen den Druckrollen ist, desto geringer wird der Druck in der Furche. Wegen der

räumlichen Ausdehnung der Kraftlinien im Boden liegt keine lineare Beziehung vor.

Neben der Veränderung der Belastung der Pflanzmaschine ist dies die einfachste, zum Teil bereits praktizierte Möglichkeit, den Druck am Pflanzort zu verändern. Eine Änderung der Spurtiefe ist mit diesem Verfahren nicht möglich.

Mit einer Änderung der Druckrollenbreite ist ebenfalls eine weitreichende Beeinflussung des Druckes in der Furche, aber auch der Spurtiefe möglich. Durch den Einsatz breiterer Rollen reduziert sich der Druck am Ballen. Außerdem kann der vom Schar rechts und links der Scharflanken aufgeworfene Boden in der ganzen Breite erfaßt und in Richtung Furche verdichtet werden. Von Nachteil ist der hohe Aufwand für die Umrüstung der Geräte.

Die Druckrichtung der Druckrollen wird über den Anstellwinkel gesteuert. Je größer der Anstellwinkel, um so höher ist die Druckkraft am Ballen. Je nach Bodenart können große Anstellwinkel ($\alpha > \text{ca. } 25^\circ$) zu Scherungen in Richtung Furche führen. Der Boden bricht zwischen den Druckrollen auf. Dieses Verhalten kann bei kleinen Jungpflanzen mit kleinen Wurzelballen, die flach gepflanzt werden müssen, dazu führen, daß nur ein unzureichender Bodenschluß vorliegt und die Blätter mit Boden bedeckt werden. Außerdem bewirkt ein großer Anstellwinkel, daß die Jungpflanzen auf einem Damm zu stehen kommen, der ohne Bewässerungsmöglichkeit in relativ kurzer Zeit abtrocknet. Empfindliche, flach gepflanzte Jungpflanzen können an sonnigen Tagen dann schon nach kurzer Zeit die ersten Welkesymptome zeigen. Für fäulnisempfindliche Pflanzen, wie z.B. Kopfsalat, kann die erhöhte Pflanzung aber auch von Vorteil sein, soweit direkt nach der Pflanzung bewässert wird.

Die freie Änderbarkeit der Anstellwinkel ist, besonders bei Pflanzmaschinen mit Bodenantrieb, nur mit größerem konstruktivem Aufwand zu lösen.

Der Druckrollendurchmesser hat wenig Einfluß auf die Druckkraft in der Furche. Außerdem sind einer Durchmesseränderung aufgrund der Bauhöhe der Pflanzmaschinen enge Grenzen gesetzt. Wegen des geringeren Zugkraftbedarfes (WENNER 1982), der geringeren Spurtiefe und der größeren Rollenaufstandsfläche sind jedoch große Rollen zu bevorzugen.

Durch Profilierung der Druckrollenaufstandsflächen wird bei einigen praxisüblichen Pflanzmaschinen versucht, auch im Oberboden zwischen 0 und 2 cm Tiefe horizontale Druckspannungen zur Erzielung eines ausreichenden Bodenschlusses zu bekommen. Allein über den Anstellwinkel ist wegen horizontalen Scherungen dieses Problem nicht zu lösen.

Durch aufeinander abstimmen der Druckrolleneinstellungsparameter ist es möglich, die Druckspannung in der Furche zu regulieren. Eine höhere Druckspannung in der Furche, ausgelöst durch eine größere Belastung der Druckrollen aufgrund einer schweren Pflanzperson, kann z.B. damit ausgeglichen werden, daß die Druckrollenbreite oder der Druckrollenabstand vergrößert werden oder der Anstellwinkel verringert wird.

Die Spurtiefe der Druckrollen verhält sich in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht, von der Druckrollenbreite, vom Anstellwinkel und bedingt vom Druckrollendurchmesser wie die Druckspannung im Boden. Durch eine Druckrollenverbreiterung wie auch durch Reduzierung des Anstellwinkels kann die Spurtiefe verringert werden. Der Rollendurchmesser hat, verglichen mit dem Anstellwinkel oder der Druckrollenbreite, einen geringen Einfluß. Gerade auf stark verdichtungsempfindlichem Boden kann es von Vorteil sein, breitere Druckrollen mit einem möglichst geringen Anstellwinkel einzusetzen.

Durch einen Vergleich der Spurtiefen bei unterschiedlich belasteten Druckrollen oder bei veränderten Druckrolleneinstellungen von verschiedenen Pflanzmaschinen ist es möglich, über die Regressionsgleichungen Rückschlüsse auf die Druckspannungen in der Furche zu ziehen. Hierdurch lassen sich Unterschiede in der Einbettung zwischen verschiedenen Pflanzmaschinen aufzeigen, ohne komplizierte Meßverfahren über Drucksensoren durchführen zu müssen.

Der Prozeß der Einbettung verlangt ein optimales Zusammenspiel aller Einflußfaktoren. Die Bodeneinflüsse, die Wasserversorgung, die Jungpflanzenanzuchtverfahren und die Pflanzmaschinen mit ihren Einbettungswerkzeugen müssen aufeinander abgestimmt sein. Moderne Pflanzmaschinen sollten den an sie gestellten Anforderungen sowohl dadurch gerecht werden, daß die Jungpflanzen

bei der Ablage und Einbettung so wenig wie möglich mechanisch belastet werden, als auch dadurch, daß die Geräte an veränderte Bedingungen (unterschiedliches Gewicht der Pflanzpersonen, feuchter verdichtungsempfindlicher oder trockener fester Boden) rasch und gezielt angepaßt werden können.

Mit dem Abschluß dieser Arbeit wird deutlich, daß noch eine Menge Fragen offen sind. Weitere Untersuchungen sind nötig, um die vorgestellten, unter definierten Versuchsbedingungen erfaßten Ergebnisse auf andere Verhältnisse umzusetzen.

Sowohl die Anwendung der Regressionsgleichungen auf praxisübliche Pflanzmaschinen als auch der Begriff des optimalen Bodenschlusses, d.h. die Beziehung zwischen Druckspannung und Verdichtung im Boden und den Belangen der Jungpflanze, sollten noch näher untersucht werden. Weiterhin reichen die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluß der Laufflächenform wie auch des Rollenabstandes auf die Druckausbreitung nicht aus, alle Fragen erschöpfend zu klären. Außerdem liegen bisher nur unzureichende Erfahrungen über den Wassertransport im Boden bei der Pflanzung vor.

10. Zusammenfassung

Das schnelle und zügige Anwachsen einer gepflanzten Gemüsekultur ist mit ausschlaggebend für einen frühen Erntetermin und einen hohen Ertrag. Der optimale Anwacherfolg nach der Pflanzung ist von einer Fülle von Einflußfaktoren abhängig.

Diese sind:

- der Bodenzustand
- die Jungpflanzenanzucht
- das Pflanzverfahren
- die Umweltbedingungen
- die Kulturführung, insbesondere die Wasserversorgung.

Aufgrund der Komplexität des Gesamtprozesses der Einbettung war es nur möglich, Versuche zu wichtigen Teilaspekten der Pflanzung durchzuführen.

Im Vordergrund der Bewertung stand die Einbettung von Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren durch teilautomatische Pflanzmaschinen. Die Werkzeuge sind das Pflanzschar, die Jungpflanzenablegevorrichtung und die Druckrollen. Grundlegende Untersuchungen erfolgten zur Bestimmung der Funktion und Wirkung der Druckrollen mit Hilfe von Druckstempeln und mit dynamischen Messungen in der schließenden Furche.

Das erste Teilziel der Druckrollenuntersuchungen war die Entwicklung einer Drucksonde, die in ihren Maßen den Wurzelballen von Jungpflanzen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren entspricht. Sie ist geeignet, den dynamischen Druckspannungsverlauf in der schließenden Furche am Pflanzort in Abhängigkeit von verschiedenen Einflußfaktoren aufzuzeichnen. Das Meßverfahren wird vorgestellt.

Die druckrollenabhängigen Einflußparameter, ihre Bedeutung für den Bodendruck in der Furche und die Möglichkeit, wie sie im praktischen Einsatz zu verändern sind bzw. wie sie aufeinander abgestimmt werden können, werden mit Hilfe der Drucksonde untersucht und grundlegend diskutiert.

Die Druckrollenparameter sind:

- das Druckrollengesamtgewicht
- der Druckrollenabstand
- die Rollenbreite
- der Anstellwinkel zur Senkrechten
- der Rollendurchmesser
- das Laufflächenprofil.

Zunehmendes Druckrollengesamtgewicht, engerer Rollenabstand, größerer Anstellwinkel und abnehmende Rollenbreite steigern den Druck in der Furche. Eine Veränderung des Rollendurchmessers hat nur einen geringen Einfluß auf den Druck am Pflanzort.

Ausgedrückt als Regressionsgleichungen verhalten sich die Spurtiefen ähnlich den in der Furche mit den Drucksonden gemessenen Druckspannungen. Ein Ausgleichen unterschiedlicher Druckspannungen in der Furche durch Vergleich der Spurtiefen erscheint möglich.

Bei der Anwendung der Ergebnisse aus der Bodenrinne auf praxisübliche Pflanzmaschinen ist zu erkennen, daß die Ergebnisse nur bedingt einzusetzen sind. Neben der Abstützung eines Teils des Gerätegesamtgewichtes über das Pflanzschar auf den Boden, liegen weitere nicht erfaßte, den Pflanzdruck beeinflussende Faktoren vor.

Weiterführende Laborversuche behandeln die Frage der Stabilität der Wurzelballen von Jungpflanzen auf statischen Druck und dynamischen Stoß, um die Eignung verschiedener Anzuchtverfahren für die jeweilige Einbettungstechnik beurteilen zu können. Die Ergebnisse sind:

Die Wurzelballen aus kleinvolumigen Anzuchtverfahren verhalten sich unempfindlich gegen dynamischen Stoß wie auch statischen Druck.

Die Wurzelballenfestigkeit bei statischer Belastung ist von der Ballendichte und dem Durchwurzelungsgrad abhängig. Bei gleichem Substrat sind dichtere, kräftig durchwurzelte Ballen stabiler als lockere, schlecht durchwurzelte. Der Einfluß des Substratwassergehaltes ist zu vernachlässigen. Umhüllte, gepreßte Ballen zeigen die höchste Stabilität.

Eine dynamische Belastung des Wurzelballens führt zu Verformung und Lockerung des Wurzelverbandes, wobei eine einmalige Belastung zu keiner Beeinträchtigung des Ballengefüges führt. Mehrmalige Belastungen sind zu vermeiden. Der Substratverlust durch eine dynamische Belastung liegt unter 10 % des Ausgangsgewichtes.

Das dritte Teilziel war, den Gesamtprozeß der Einbettung von Gemüsejungpflanzen in den Boden zu erfassen. Es wird deutlich gemacht, daß ein optimaler Anwacherfolg nur dann gegeben ist, wenn alle Einflußfaktoren exakt aufeinander abgestimmt sind.

Die Feinheit des Pflanzbettes muß sich nach der Wurzelballengröße richten. Kleine Ballen verlangen ein feineres Pflanzbett als großvolumige Wurzelballen.

Jungpflanzen verlieren nach der Pflanzung Wasser über Transpiration, Verdunstung und Wasserleitung aus dem Ballen in den Boden aufgrund des hydraulischen Gefälles. Durch eine tiefe Pflanzung in feuchte Bodenschichten, punktförmiges Bewässern bei der Pflanzung, Verwendung von Wurzelballen mit maximaler Wasserkapazität oder einer Überkopfbewässerung nach der Pflanzung sind Ausfälle zu reduzieren. Unterschiede bei der Einbettung sind zum Teil durch Bewässerung auszugleichen.

Das Jungpflanzen-Anzuchtverfahren und die Pflanztechnik müssen aufeinander zugeschnitten sein.

Durch eine optimale Abstimmung von Furchenschar, Pflanzenablage und Druckrollen ist eine qualitative hochwertige Pflanzung möglich. Schare mit geringem Bodenaufwurf und langen Flanken sind zu bevorzugen. Die Pflanzenablage sollte möglichst pflanzenschonend erfolgen. Eine Schädigung der Pflanzen durch praxisübliche Pflanzenablageverfahren ist nicht zu erwarten. Der durch die Druckrollen ausgelöste Pflanzdruck am Ballen darf nicht zu groß sein, um ein Verdichten des Wurzelballens zu vermeiden, damit kein im Ballen gebundenes Wasser in den umgebenden Boden ausgepreßt wird. Andererseits muß das vollkommene Schließen der Furche gewährleistet sein.

11. Literaturverzeichnis

B i r k e n s h a w, J.E., D.C. W u r r und J.R. F e l l o w s: The influence of ventilation temperature and plant raising method on the yield of early summer cauliflowers. - Journal of Hort. Science 57, 1982, S. 357 - 363

B l a c k w e l l, P.S. und B. S o a n e: Deformable spherical devices to measure stresses within field soils. - Journal of Terramech., Oxford, New York 15, 1978, H. 4, S. 207 - 222

B o a, W., E.F. C o x, J.E. B i r k e n s h a w, D.K. F o s t e r und D. S e n i o r: The establishment and yields of vegetable crops grown from blocks design for automatic transplanting. - Expl. Hort. 31, 1979, S. 26 - 34

B o l l i n g, I.: Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen - Neue Meß- und Rechenmethoden. - Dissertation der Fakultät für Maschinenwesen, München, Forschungsbericht Agrartechnik, 1987

B o l l i n g, I. und W. S ö h n e: Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. - Landtechnik, 2, 1982, S. 56 - 57

B o o d t, de M. und O. V e r d o n c k: The physical properties of the substrates in horticulture. - Acta Horticulturae Nr. 26, 1972

B r ü c k n e r, B.: Die Wasserversorgung als Einflußfaktor für den Anwachs-erfolg von Jungpflanzen. - Diplomarbeit am Institut für Landtechnik, Freising-Weißenstephan, 1987

B u n t, A.C.: Modern potting composts. - Georg Allen u. Unwin Ltd., London, 1976

C o s t e l l o, L. und J.L. P a u l: Moisture relations in transplanted container plants. - Hort. Science 10, 1975, Nr. 4, S. 371 - 372

C o x, E.F.: The effect of shape of compost blocks on the propagation, transplant establishment and yield of four vegetable species. - Journal of Hort. Science 59, 1984 a, H. 2, S. 205 - 212

C o x, E.F.: The effects of irrigation on the establishment and yield of lettuce and leek transplants raised in peat blocks. - Journal of Hort. Science 59, 1984 b, Nr. 4, S. 431 - 437

C o x, E.F.: The influence of water supply on the establishment of transplanted lettuce seedlings raised in paperpots. - Journal of Hort. Science 59, 1984 c, Nr. 1, S. 95 - 99

C s i z i n s k y, A.A.: Effect of transplant container cell size and fertilizer levels on cauliflower and cabbage yields in full bed mulch culture. - Hort. Science 18, 1983, Nr. 4, S. 566

C z e r a t z k i, W.: Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. - Landbauforschung Völkenrode 22, 1972, S. 29 - 36

- C z e r a t z k i, W.: Die Charakterisierung von bearbeitungsbeeinflußten Bodeneigenschaften in Beziehung zum Pflanzenwachstum. - Landbauforschung Völkenrode 16, 1966, S. 37 - 44
- D u f a u l t, J.R. und L. I r. W a t e r s: Container size influences broccoli and cauliflower transplant growth but not yield. - Hort. Science 20, 1984, Nr. 4, S. 682 - 684
- E s t l e r, M.: Bodenbearbeitung aktuell. - BLV-Verlag, München, 1984
- F r e i t a g, D.R.: Methods of measurig soil compaction, chapter 3. - In: Compaction of Agricultural Soils, Barnes et al., ASAE-Monograph, 1971, S. 7 - 106
- F r i t z, D. und W. S t o l z: Erwerbsgemüsebau - Handbuch des Erwerbsgärtners. - Ulmer Verlag, Stuttgart, 9. Auflage, 1989
- G e y e r, M.: Der Einfluß der Einbettung auf den Anwacherfolg von Gemüsejungpflanzen im Freiland - Nicht veröffentlicht, 1987
- G u t s e r, R.: Erden und Substrate im Gartenbau. - Vorlesung 1984/85
- H a n k s, R.J. und G.L. A s h c r o f t: Applied soil physics. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980
- H a r t g e, K.H.: Die physikalische Untersuchung von Böden. - Encke Verlag, 1971
- H o r n, R.: Die Ermittlung der vertikalen Druckfortpflanzung im Boden mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. - Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 21, 1980, S. 343 - 349
- H o r n, R.: Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. - Z. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde 149, 1986, S. 9 - 18
- K a n a f o j s k i, C.: Dünge-, Sä- und Pflanzmaschinen. - VEB Verlag Technik Berlin, Reihe Landmaschinentechnik, 1967
- K n i t t e l, H.: Auswirkungen der Minimalbestelltechnik auf physikalische Bodeneigenschaften. - Dissertation, Weihenstephan, 1975
- K n i t t e l, H. und H. S t a n z e l: Untersuchung des Bodengefüges mit Penetrometer und Rammsonde. - Acker- und Pflanzenbau, Bd. 142, H. 3, 1976, S. 181 - 193
- K o o l e n, A.J. und H. K u i p e r s: Agricultural soil mechanics. - Springer Verlag, Berlin, 1983
- K r a t k y, B.A. et al.: Effects of container size, transplantage, and plant spacing on chinese cabbage. - J. Amer. Soc. Hort. Sci. 107, 1982, Nr. 2, S. 345 - 347
- K r a t k y, B.A., E.F. C o x und J.M.T. M c. K e e: Effects of block and soil water content on the establishment of transplanted cauliflower seedlings. - Journal of Hort. Science 55, 1980, Nr. 3, S. 229 - 234

- K r i c k, G.: Die Wechselbeziehungen zwischen starrem Rad, Luftreifen und nachgiebigem Boden. - Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik, München, 1971
- K r o m e r, K.H., A. S t r u z i n a und L. H ü s g e s: Verfahrenstechnik bei Gemüse-Pflanzkulturen. - KTBL-Arbeitspapier Nr. 128, 1988
- K u p e r s, L.J.P.: Das Sproß/Wurzel-Verhältnis der Pflanzen und seine Wirkung auf die Trockensubstanz- und Nährstoffverteilung, dargestellt an der Zuckerrübe. - Kali-Briefe (Büntehof) 14 (1), 1978, S. 29 - 43
- L a b o w s k y, H.-J.: Moderne Pflanztechniken bei Gemüse. - Deutscher Gartenbau 38, 1984 a, S. 1620 - 1621
- L a b o w s k y, H.-J.: Neue Jungpflanzen-Anzuchtverfahren bald auch bei uns? - Gemüse 20, 1984 b, S. 261 - 263
- L a b o w s k y, H.-J.: Neuheiten aus Liempde. - Gemüse 25, 1989, S. 338 - 341
- L i u, F. und E. F ö l s t e r: Kleintopfsysteme bei Sellerie. - Deutscher Gartenbau 16, 1988, S. 1012 - 1015
- L o o m i s, W.E.: Studies in the transplanting of vegetable plants. - Memoirs, Cornell Univ. Agric. Exp. St. 87, 1925
- M a f f, N.N.: Vegetable propagation in cellular trays. - Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Crown Copyright, 1985
- M a r v e l, M.E. und J.R. H a v i s: The influence of depth of transplanting on size and shape of head lettuce. - Prof. Americ. Soc. Hort. Sci. 59, 1952, S. 372 - 376
- M c. K e e, J.M.T.: Physiological aspects of transplanting vegetables and other crops - II. Methods used to improve transplant establishment. - Hort. Abstracts 51, 1981, No. 6, S. 355 - 368
- M i l l e r, C.H., W.E. S p l i n t e r und F.S. W r i g h t: The effect of cultural practices on the suitability of cabbage for once-over-harvest. - J. Americ. Soc. Hort. Sci. 94, 1969, S. 67 - 69
- M o r r i s o n, J.E. und E.Y. E l m o n: Uniformity of tobacco seedlings grown in containers. - Transactions of the ASAE, 1975, S. 1032 - 1034
- M o s e r, E.: Verfahrenstechnik Intensivkulturen - Lehrbuch der Agrartechnik, Band 4. - Pareys Studentexte, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1984
- M ü l l e r, Th. und H.D. H a r t m a n n: Jungpflanzengröße und Ertrag bei Kopfsalat. - Gemüse 11, 1985, S. 420 - 422
- O n a f e k o, O. und A.R. R e e c e: Soil stresses and deformation beneath rigid wheels. - Journal of Terramech. 4, 1967, Nr. 1, S. 59 - 80
- O t t, W.: Pflanzgröße bei Blumenkohl. - Gemüse, 1980, Nr. 16, S. 156 - 157

P e t k o v, C. und R. T r a j a n o v: Izsledvane vurkhu procesa na zatvarjane na brazdata pri razsadosadachnite mashini. (Untersuchungen zur Furchenschließung bei Pflanzmaschinen). - Selskostopanaka Techn., Sofija 15, 1978, 5, S. 46 - 59

P i e t s c h, H.: Zur Berechnung von Kräften an Bodenbearbeitungswerkzeugen mit besonderer Berücksichtigung von Drängeräten. - Dissertation, Institut für Kraftfahrtechnik, Förderwesen und Agrartechnik, Lehrstuhl für Landmaschinen, München, 1977

P o p e, R.G.: The effect of sinkage rate on pressure sinkage relationship on rolling resistance in real and artificial soils. - Journal of Terramech. 6, 1969, Nr. 4, S. 31 - 38

P o r t u g a l, H. et al.: Influence of transplanting depth on cabbage production. - Solo, Piracicaba, Sp. 76, 1984, Nr. 2

P u s t j ä r v i, V.: Physical properties of peat used in horticulture. - Acta Horticulturae Nr. 37, 1974

R o g a s i k, H. und K.-H. M o r s t e i n: Analyse des Verdichtungsvorganges in sandigen Substraten auf der Basis von Messungen der bleibenden und elastischen Verformung. - Arch. Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde, Berlin 31, 1987, H. 9, S. 563 - 572

S a b o t a, C.M. und J.D. D o w n e s: Onion growth and yield in relation to transplant pruning, size, spacing and depth to planting. - Hort. Science 16, 1981, Nr. 4, S. 533 - 535

S c h a a f, D.F.: The development of performance data on seed drill furrow opener. - ASAE-Paper Nr. 1016, 1979

S c h a a f, D.E.: Development of performance data on seed drill coulters and press wheels. - D.R.E.A.M.-Project, Contract #OSZ79-00015, 1981

S c h e f f e r, F. et al.: Lehrbuch der Bodenkunde. - Enke Verlag, Stuttgart, 10. Auflage, 1979

S m i t h, I.E.: Research into the seedling system of raising vegetable seedlings in South Africa. - Acta Horticulture 194, 1986, S. 173 - 187

S o m m e r, C.: Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. - Landtechnik 40, 1985, H. 9, S. 378 - 383

S o m m e r, C. und M. Z a c h: Bodenverdichtungen und deren Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung und den Ertrag. - KTBL-Schrift Nr. 308, 1986

S ö h n e, W.: Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. - Grundlagen der Landtechnik, H. 1, 1951, S. 87 - 94

S ö h n e, W.: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. - Grundlagen der Landtechnik, H. 3, 1952, S. 51 - 59

S ö h n e, W.: Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. - Grundlagen der Landtechnik, H. 3, 1953, S. 49 - 63

S ö h n e, W.: Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. - Grundlagen der Landtechnik 6, 1956, H. 7, S. 11 - 27

S t a t i s t i s c h e s B u n d e s a m t f ü r E r n ä h r u n g, L a n d - w i r t s c h a f t u n d F o r s t e n: Erhebung 1989. - Gemüse 4, 1989, S. 207

S t r u z i n a, A.: Pflanzmaschinen und -geräte für Gemüse - Bauarten und Typentabellen. - KTBL-Arbeitsblatt Nr. 0647, 1986

T a y l o r, H.M. und L.F. R a t c l i f f: Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strenght and soil water content. - Soil Science 108, 1969, Nr. 2, S. 113

V e r m a, B.P., A.C. B a i l e y, R.L. S c h a f e r und J.G. F u t r a l: A pressure transducer in soil compaction study. - Trans. ASAE, St. Joseph 19, 1976, H. 3, S. 442 - 447

V i n c e n t, E.T.: Pressure distribution on and flow of sand past a rigid wheel. - Land Locomotion Laboratory, U.S. Army, Ordnance Tank Automotive Command, Detroit, 1961

W a h o d e, J.: Entwicklung einer Methode zur quantitativen Erfassung von Rückverfestigungen im Saatbett. - Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Bonn, 1985

W a n g, J.K., B.A. K r a t k y und B.O.T. H u: A new horizont in greenhouse vegetable production. - Transactions of the ASAE, 1979, S. 1012 - 1015

W e n n e r, H.L.: Landtechnik und Bauwesen. Maschinen - Gebäude - Arbeit. - BLV-Verlag, München, Bern, Wien, 1982

W i l k i n s, D.E. et al.: Grain drill opener effects on wheat emergence. - Trans. ASAE, 1983, S. 651 - 655/660

Y o n t s, C.D., J.A. S m i t h, R.G. W i l s o n, J.G. R o b b und E.D. K e r r: Optimizing sugarbeet transplant spacing and container length. - ASAE-Paper Nr. 84-1517, 1984, St. Joseph

Z i n k, F.W. et al.: Effects of size, partial defoliation, and root pruning of transplants of yield of celery. - Proc. Americ. Soc. Hort. Sci., 1964, S. 386 - 392

Statistik

A u e r n h a m m e r, H.: MIWERT (Mittelwertanalyse). - Programmbibliothek der Landtechnik Weihenstephan, 1978

B a c k h a u s, K. et al.: Multivariable Analysemethoden. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Auflage, 1987

S a c h s, L.: Angewandte Statistik. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 6. Auflage, 1984

S c h u b o, W. und H.M. K e h l i n g e r: Handbuch zum Programmpaket SPSSX, Version 2.2. - Fischer Verlag, Stuttgart 1986

W e b e r, E.: Grundriß der biologischen Statistik. - Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1972

12. Anhang

Berechnung der verdrängten Fläche z_F (für zwei Druckrollen)

Für $z > \sin\alpha \cdot B$ gilt (siehe Abb. A3.1, a):

$$z_F = 2 (A_X - A_Y) \quad (1)$$

$$A_X = z' \cdot B \quad (2)$$

$$z' = z / \cos\alpha \quad (3)$$

aus (3) in (2) folgt :

$$A_X = \frac{z \cdot B}{\cos\alpha} \quad (4)$$

$$A_Y = \frac{y' \cdot B}{2} \quad (5)$$

$$y' = B \cdot \tan\alpha \quad (6)$$

aus (6) in (5) folgt :

$$A_Y = \frac{B^2 \cdot \tan\alpha}{2} \quad (7)$$

aus (7) und (4) in (1) folgt :

$$z_F = 2 \cdot \left[\frac{z \cdot B}{\cos\alpha} - \frac{B^2 \cdot \tan\alpha}{2} \right] \quad (8)$$

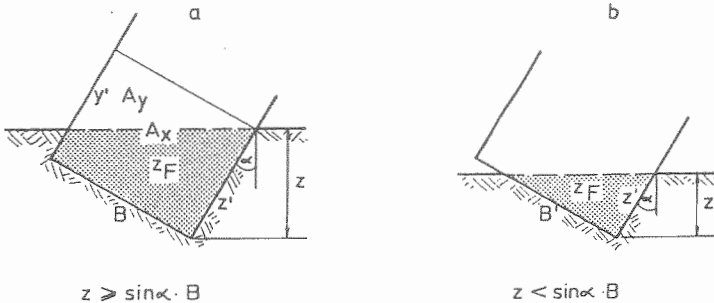


Abbildung A3.1 a, b: Von Druckrollen verdrängte Bodenfläche z_F

Für $z < \sin\alpha * B$ gilt (siehe Abb. A3.1, b):

$$z_F = 2 * \left[\frac{z' * B'}{2} \right] \quad (9)$$

$$B' = z / \sin\alpha \quad (10)$$

aus (3) und (10) in (9) folgt :

$$z_F = 2 * \left[\frac{z^2}{\sin 2\alpha} \right] \quad (11)$$

Berechnung der Rollenaufstandsfläche z_A (Für zwei Rollen)

Für $z \geq \sin \alpha \cdot B$ gilt (siehe Abb. A3.2):

$$z_A = U_M \cdot B \quad (1)$$

$$\text{mit } U_M = \frac{\pi \cdot 2\gamma \cdot r}{180} \quad (2)$$

$$\cos \gamma = \frac{(r - z_M)}{r} \quad (3)$$

$$z_M = z' - s \quad (4)$$

$$z' = z / \cos \alpha \quad (5)$$

$$s = \frac{\tan \alpha \cdot B}{2} \quad (6)$$

aus (5) und (6) in (4) folgt:

$$z_M = \frac{z}{\cos \alpha} - \frac{\tan \alpha \cdot B}{2} \quad (7)$$

Für $z < \sin \alpha \cdot B$ gilt:

$$B = B' = \frac{z}{\sin \alpha} \quad (8)$$

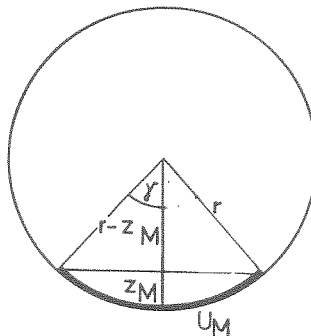
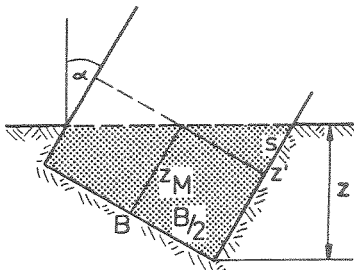


Abbildung A3.2: Rollenaufstandsfläche z_A von Druckrollen

Berechnung des verdrängten Bodenvolumens z_V (Für zwei Rollen)

für $z'_2 < 2r$ gilt (siehe Abb. A3.3):

$$\text{aus } V = \int_{x_1}^{x_2} A \cdot dx \quad (1)$$

$$\text{mit } A = r^2 \cdot (\hat{\beta} - \sin\beta \cdot \cos\beta) \quad (2)$$

$$\cos\beta = 1 - z' / r \quad (3)$$

$$\text{bzw. } \beta = \arccos(1 - z' / r) \quad (4)$$

$$\tan\alpha = dz' / dx \quad (5)$$

$$z'_1 = \frac{z - (\sin\alpha \cdot B)}{\cos\alpha} \quad (6)$$

und

$$z'_2 = \frac{z}{\cos\alpha} \quad (7)$$

folgt

$$V = r^3 \cdot \cot\alpha \cdot (f(z'_2) - f(z'_1)) \quad (8)$$

$$f(z'_{1,2}) = \sin\beta - \hat{\beta} \cdot \cos\beta - 1/3 \cdot \sin^3\beta \quad (9)$$

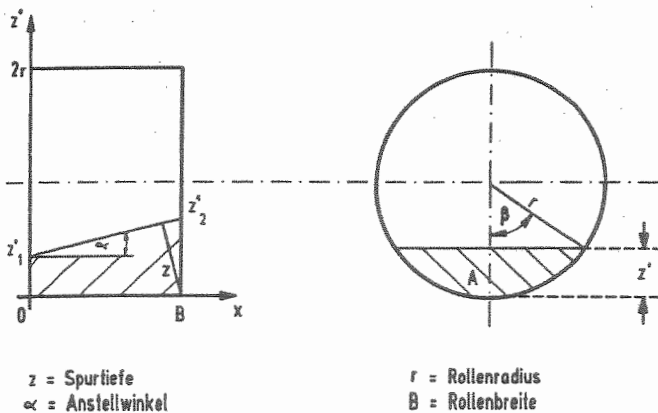


Abbildung A3.3: Von Druckrollen verdrängtes Bodenvolumen z_V

09-08-1987

13:32:22

Datendatei: 18-6

*****	Kanal 1: 3535 / 1130	Max/Min	0 Kal.wert
.....	Kanal 2: 3389 / 1104	Max/Min	0 Kal.wert
oooooooo	Kanal 3: 3525 / 1025	Max/Min	0 Kal.wert

Anzahl der Messdaten: 282
Messdauer : 38 Sekunden
Geschwindigkeit : 7 Daten/s
Frequenz : .1347518 1/s

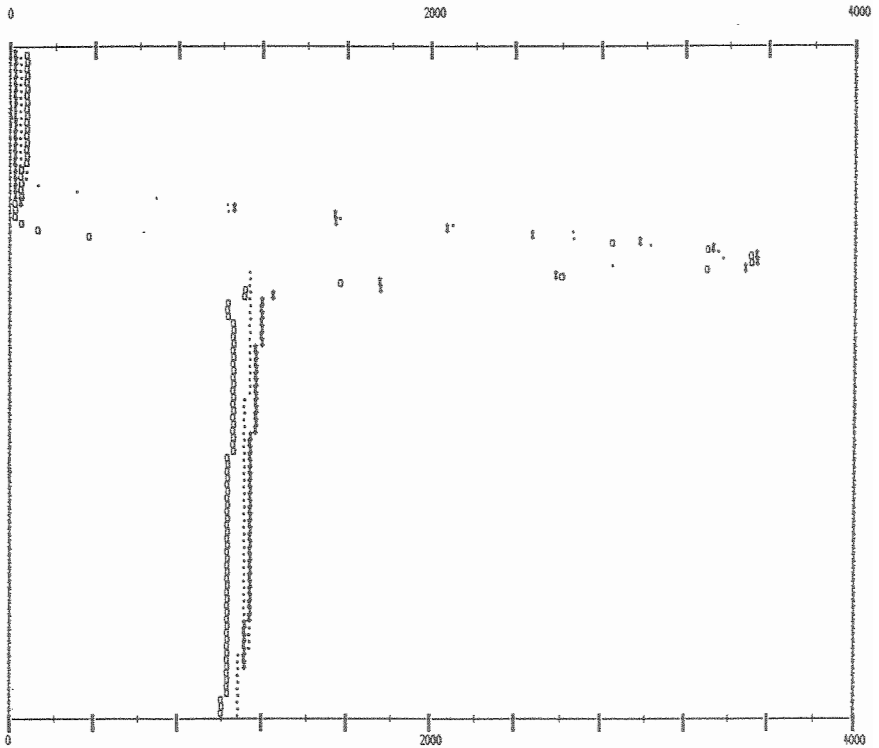


Abbildung A4.1: Protokoll der Sondendruckmessungen (Sondendruck μV) von 3 Drucksonden aufgetragen über der Meßzeit (38 s)

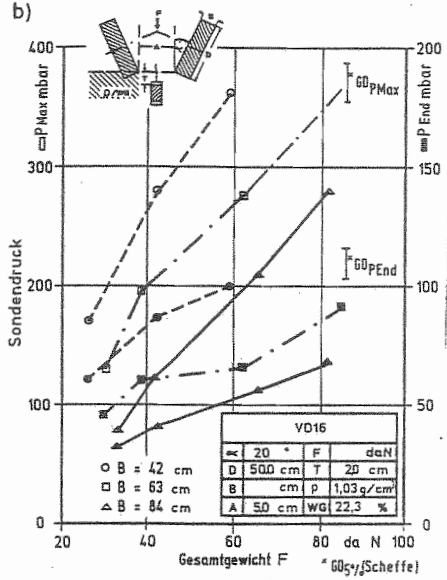
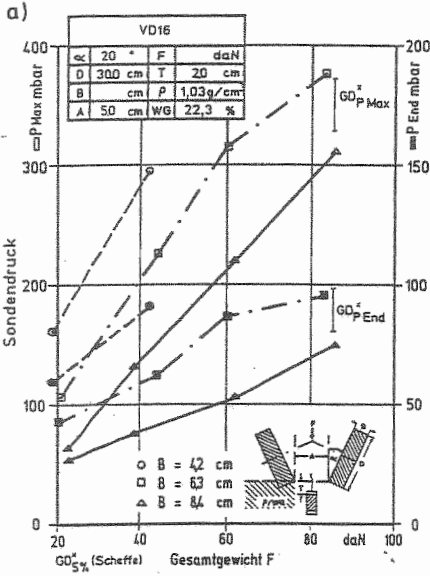


Abbildung A4.2 a, b: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtwicht und der Rollenbreite bei Rollendurchmesser von 30 cm (a) und 50 cm (b)

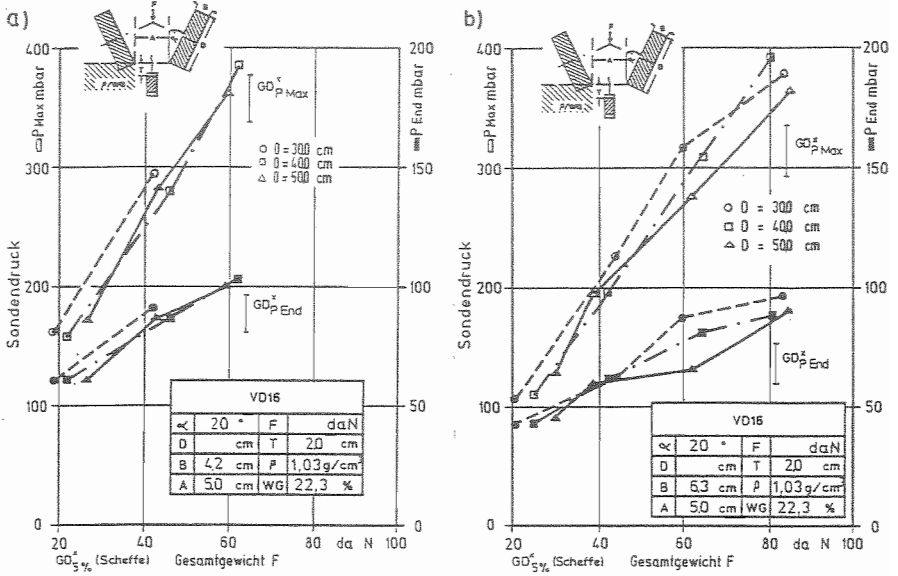


Abbildung A4.3 a, b: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtwicht und dem Rollendurchmesser bei Rollenbreiten von 4.2 cm (a) und 6.3 cm (b)

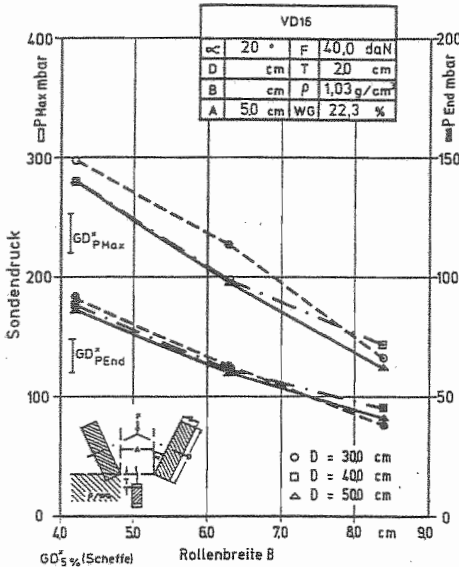


Abbildung A4.4: Sondendruck in Abhängigkeit von der Druckrollenbreite und dem Rollendurchmesser

Tabelle A4.1: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht bei einem Durchmesser von 40 cm

VD1 F - daN D 40.0 cm B 6.3 cm A 5.0 cm
 α 20 ° ρ 0.9 g/cm³ WG 21.8 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		22.3	40.2	61.8	80.0
P _{Max}	20	91.9 a*	194.3 b	302.8 c	409.5 d
P _{End}	20	34.8 a	62.4 b	80.2 c	100.5 d
P _{Max/End}	20	2.64	3.11	3.78	4.08

* SCHEFFE ($\alpha_j = 0,05$)

Tabelle A4.2: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollengesamtgewicht bei einem Durchmesser von 50 cm

VJD3 F - daN D 50.0 cm B 6.3 cm A 5.0 cm
 α 20 ° ρ 0.9 g/cm³ WG 22.6 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		24.8	39.2	60.9	82.5
P _{Max}	20	98.7 a*	161.4 b	270.1 c	327.7 d
P _{End}	20	39.2 a	51.5 b	78.0 c	95.5 d
P _{Max/End}	20	2.52	3.19	3.46	3.43

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.3: z, z_F, z_A und z_V in Abhängigkeit von der Druckrollenbreite und vom Druckrollendurchmesser bei 40.0 daN Rollengesamtgewicht

ZVD16 F 40.0 daN D - cm B - cm
 α 20 ° ρ 1.03 g/cm³ WG 22.3 %

Bodenver- formung	Durch- messer (cm)	Druckrollenbreite (cm)		
		4.2	6.3	8.4
z (cm)	30.0	3.40 de	2.85 c	2.55 b
	40.0	3.45 e*	2.95 c	2.39 b
	50.0	3.26 d	2.56 b	2.07 a
z _F (cm ²)	30.0	24.06 cd	24.34 cd	19.72 b
	40.0	24.82 cd	25.08 d	18.52 b
	50.0	23.08 c	19.54 b	13.62 a
z _A (cm ²)	30.0	78 a	95 bc	95 bc
	40.0	90 ab	113 d	102 bcd
	50.0	107 cd	113 d	91 ab
z _V (cm ₃)	30.0	147 d	128 c	92 ab
	40.0	183 e	153 d	100 b
	50.0	179 e	121 c	76 a

* TUKEY ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.4: z , z_F , z_A und z_V in Abhängigkeit von der Druckrollenbreite und vom Druckrollendurchmesser bei 60.0 daN Rollengesamtgewicht

ZVD16 F 60.0 daN D - cm B - cm
 α 20 ° ρ 1.03 g/cm³ WG 22.3 %

Bodenverformung	Durchmesser (cm)	Druckrollenbreite (cm)		
		4.2	6.3	8.4
z (cm)	30.0	-	3.71 d	3.27 bc
	40.0	4.51 e*	3.47 cd	3.16 b
	50.0	4.36 e	3.42 bc	2.81 a
z_F (cm ²)	30.0	-	35.24 c	33.10 bc
	40.0	33.98 bc	32.44 bc	30.74 b
	50.0	32.46 bc	31.60 b	25.62 a
z_A (cm ²)	30.0	-	118 b	130 d
	40.0	108 a	127 cd	145 e
	50.0	119 bc	141 e	143 e
z_V (cm ³)	30.0	-	213 bc	179 ab
	40.0	281 d	223 c	188 ab
	50.0	277 d	240 c	169 a

* TUKEY ($\alpha_1 = 0,05$)

Tabelle A4.5: z , z_F , z_A und z_V in Abhängigkeit von der Druckrollenbreite und vom Druckrollendurchmesser bei 80.0 daN Rollengesamtgewicht

ZVD16 F 80.0 daN D - cm B - cm
 α 20 ° ρ 1.03 g/cm³ WG 22.3 %

Bodenverformung	Durchmesser (cm)	Druckrollenbreite (cm)		
		4.2	6.3	8.4
z (cm)	30.0	-	4.75 d*	3.83 b
	40.0	-	4.11 c	3.71 b
	50.0	-	3.88 bc	3.41 a
z_F (cm ²)	30.0	-	49.44 d	43.50 c
	40.0	-	40.64 bc	41.00 bc
	50.0	-	38.00 ab	35.38 a
z_A (cm ²)	30.0	-	137 a	148 bc
	40.0	-	144 ab	166 d
	50.0	-	154 c	173 d
z_V (cm ³)	30.0	-	349 c	262 a
	40.0	-	304 b	279 ab
	50.0	-	315 bc	255 a

* TUKEY ($\alpha_1 = 0,05$)

Tabelle A4.6: Sondendruck in Abhängigkeit von Druckrollengesamtgewicht und Anstellwinkel für einen Druckrollendurchmesser von 40 cm

VD1 F - daN D 40.0 cm B 6.3 cm A 5.0 cm
 α - ° ρ 0.9 g/cm³ WG 21.8 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		22.3	40.2	61.8	80.0
P _{Max}	10	69.0 a*	151.2 c	206.0 d	293.6 e
	20	91.9 ab	194.3 d	302.8 e	409.5 f
	30	118.2 bc	269.5 e	391.8 f	432.0 f
P _{End}	10	29.1 a	53.5 b	69.2 cde	80.4 def
	20	34.8 a	62.4 bc	80.2 def	100.5 g
	30	37.4 a	65.9 bcd	81.2 ef	84.9 f
P _{Max/End}	10	2.37	2.83	2.98	3.65
	20	2.64	3.11	3.78	4.07
	30	3.16	4.09	4.83	5.09

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.7: Sondendruck in Abhängigkeit von Druckrollengesamtgewicht und Anstellwinkel für einen Druckrollendurchmesser von 50 cm

VD3 F - daN D 50.0 cm B 6.3 cm A 5.0 cm
 α - ° ρ 0.9 g/cm³ WG 22.6 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Winkel (°)	Druckrollengesamtgewicht (daN)			
		24.8	39.2	60.9	82.5
P _{Max}	10	79.9 a*	116.6 bc	186.8 e	235.9 f
	20	98.7 ab	161.4 de	270.1 fg	327.7 h
	30	150.4 cd	278.5 g	421.3 i	555.4 k
P _{End}	10	35.0 a	45.7 ab	61.7 bc	78.1 d
	20	39.2 ab	51.5 b	78.0 d	95.5 e
	30	47.9 ab	74.1 cd	93.7 e	107.7 e
P _{Max/End}	10	2.28	2.53	3.02	3.02
	20	2.52	3.13	3.46	3.43
	30	3.14	3.76	4.50	5.16

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.8: Sondendruck in Abhängigkeit von der Druckrollenbreite und vom Anstellwinkel

VD17 F 41.6 daN D 40.0 cm B - cm A 5.0 cm
 α - ° ρ 1.03 g/cm³ WG 22.4 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Winkel (°)	Druckrollenbreite (cm)		
		8.4	6.3	4.2
P _{Max}	10	109.4 a*	143.1 a	189.3 b
	20	139.0 a	195.8 b	260.6 c
	30	207.1 b	280.9 c	391.9 d
P _{End}	10	41.5 a	43.8 a	48.0 ab
	20	46.4 ab	61.6 bc	69.4 c
	30	71.9 c	87.7 d	96.9 d
P _{Max/End}	10	2.64	3.27	3.94
	20	3.00	3.18	3.76
	30	2.88	3.20	4.04

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.9: Sondendruck in Abhängigkeit von der Meßtiefe und vom Anstellwinkel

VD19 F 40.2 daN D 40.0 cm B 6.3 cm A 5.0 cm
 α - ° ρ 0.96 g/cm³ WG 23.7 % T - cm

Sonden druck (mbar)	Winkel (°)	Meßtiefe (cm)				
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
P _{Max}	10	115.4 a*	149.2 b	135.6 ab	115.4 a	106.4 a
	20	194.7 cd	207.5 ce	189.7 c	157.0 b	137.4 ab
	30	229.5 ef	252.7 f	221.7 df	205.5 ce	155.2 b
P _{End}	10	37.7 a	55.6 bc	56.0 bd	50.9 ab	48.8 ab
	20	53.9 bc	64.9 ce	69.0 de	61.7 be	56.9 bc
	30	52.8 ac	73.4 e	72.8 e	72.0 e	61.5 be
P _{Max/End}	10	3.06	2.68	2.42	2.27	2.18
	20	3.61	3.20	2.75	2.54	2.41
	30	4.35	3.44	3.05	2.85	2.52

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.10: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand

VD13 F 40.2 daN D 40.0 cm B 6.3 cm A - cm
 α 20 ° ρ 1.03 g/cm³ WG 23.0 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Druckrollenabstand (cm)				
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
P _{Max}	217.2 e*	182.3 d	133.4 c	117.4 bc	104.2 b
P _{End}	64.7 d	56.8 c	43.0 b	43.2 b	34.7 a
P _{Max} /P _{End}	3.36	3.21	3.10	2.72	3.00
	Druckrollenabstand (cm)				
	9.2	10.2	-	-	-
P _{Max}	76.5 a	79.8 a	-	-	-
P _{End}	30.2 a	32.8 a	-	-	-
P _{Max} /P _{End}	2.53	2.43	-	-	-

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)

Tabelle A4.11: Sondendruck in Abhängigkeit vom Druckrollenabstand

VD15 F 59.7 daN D 40.0 cm B 6.3 cm A - cm
 α 20 ° ρ 1.04 g/cm³ WG 22.9 % T 2.0 cm

Sondendruck (mbar)	Druckrollenabstand (cm)				
	4.0	5.2	5.7	6.8	7.5
P _{Max}	336.3 g*	311.3 g	269.5 f	215.8 e	178.6 d
P _{End}	83.5 cd	92.9 d	74.8 c	71.2 c	54.1 b
P _{Max} /P _{End}	4.03	3.35	3.60	3.03	3.30
	Druckrollenabstand (cm)				
	8.6	9.8	11.5	13.6	-
P _{Max}	145.7 c	118.1 bc	104.0 ab	79.8 a	-
P _{End}	47.3 b	42.7 ab	39.6 ab	31.9 a	-
P _{Max} /P _{End}	3.08	2.76	2.62	2.50	-

* SCHEFFE ($\alpha_i = 0,05$)