

Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
der Georg-August-Universität zu Göttingen

**Wachstum und Ertrag von Getreide
nach mechanischer Bodenbelastung in
unterschiedlichen Bearbeitungssystemen**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
(Dr. sc. agr.)
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Karl-Theodor Mähner
geboren in Hamm/Westfalen

Göttingen, Mai 1999

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft

D 7

Referent: Prof. Dr. W. Ehlers

Korreferent: Prof. Dr. M. Runge

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.1999

Diese Dissertation ist als elektronische Dissertation auf dem Dokumentenserver der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen im Internet veröffentlicht.

<http://www.sub.uni-goettingen.de>

Inhaltsverzeichnis

	Verzeichnis der Abkürzungen.....	6
	Verzeichnis der Abbildungen.....	7
	Verzeichnis der Tabellen.....	11
	Kurzfassung.....	14
1	Einleitung	15
2	Versuchskonzept	17
3	Material und Methoden.....	20
3.1	Versuchsanlage und Standortbeschreibung.....	20
3.1.1	Einrichtung der mechanischen Bodenbelastung	20
3.1.2	Pflanzenbauliche Maßnahmen	22
3.1.3	Standort Reinshof.....	23
3.1.3.1	Versuchsfläche	23
3.1.3.2	Klima.....	25
3.1.4	Standort Relliehausen	26
3.1.4.1	Versuchsfläche	26
3.1.4.2	Klima.....	28
3.1.5	Standort Großobringen.....	29
3.1.5.1	Versuchsfläche	29
3.1.5.2	Klima.....	31
3.2	Bodenphysikalische Untersuchungen.....	32
3.2.1	Bodenwassergehalt	32
3.2.2	Eindringwiderstand	34
3.2.3	Gasdiffusion.....	35
3.2.4	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit.....	36
3.3	Bestandesentwicklung	37
3.3.1	Pflanzendichte	37
3.3.2	Wurzelsystem	37
3.3.2.1	Profilwandmethode	37
3.3.2.2	Bruchflächenmethode	38
3.3.2.3	Wurzeldurchmesser.....	39
3.3.3	Oberirdische Trockenmasse.....	40
3.3.4	Blattfläche.....	41
3.3.5	Bestandeshöhe.....	41
3.3.6	Fahnenblattlänge.....	42
3.3.7	Wachstumsstadien	42
3.3.8	Gesamtwasserpotential	42
3.3.9	Gaswechsel der Kulturpflanzen.....	43
3.3.9.1	Ableitung von Stoffwechselkenngrößen	44
3.3.9.1.1	CO ₂ – Assimilationsrate.....	44
3.3.9.1.2	Transpirationsrate.....	45
3.3.9.1.3	Stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf.....	45

	Seite
3.4	Untersuchungen von Ertragsbildung und Ertrag..... 45
3.4.1	Ährendichte und Kornbesatz der Ähre..... 45
3.4.2	Korn und Strohertrag 46
3.4.3	Einzelkornmasse 47
3.4.4	Ernteindex 47
3.4.5	Berechneter Ertrag 48
3.5	Statistische Auswertung 48
4	Ergebnisse..... 49
4.1	Bodenphysikalische Eigenschaften 49
4.1.1	Eindringwiderstand 49
4.1.2	Transportfunktionen..... 55
4.1.2.1	Gasdiffusion..... 55
4.1.2.2	Ungesättigte Wasserleitfähigkeit 61
4.2	Bestandesentwicklung 65
4.2.1	Wurzelsystem 65
4.2.1.1	Standort Reinshof 65
4.2.1.2	Standort Relliehausen 72
4.2.1.3	Standort Großobringen 74
4.2.2	Oberirdische Trockenmasse und Blattfläche 76
4.2.2.1	Standort Reinshof 77
4.2.2.1.1	Versuchsjahr 1995 77
4.2.2.1.2	Versuchsjahr 1996 80
4.2.2.1.3	Versuchsjahr 1997 82
4.2.2.2	Standort Relliehausen 87
4.2.2.2.1	Versuchsjahr 1995 87
4.2.2.2.2	Versuchsjahr 1996 89
4.2.2.3	Standort Großobringen 92
4.2.2.3.1	Versuchsjahr 1995 92
4.2.2.3.2	Versuchsjahr 1996 92
4.2.2.3.3	Versuchsjahr 1997 94
4.2.3	Gaswechsel und Gesamtwasserpotential 96
4.3	Ertragsbildung und Ertrag..... 110
4.3.1	Standort Reinshof 111
4.3.1.1	Ertragsbildung 111
4.3.1.2	Ertrag 114
4.3.2	Standort Relliehausen 116
4.3.2.1	Ertragsbildung 116
4.3.2.2	Ertrag 119
4.3.3	Standort Großobringen 121
4.3.3.1	Ertragsbildung 121
4.3.3.2	Ertrag 125

	Seite
5	Diskussion 128
5.1	Auswirkungen der Bearbeitungssysteme und der mechanischen Bodenbelastung auf bodenphysikalische Eigenschaften..... 128
5.1.1	Eindringwiderstand 128
5.1.2	Transportfunktionen..... 134
5.2	Auswirkungen der Bearbeitungssysteme und der mechanischen Bodenbelastung auf die Bestandesentwicklung 140
5.2.1	Wurzelsystem 140
5.2.2	Oberirdisches Sproßwachstum..... 151
5.2.3	CO ₂ /H ₂ O Gaswechsel 156
5.2.4	Ertragsbildung und Ertrag..... 160
5.3	Konsequenzen für die pflanzenbauliche Praxis..... 166
6	Zusammenfassung 168
7	Literatur 171
8	Anhang 183

Verzeichnis der Abkürzungen und der verwendeten Einheiten

AG	Arbeitsgemeinschaft
BFD	Blattflächendauer [Tage]
BFI	Blattflächenindex [-]
Bl	Block
Bo	Bodenbearbeitungssystem
Bs	Belastungsstufe
Bt	Beprobungszeitpunkt [Tag des Jahres]
Do	O ₂ - Gasdiffusionskoeffizient in Luft [= 0,203 cm ² /s]
Ds	scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient [cm ² /s]
Ds/Do	relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient [-]
EC	Bezeichnung der Wachstumsstadien von Getreide nach ZADOKS et al. 1974
EDW	Eindringwiderstand [MPa]
EKM	Einzelkornmasse [mg]
EI	luftgefülltes Porenvolumen [cm ³ /cm ³]
FMW	Festboden-Mulchwirtschaft
GO	Standort Großobringen
GWL	Gesamtwurzellänge [km/m ²]
GWP	Gesamtwasserpotential der Pflanze [bar]
KBV	Krumenbasisverdichtung
ku	ungesättigte hydraulische Wasserleitfähigkeit [cm/Tag]
LBW	Lockerbodenwirtschaft
LBW flach	Lockerbodenwirtschaft, flach bearbeitet
LBW tief	Lockerbodenwirtschaft, tief bearbeitet
LK	Luftkapazität [Vol. %]
n	Anzahl der Messungen pro Parzelle
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung [μmol Photonen/m ² /s]
pF	dekadischer Logarithmus der Wasserspannung in cm Wassersäule
RH	Standort Reinshof
RL	Standort Relliehausen
SG	Sommergerste
T	Tiefe der untersuchten Bodenschicht [cm]
TM	Trockenmasse [g]
WG	Wintergerste
WLD	Wurzellängendichte [cm/cm ³]
WW	Winterweizen

Verzeichnis der Abbildungen	Seite
Abb. 1: Versuchsplan Standort Reinshof	24
Abb. 2: Niederschläge (Monatssummen) und Lufttemperatur (Monatsmittel) als langjähriges Mittel (1951-1980) und in den Jahren 1995, 1996 und 1997 auf dem Standort Reinshof	25
Abb. 3: Versuchsplan Standort Rellehausen	27
Abb. 4: Niederschläge (Monatssummen) als langjähriges Mittel (1969-1997) und in den Versuchsjahren 1995, 1996 und 1997 sowie die Lufttemperatur in Rellehausen	28
Abb. 5: Versuchsplan Standort Großobringen	30
Abb. 6: Niederschläge (Monatssummen) und Lufttemperatur (Monatsmittel) als langjähriges Mittel (1983-1997) und in den Jahren 1995, 1996 und 1997 auf dem Standort Großobringen	31
Abb. 7: Eindringwiderstand - Tiefenfunktionen des Standortes Reinshof der Jahre 1995, 1996 und 1997	50
Abb. 8: Eindringwiderstand - Tiefenfunktionen des Standortes Rellehausen der Jahre 1996 und 1997	51
Abb. 9: Eindringwiderstand - Tiefenfunktionen des Standortes Großobringen der Jahre 1996 und 1997	54
Abb. 10: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (EI) in Reinshof am 12.04.1995 in 28-34 cm Bodentiefe.....	56
Abb. 11: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (EI) in Rellehausen am 26.04.1995 in 28-34 cm Bodentiefe.....	58
Abb. 12: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (EI) in Großobringen am 24.03.1995 in 28-34 cm Bodentiefe	59
Abb. 13: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (EI) in Reinshof am 16.04.1997 in 28-34 cm Bodentiefe.....	60
Abb. 14: Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_u) und der Wasserspannung des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm am 12.04.1995 auf dem Standort Reinshof	62
Abb. 15: Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_u) und der Wasserspannung des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm am 26.04.1995 auf dem Standort Rellehausen	63
Abb. 16: Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_u) und der Wasserspannung des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm am 24.03.1995 auf dem Standort Großobringen	64
Abb. 17: Wurzelprofil für Sommergerste nach der Profilwandmethode im Versuchsjahr 1995 auf dem Standort Reinshof	66
Abb. 18: Wurzelprofil für Sommergerste nach der Profilwandmethode im Versuchsjahr 1997 auf dem Standort Reinshof	67
Abb. 19: Gesamtwurzellänge auf dem Standort Reinshof	69
Abb. 20: Wirkung der mechanischen Bodenbelastung und des Bearbeitungssystems auf den Wurzeldurchmesser von Winterweizen auf dem Standort Reinshof 1996	72
Abb. 21: Gesamtwurzellänge (GWL) und GWL in Oberboden (0-30 cm Bodentiefe, weiße Säulen) und Unterboden (von 30 cm Bodentiefe - maximale Durchwurzelungstiefe, schwarze Säulen) auf dem Standort Rellehausen	73

	Seite
Abb. 22: Gesamtwurzellänge (GWL) und GWL in Oberboden (0-30 cm Bodentiefe, weiße Säulen) und Unterboden (von 30 cm Bodentiefe – 50 cm Durchwurzelungstiefe, schwarze Säulen) auf dem Standort Großobringen	74
Abb. 23: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Sommergerste über die Zeit auf dem Standort Reinshof im Versuchsjahr 1995	78
Abb. 24: Bestandeshöhe der Sommergerste Reinshof 1995	79
Abb. 25: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Winterweizen über die Zeit auf dem Standort Reinshof im Versuchsjahr 1996	80
Abb. 26: Blattflächendauer (BFD) des Winterweizens vom Ende der Blüte (EC 69) bis zur mittleren Milchreife (EC 75) auf dem Standort Reinshof 1996 in Abhängigkeit von der Belastungsstufe.....	81
Abb. 27: Bestandeshöhe des Winterweizens Reinshof 1996	82
Abb. 28: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Wintergerste auf dem Standort Reinshof über die Zeit im Versuchsjahr 1997	83
Abb. 29: Blattflächendauer (BFD) der Wintergerste vom Ende der Blüte (EC 69) bis zur Gelbreife (EC 87) auf dem Standort Reinshof 1997 in Abhängigkeit von der Belastungsstufe.....	85
Abb. 30: Bestandeshöhe der Wintergerste Reinshof 1997	86
Abb. 31: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Sommergerste auf dem Standort Relliehausen über die Zeit im Versuchsjahr 1995	87
Abb. 32: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Winterweizen auf dem Standort Relliehausen über die Zeit im Versuchsjahr 1996	89
Abb. 33: Blattflächendauer (BFD) des Winterweizens vom Ende der Blüte (EC 69) bis zur mittleren Milchreife (EC 75) auf dem Standort Relliehausen 1996 in Abhängigkeit von der Belastungsstufe.....	90
Abb. 34: Bestandeshöhe des Winterweizens auf dem Standort Relliehausen 1996	91
Abb. 35: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Winterweizen über die Zeit auf dem Standort Großobringen im Versuchsjahr 1996	93
Abb. 36: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindexes (unten) von Wintergerste über die Zeit auf dem Standort Großobringen im Versuchsjahr 1997	94
Abb. 37: Gang der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und des Sättigungsdefizites am 23.06.1996 auf dem Standort Reinshof	97
Abb. 38: Stomatäre Leitfähigkeit (oben) und CO ₂ -Assimilationsrate des Winterweizens (unten) gemessen am Fahnenblatt auf dem Standort Reinshof als Funktion der Zeit am 23.06.1996	97
Abb. 39: Gesamtwasserpotential im Winterweizen als Funktion der Zeit am 23.06.1996 auf dem Standort Reinshof	98

	Seite
Abb. 40: Bodenwassergehalt als Funktion der Bodentiefe auf dem Standort Reinshof am 23.06.1996.....	98
Abb. 41: Die CO ₂ -Assimilationsrate von Winterweizen (gemessen am Fahnenblatt) als Funktion der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) zum Stadium EC 69 bei Lockerbodenwirtschaft (LBW) auf dem Standort Reinshof vom 23.06.1996	101
Abb. 42: Lichtfluß-Effektkurven des Winterweizens am 23.06.1996 im Stadium EC 69 auf dem Standort Reinshof	102
Abb. 43: Gang der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und des Sättigungsdefizites am 18.06.1997 und am 19.06.1997 auf dem Standort Reinshof	104
Abb. 44: Stomatäre Leitfähigkeit (oben) und CO ₂ -Assimilationsrate des Wintergerste (unten) gemessen am Fahnenblatt auf dem Standort Reinshof als Funktion der Zeit am 18. und 19. 06.1997	106
Abb. 45: Gesamtwasserpotential in der Wintergerste als Funktion der Zeit am 18. und 19.06.1996 auf dem Standort Reinshof	107
Abb. 46: Bodenwasserausschöpfung vom 04.06.1997 bis zum 19.06.1997 aus einzelnen Bodenschichten auf dem Standort Reinshof	108
Abb. 47: Lichtfluß-Effektkurven der Wintergerste zum Stadium EC 69 bis 83 im Jahr 1997 auf dem Standort Reinshof	109
Abb. 48: Kornertrag auf dem Standort Reinshof	115
Abb. 49: Kornertrag auf dem Standort Relliehausen	120
Abb. 50: Kornertrag auf dem Standort Großobringen	126
Abb. 51: Beziehung zwischen der Lagerungsdichte des Bodens und dem Eindringwiderstand (EDW) in der Bodentiefe 30-35 cm auf den Standort Reinshof	130
Abb. 52: Bodentemperatur in zwei Bodentiefen, gemessen an der Wetterstation Göttingen.....	133
Abb. 53: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient bei einer Wasserspannung von pF 2,0 als Funktion der Lagerungsdichte des Bodens in der Tiefe 28-34 cm auf dem Standort Reinshof in den Versuchsjahren 1995 und 1997	136
Abb. 54: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient bei einer Wasserspannung von pF 2,0 in der Bodentiefe 28-34 cm in Abhängigkeit von der Belastungsstufe im Versuchsjahr 1995	136
Abb. 55: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient bei einer Wasserspannung von pF 2,0 in der Bodentiefe 28-34 cm in Abhängigkeit von der Belastungsstufe in den Versuchsjahren 1995 und 1997 auf dem Standort Reinshof	139
Abb. 56: Beitrag der Poren von 60 bis 300 µm Äquivalentdurchmesser an der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsstufe auf dem Standort Reinshof in der Bodentiefe 28-34 cm am 12.04.1995	139
Abb. 57: Gesamtwurzellänge (GWL) unterhalb 35 cm Bodentiefe am 03.06.1995 als Funktion des Eindringwiderstandes in der Tiefe 30-35 cm am 04.04.1995 und des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten am 12.04.1995 auf dem Standort Reinshof	141

	Seite
Abb. 58: Beziehung des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten bei pF 2,0 zur Luftkapazität (pF 1,8) bei steigender Bodenbelastung in der Bodenschicht 28-34 cm auf dem Standort Reinshof am 12.04.1995 und am 16.04.1997	143
Abb. 59: Veränderung der Gesamtwurzellänge im Unterboden auf dem Standort Reinshof 1995	145
Abb. 60: Gesamtwurzellänge unterhalb 35 cm Bodentiefe am 02.06.1997 als Funktion des Eindringwiderstandes in der Tiefe 30-35 cm am 19.03.1997 und des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten bei pF 2,0 in der Tiefe 28-34 cm am 16.04.1997 auf dem Standort Reinshof	148
Abb. 61: Beziehung zwischen der Gesamtwurzellänge am 03.07.1995 (EC 45) und der oberirdischen Trockenmasse der Sommergerste am 23.06.1995 (EC37) auf dem Standort Reinshof	152
Abb. 62: Beziehung zwischen der Gesamtwurzellänge im Unterboden am 02.06.1997 und der mittleren stomatären Leitfähigkeit am 18. und 19.06.1997 auf dem Standort Reinshof	158
Abb. 63: Gemessener Kornertrag der Sommergerste 1995 als Funktion der Gesamtwurzellänge im Unterboden auf den Standorten Reinshof, Relliehausen und Großobringen	162
Abb. 64: Beziehung zwischen dem Kornertrag und dem mittlerer Blattflächenindex von EC 25-37 der Sommergerste auf dem Standort Reinshof im Versuchsjahr 1995	164
Abb. 65: Beziehung zwischen gemessenem und berechnetem Kornertrag auf den Standorte Reinshof, Relliehausen und Großobringen in den Jahren 1996 und 1997	165

Verzeichnis der Tabellen	Seite
Tab. 1: Kennzeichnung der Belastungsstufen.....	20
Tab. 2: Termine der mechanischen Belastung.....	21
Tab. 3: Bodenwassergehalt (BWG) und Feldkapazität (FK) der Böden bei der mechanischen Belastung zu Versuchsbeginn auf den Standorten Reinshof und Rellehausen	21
Tab. 4: Bodenwassergehalt (BWG) und Feldkapazität (FK) der Böden bei der mechanischen Belastung zu Versuchsbeginn auf dem Standort Großobringen	22
Tab. 5: Horizontfolge und Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf der Versuchsfläche Reinshof	23
Tab. 6: Horizontfolge und Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf der Versuchsfläche Rellehausen	26
Tab. 7: Horizontabfolge und Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf der Versuchsfläche Großobringen	29
Tab. 8: Beprobungsplan Bodenwassergehalt auf den Standorten Reinshof (RH) , Rellehausen (RL) und Großobringen (GO)	33
Tab. 9: Beprobungszeitpunkte (Bt) zum Bodenwassergehalt auf den Standorten Reinshof (RH) , Rellehausen (RL) und Großobringen (GO)	33
Tab. 10: Beprobungsplan Eindringwiderstand	34
Tab. 11: Beprobungsplan Gasdiffusion.....	35
Tab. 12: Beprobungsplan ungesättigte Wasserleitfähigkeit	36
Tab. 13: Beprobungsplan Pflanzendichte	37
Tab. 14: Beprobungsplan Wurzelsystem	39
Tab. 15: Beprobungstermine der Teilernten zur Bestimmung der oberirdischen Biomasse und der Blattfläche.....	40
Tab. 16: Beprobungsplan oberirdische Biomasse und Blattfläche.....	41
Tab. 17: Beprobungsplan Bestandeshöhe.....	42
Tab. 18: Beprobungsplan Fahnenblattlänge	42
Tab. 19: Beprobungsplan Gesamtwasserpotential	43
Tab. 20: Beprobungsplan CO ₂ / H ₂ O – Gaswechsel.....	44
Tab. 21: Beprobungsplan Ährendichte und Kornbesatz der Ähre.....	46
Tab. 22: Beprobungsplan Korn- und Strohertrag	47
Tab. 23: Bestandeshöhe der Sommergerste zum Zeitpunkt der Ernte im Versuchsjahr 1995 auf dem Standort Großobringen	92
Tab. 24: Bestandeshöhe des Winterweizens zum Zeitpunkt der Ernte im Versuchsjahr 1996 auf dem Standort Großobringen	93
Tab. 25: Bestandeshöhe der Wintergerste zum Zeitpunkt der Ernte im Versuchsjahr 1997 auf dem Standort Großobringen	95
Tab. 26: Ertragsbildung bei Sommergerste im Jahr 1995 auf dem Standort Reinshof . EKM bezeichnet die Einzelkornmasse.....	111
Tab. 27: Ertragsbildung bei Winterweizen im Jahr 1996 auf dem Standort Reinshof	112
Tab. 28: Ertragsbildung bei Wintergerste im Jahr 1997 auf dem Standort Reinshof	113
Tab. 29: Ernteindex bei Sommergerste (SG) 1995 , Winterweizen (WW) 1996 und Wintergerste (WG) 1997 auf dem Standort Reinshof	116

	Seite
Tab. 30: Ertragsbildung bei Sommergerste im Jahr 1995 auf dem Standort Rellichausen	117
Tab. 31: Ertragsbildung bei Winterweizen im Jahr 1996 auf dem Standort Rellichausen	118
Tab. 32: Ernteindex bei Sommergerste (SG) 1995 , Winterweizen (WW) 1996 und Wintergerste (WG) 1997 auf dem Standort Rellichausen	121
Tab. 33: Ertragsbildung der Sommergerste im Jahr 1995 auf dem Standort Großobringen	122
Tab. 34: Ertragsbildung bei Winterweizen im Jahr 1996 auf dem Standort Großobringen	123
Tab. 35: Ertragsbildung bei Wintergerste im Jahr 1997 auf dem Standort Großobringen	124
Tab. 36: Ernteindex bei Sommergerste (SG) 1995 , Winterweizen (WW) 1996 und Wintergerste (WG) 1997 auf dem Standort Großobringen	127
Tab. 37: Bodenwassergehalt auf den Standorten Reinshof (20.07.1995) und Rellichausen (05.07.1995).....	162
 Anhang	
Tab. 38: Technische Daten und Gewichte der verwendeten Fahrzeuge	183
Tab. 39: Kontaktflächendruck bei den Belastungsstufen	183
Tab. 40: Einteilung der Entwicklungsstadien nach ZADOKS et al. 1974	184
Tab. 41: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Reinshof 1995	186
Tab. 42: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Reinshof 1996	187
Tab. 43: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Reinshof 1997	188
Tab. 44: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Rellichausen 1995	189
Tab. 45: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Rellichausen 1996	190
Tab. 46: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Rellichausen 1997	191
Tab. 47: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Großobringen 1995	192
Tab. 48: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Großobringen 1996	193
Tab. 49: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort Großobringen 1997	194
Tab. 50: Wurzellängendichte der Sommergerste in der Bodenmatrix (idBm) und in Bioporen (iBp) auf dem Standort Reinshof am 03.07.1995.....	195
Tab. 51: Wurzellängendichte der Sommergerste in der Bodenmatrix (idBm) und in Bioporen (iBp) auf dem Standort Reinshof am 26.07.1995.....	196
Tab. 52: Wurzellängendichte des Winterweizens auf dem Standort Reinshof am 15.05.1996	197

	Seite
Tab. 53: Wurzellängendichte des Winterweizens auf dem Standort Reinshof am 12.06.1996	198
Tab. 54: Wurzellängendichte des Winterweizens auf dem Standort Reinshof am 17.07.1996	199
Tab. 55: Wurzellängendichte der Wintergerste auf dem Standort Reinshof am 14.05.1997	200
Tab. 56: Wurzellängendichte der Wintergerste auf dem Standort Reinshof am 02.06.1997	201
Tab. 57: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf dem Standort Reinshof in den Jahren 1995-1997	202
Tab. 58: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf dem Standort Rellehausen in den Jahren 1995-1997	203
Tab. 59: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf dem Standort Großbringen in den Jahren 1995-1997	204

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund einer ständig steigenden Belastung der Ackerböden durch schwere Maschinen weisen praktische Erfahrungen darauf hin, daß Böden mit einer flach lockernden Festboden-Mulchwirtschaft (**FMW**) höhere mechanische Belastbarkeit und ein höheres Regenerationsvermögen besitzen können als Böden mit tief-wendender Lockerbodenwirtschaft (**LBW**). Um diese These zu prüfen, wurden Lößböden an drei Standorten mit den Bearbeitungssystemen **LBW** und **FMW** im Frühjahr 1995 bei Feldkapazität einer einmaligen geringen, mittleren oder hohen mechanischen Belastung ausgesetzt. Im Feld und Labor wurden nach dem Leitgedanken der Wirkkette mechanische Belastung → Bodeneigenschaften → Wurzelwachstum → Sproßwachstum → Ertrag bodenphysikalische Kennwerte, Wurzel- und Sproßwachstum, Gaswechsel der Pflanzen sowie der Korn- und Strohertrag erfaßt.

Die Beeinträchtigung bodenphysikalischer Eigenschaften wie Lagerungsdichte, Porenraumgestaltung und Eindringwiderstand führte im Anlagejahr bei beiden Bearbeitungssystemen zu einer Reduktion von Wurzel- und Sproßwachstum, bei **LBW** viel stärker ausgeprägt als bei **FMW**. Im Anlagejahr führte steigende Belastung auf **LBW** zu Ertragsdepressionen der Sommergerste, die auch bei **FMW**, aber beschränkt auf mittlere und hohe Belastung, nachweisbar waren.

Im zweiten und dritten Versuchsjahr mit Winterweizen und Wintergerste fiel der Ertragsrückgang – wenn überhaupt feststellbar – geringer aus als im Anlagejahr. In der Tendenz war er bei **LBW** stärker ausgeprägt als bei **FMW**. In Trockenperioden wurde bei **LBW** durch Behinderung des Wurzelwachstums nach hohem Lasteintrag ein Wasserstreß in den Pflanzen ausgelöst, der den Gaswechsel am Fahnenblatt erniedrigte.

In den drei Versuchsjahren beschränkte sich die Regeneration des Bodens auf die Ausbildung von Rissen und Bioporen. Die Untersuchungen lassen den Schluß zu, daß Lößböden mit **FMW** im Vergleich zu **LBW** eine höhere mechanische Belastbarkeit aufweisen und sich durch ein höheres Regenerationsvermögen auszeichnen.

*Niemals noch hat Unwissenheit
jemandem genützt.*
Karl Marx 1867

1 Einleitung

Die aktuelle landwirtschaftliche Praxis des Pflanzenbaus steht im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie (DEWIT 1991, BAEUMER 1992, DAHL 1997). Oft scheinen die Ziele der Produktion unvereinbar: Stabile Höchstserträge müssen mit größtmöglicher Umweltverträglichkeit der angewandten Verfahrenstechnik verknüpft werden, wenn die Ertragsfähigkeit als Teil der ökologischen Funktion der Ackerböden langfristig erhalten bleiben soll. Während der Gesetzgeber in einigen Bereichen der Pflanzenproduktion wie zum Beispiel dem chemischen Pflanzenschutz ein umfangreiches Regelwerk einsetzt, verläßt er sich beim Bodenschutz auf die gute fachliche Praxis (GESETZ ZUM SCHUTZ DES BODENS DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 1998). Betrachtet man die heutige „gute fachliche Praxis“ so zeigt sich, daß der Wendepflug als Leitgerät einer Lockerbodenwirtschaft (LBW), einen wesentlichen Bestandteil der Bodenbearbeitung darstellt. Die Gründe sind leicht aufgeführt: Der Wendepflug vergräbt Erntereste ebenso gründlich wie Konkurrenzpflanzen einschließlich deren Samen und hinterläßt einen „sauberen“ Acker. Je nach Arbeitstiefe ist die Krume aufgelockert und bietet günstige Voraussetzungen für das Saatbett der nachfolgenden Feldfrucht. Den Vorteilen des Wendepfluges stehen seine Nachteile gegenüber: Der Einsatz von Zeit und Energie bei der Pflugarbeit ist hoch. Neben der Zunahme von Erosionsschäden können Verdichtungen und Strukturschäden in der Krumbasis – einer Bodenschicht direkt unterhalb des Bearbeitungshorizontes – und im Unterboden Folge des Pflügens sein. Die immer größer werdende Belastung der gepflügten Ackerböden durch zunehmend schwerere Landmaschinen führte dazu, daß auf ca. 50 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der alten Bundesländer mit Schadverdichtungen bis in den Unterboden gerechnet werden muß (RUHM 1983). Unter einer Bodenverdichtung soll im folgenden eine Gefügeveränderung, verbunden mit der Zunahme der Lagerungsdichte des Bodens und der Abnahme des Porenvolumens verstanden werden. Eine Schadverdichtung liegt vor, wenn die Gefügeveränderung das Wachstum

der Kulturpflanzen behindert (BRANDHUBER 1997). In zahlreichen Untersuchungen wurde auf die Gefahr einer dauerhaften Schädigung des Unterbodens gepflügter Böden durch eine hohe mechanische Belastung hingewiesen (HÅKANSSON et al. 1987, VOORHEES et al. 1989, PETELKAU & DANNOWSKI 1990, Domzal et al. 1991, LHOTSKY et al. 1991, LOWERY & SCHULER 1991, RUSANOW 1991, GAMEDA et al. 1994, HAMMEL 1994, RILEY 1994, ALAKUKKU & ELONEN 1994, ETANA & HÅKANSSON 1994, SCHJØNNING & RASMUSSEN 1994, ALBLAS et al. 1994, SOMMER et al. 1995). In der pflanzenbaulichen Praxis der letzten Jahrzehnte haben Züchtungsfortschritte und eine Optimierung des Pflanzenschutz- und Düngermanagements die zunehmende Schädigung des Bodengefüges oft durch eine Stabilisierung oder Steigerung der Erträge überlagert und damit unkenntlich gemacht (DÜRR et al. 1995). Eine fortschreitende mechanische Belastung der Böden unter Pflug verbunden mit einer zunehmenden Einschränkung der ökologischen Funktionen des Unterbodens durch Gefügedeformationen können die Ertragssicherheit auf lange Sicht jedoch erheblich gefährden.

Mit dem Ziel einer bodenschonenden Landbewirtschaftung können Bodenbearbeitungssysteme mit reduziertem mechanischen Bodeneingriff und einer Mulchdecke zum Schutz der Bodenoberfläche eine mögliche Alternative zum Wendepflug darstellen (EHLERS 1991). Solche Bearbeitungssysteme mit dauerhaftem Pflugverzicht können als Festboden-Mulchwirtschaft (**FMW**) beschrieben werden (BAEUMER 1992). Die anhaltende Bodenruhe in Verbindung mit einer im Vergleich zu gepflügten Böden erhöhten biologischen Aktivität (STOCKFISCH et al. 1995, LANGMAACK et al. 1997) kann auf reduziert bearbeiteten Böden zu einem kontinuierlichen, anisotropen Porensystem führen, daß Ober- und Unterboden miteinander verbindet (EHLERS 1977, BALL 1981). Ein solches Porensystem kann sich durch eine hohe Stabilität gegenüber einer vertikal angreifenden Last auszeichnen (HARTGE & BOHNE 1983, BLACKWELL et al. 1990). Neben der Veränderung des Porensystems kann es auf reduziert bearbeiteten Böden zu einem Anstieg der Aggregatstabilität (EHLERS 1997) und der Aggregatporosität (VOORHEES & LINDSTROM 1984) kommen. Als Ursache für die Veränderung der Aggregateigenschaften bei reduzierter Bodenbearbeitung kann die oberflächennahe Anreicherung mit organischer Substanz, die hohe biologische Aktivität (EHLERS 1997) und die anhaltende Bodenruhe bei fortlaufenden Quellungs- sowie Schrumpfungsprozessen des Bodens im Jahresgang

(HORN et al. 1997) angeführt werden. Eine Reihe von Untersuchungen hat gezeigt, daß die höhere Stabilität der Porensysteme und der Bodenaggregate bei langfristig reduzierter Bodenbearbeitung zu einer größeren Unempfindlichkeit solcher Böden gegenüber mechanischer Belastung führen kann (HORN 1986, DEXTER 1988, BAUMGARTL 1991, DIEZ 1991, EHLERS et al. 1994, GRUBER 1994). Sollten in der kommenden Zeit die Bestimmungen des Gesetzes zum Schutze des Bodens umgesetzt werden, wird die Grundbodenbearbeitung mit dem Wendepflug unter dem Aspekt der bodenschonenden, standortangepaßten Bodenbearbeitung neu zu beurteilen sein. Es ist dringend erforderlich, alternative Bodenbearbeitungssysteme hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit sowie ihrer ökonomischen und ökologischen Vor- und Nachteile zu prüfen. In der vorliegenden Arbeit wurden die Auswirkungen mechanischer Bodenbelastung auf bodenphysikalische Eigenschaften und Merkmale des Pflanzenwachstums bei den kontrastierenden Bearbeitungssystemen **LBW** und **FMW** untersucht. Die Wirkkette: mechanische Belastung → Bodeneigenschaften → Wurzelwachstum → Sproßwachstum → Ertrag diente dabei als Leitfaden.

2 Versuchskonzept

An drei Standorten in Niedersachsen und Thüringen mit lößbürtigen Böden aber unterschiedlichem Niederschlagsregime wurde die Wirkung einer einmaligen mechanischen Bodenbelastung auf Bodeneigenschaften, Bodenleben und Pflanzenwachstum geprüft. Der Vergleich der Böden mit **LBW** und **FMW** hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegen mechanische Belastung stand im Vordergrund.

Folgende Forschungsschwerpunkte wurden von vier Arbeitsgruppen (AG) bearbeitet: Universität Göttingen, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: Wirkung mechanischer Belastung auf Gefügefunktionen und Pflanzenwachstum. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena: Gefügeentwicklung nach mechanischer Belastung. Universität Kiel, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde: Spannungs- und Verformungsverhalten des Bodens bei mechanischer Belastung. Technische Universität Braunschweig, Arbeitsgruppe

Bodenzoologie: Auswirkung mechanischer Belastung auf die Bodenfauna. Die vorliegende Arbeit stellt den Beitrag der Arbeitsgruppe Göttingen dar.

Die über Jahre unterschiedlich bearbeiteten Böden der Standorte wurden mechanisch mit Fahrzeugen belastet, die sich durch zwei Achsen und vier gleich große Räder auszeichneten. Die Gesamtlast konnte durch Zuladung von Gewichten gleichmäßig auf Achsen und Räder verteilt werden. Dies sollte die Interpretation der Belastungswirkung vereinfachen. Die Achslast der Fahrzeuge wurde auf 5t und 10t festgelegt, um praxisübliche, schwere Achslasten zu simulieren. Als Beispiel für praxisübliche Achslasten können ein schwerer Schlepper mit 4t Achslast, ein gefülltes, großvolumiges Güllefaß mit 8t Achslast und ein selbstfahrender Köpfbunkerroder mit Achslasten bis zu 15t (ZIEGLER 1995) gelten.

Durchgeführt wurde die Befahrung auf zwei Standorten in Niedersachsen mit Radladern der Firma Orenstein & Koppel, Dortmund. Auf dem dritten Standort in Thüringen kamen ein Kranwagen und ein Radlader der Firma Ahlmann zum Einsatz. Die technischen Daten und die Gewichte der Fahrzeuge sowie deren Kontaktflächendrücke finden sich in Tab. 38, 39 im Anhang.

Die mechanische Belastung der Böden wurde flächendeckend aufgebracht. Dies wurde erreicht, indem die Spuren der Fahrzeuge ohne Überlappung oder Zwischenraum aneinander gesetzt wurden. Die Überrollgeschwindigkeit bei der Belastung entsprach in etwa 4 km/h. Sinn der flächendeckenden Belastung war es, Randeffekte durch nicht belastete Bereiche zu vermeiden. Auch erschien die flächenhafte Belastung gerechtfertigt, da praxisübliche pflanzenbauliche Maßnahmen wie die Ernte von Mais oder Hackfrüchten ebenfalls zu einer stark flächigen Überrollung führen (Brandhuber 1997).

In der pflanzenbaulichen Praxis kommt es oft vor, daß schwere Maschinen wie Güllefässer, selbstfahrende Köpfrödebunker, schwere Kipper oder Silomaisernter bei feuchtem Boden im Herbst zum Einsatz kommen. Dies kann besonders drastische Folgen haben, da Böden im feuchten Zustand instabil und damit besonders anfällig für Gefügeveränderungen sind. In der vorliegenden Arbeit sollte die Auswirkung der mechanischen Belastung auf den Boden unter solch „ungünstigen“ Bedingungen geprüft werden. Um sicherzustellen, daß die Böden der Standorte bei der mechanischen Belastung zu Versuchsbeginn einen nicht

zu geringen Wassergehalt aufwiesen, wurde der Boden auf allen drei Standorten im Frühjahr bei Wassergehalten nahe der Feldkapazität belastet.

Nach der mechanischen Bodenbelastung wurde die erste Versuchsfrucht ausgesät. Die Aussaat erfolgte nach der Bodenbelastung, da nicht die kombinierte Wirkung aus mechanischer Verletzung des Saatgutes oder der aufgelaufenen Pflanzen und der geänderten Bodeneigenschaften geprüft werden sollte.

Der Boden unter Pflug wurde nach der Bodenbelastung und vor der Einsaat nicht gepflügt, um im ersten Versuchsjahr die direkte Wirkung der Bodenbelastung ohne mechanische Auflockerung zu erfassen und die unterschiedliche Empfindlichkeit der Bearbeitungssysteme gegen mechanische Belastung zeigen zu können. Nach der Bodenbelastung und der Aussaat im ersten Versuchsjahr verliefen die pflanzenbaulichen Maßnahmen betriebsüblich. Auf **LBW** wurde zu jeder Frucht gepflügt.

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsanlage und Standortbeschreibung

3.1.1 Einrichtung der mechanischen Bodenbelastung

Auf allen drei Standorten wurden zusätzlich zur betriebsüblichen mechanischen Bodenbelastung im Frühjahr 1995 auf den im Herbst gepflügten oder flach bearbeiteten Boden folgende Radlasten aufgebracht:

1. Belastungsstufe: 0t; keine zusätzliche mechanische Bodenbelastung
2. Belastungsstufe: 2,5t; einmaliges Überfahren mit zwei Achsen
3. Belastungsstufe: 5t; einmaliges Überfahren mit zwei Achsen
4. Belastungsstufe: 5t; dreimaliges Überfahren mit zwei Achsen

Tab. 1 faßt Abkürzungen und Bezeichnungen der Belastungsstufen zusammen.

Tab. 1: Kennzeichnung der Belastungsstufen.

	Überrollhäufigkeit x Radlast	Belastungsintensität
1. Belastungsstufe	0t	keine
2. Belastungsstufe	2x2,5t	gering
3. Belastungsstufe	2x5t	mittel
4. Belastungsstufe	6x5t	hoch

Auf allen drei Standorten wurde die mechanische Bodenbelastung bei Frühjahrssättigung der Böden durchgeführt. Tab. 2 und 3 geben Auskunft über den Zeitpunkt der Versuchsanlage sowie über die Wassergehalte und die Feldkapazität der Böden zu Versuchsbeginn. Die Versuchseinrichtung begann in Thüringen und endete in **Reliehausen** am Sollingrand.

Tab. 2: Termine der Versuchsanlage an den Standorten in Niedersachsen (**Reinshof**, **Rellehausen**) und in Thüringen (**Großobringen**).

	Standort		
	Reinshof	Rellehausen	Großobringen
Termin	12./13.04.1995	25./26.04.1995	23./24.03.1995

Tab. 3: Bodenwassergehalt (BWG) und Feldkapazität (FK) der Böden bei der mechanischen Belastung zu Versuchsbeginn auf den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen**.

	Standort	
	Reinshof	Rellehausen
BWG [Vol.%) in der Bodenschicht 0-30 cm	32,1	35,1
BWG [Vol.%) in der Bodenschicht 30-100 cm	33,9	34,5
FK [Vol.%) in der Bodenschicht 0-30 cm	31,5	34,2
FK [Vol.%) in der Bodenschicht 30-100 cm	32,5	35,8

Tab. 4: Bodenwassergehalt (BWG) und Feldkapazität (FK) der Böden bei der mechanischen Belastung zu Versuchsbeginn auf dem Standort **Großobringen**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

	Standort
	Großobringen
BWG [Vol.%) in der Bodenschicht 0-30 cm	34,0
BWG [Vol.%) in der Bodenschicht 30-40 cm	34,2
FK [Vol.%) in der Bodenschicht 0-30 cm	33,5
FK [Vol.%) in der Bodenschicht 30-40 cm	33,5

3.1.2 Pflanzenbauliche Maßnahmen

Die mechanische Bodenbelastung erfolgte auf den Standorten von Ende März bis Ende April (Tab. 2). Die erste der Belastung folgende Feldfrucht mußte spätsaatverträglich sein. Aus diesem Grund fiel die Wahl auf Sommergerste. Als ein weiterer Vorteil der Sommergerste wurde ihre Empfindlichkeit gegenüber ungünstigen Bodenverhältnissen wie Bodenverdichtungen angesehen. Der Sommergerste folgte im Herbst 1995 auf allen Standorten Winterweizen. Die Feldfrucht des dritten Versuchsjahres war auf allen Standorten Wintergerste. Winterweizen und Wintergerste wurden auf Grund ihrer allgemeinen Verbreitung und ihrer Bedeutung in standortüblichen Fruchtfolgen in der praktischen Landwirtschaft angebaut. Auf den Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten wurde grundsätzlich verzichtet. Ein Verzeichnis der betriebsüblichen pflanzenbaulichen Maßnahmen auf den drei Standorten über die Versuchsjahre findet sich in Tab. 57, 58 und 59 im Anhang.

3.1.3 Standort **Reinshof**

3.1.3.1 Versuchsfläche

Die Versuchsfläche ist ein Teil des Versuchsgutes **Reinshof** der Universität Göttingen und liegt im Leinetal ca. 8 km südlich von Göttingen, 165 m ü. NN. Der Boden des Versuchsfeldes wird als kolluvial überprägte Parabraunerde beschrieben. Das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung war Löß. In Tab. 5 ist die Horizontfolge und die Korngrößenzusammensetzung dargestellt.

Tab. 5: Horizontfolge und Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf der Versuchsfläche **Reinshof**. Dargestellt ist der Anteil der Fraktionen [%].

Horizont	Tiefe [cm]	Korndurchmesser [μm]						
		Ton < 2	Schluff 2-6 6-20 20-60			Sand 60-200 200-600 600-2000		
Ap	0-30	15,1	2,8	16,6	53,3	6,6	5,3	0,3
M	30-50	14,9	4,3	17,9	52,2	6,0	4,6	0,1
Bt	>50	21,6	1,7	16,7	49,8	5,7	4,5	0,1

Auf dem Standort **Reinshof** wurde die mechanische Bodenbelastung in einen seit 1970 bestehenden Versuch zum Vergleich der Bearbeitungssysteme LBW und FMW integriert. Abb. 1 zeigt den Parzellenplan des Versuches.

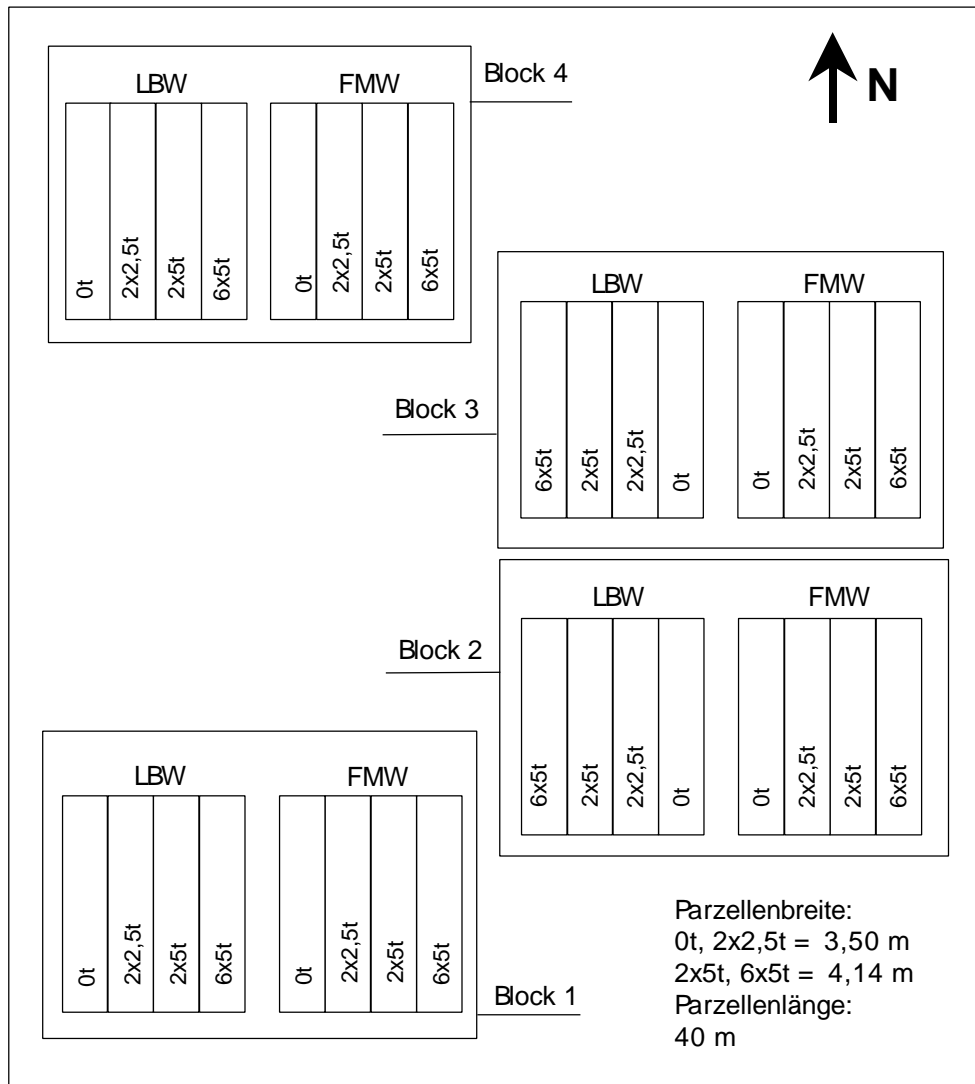


Abb. 1: Versuchsplan Standort **Reinhof**. Die Darstellung ist nicht maßstabgetreu.

Es standen zu Versuchsbeginn Flächen mit langjährig wendender und nicht-wendender Bodenbearbeitung zur Verfügung. Der Feldversuch wurde als zweifaktorielle Blockanlage mit Untereinheiten angelegt. Verglichen werden sollten die beiden Faktoren Bodenbearbeitungssystem und mechanische Bodenbelastung. Unter dem Faktor Bodenbearbeitungssystem standen die beiden Stufen LBW und FMW zur Verfügung. Beim Faktor mechanische Bodenbelastung wurden die Belastungsstufen 0t, 2x2,5t, 2x5t und 6x5t verglichen (Tab. 1). Insgesamt wurden also acht Varianten geprüft. Der Versuch setzte sich aus vier vollständigen Blöcken zusammen. Aus versuchstechnischen Gründen wurden

die Belastungsstufen innerhalb der Blöcke systematisch in der Reihenfolge 0t, 2x2,5t, 2x5t und 6x5t angelegt.

3.1.3.2 Klima

Die Jahresdurchschnittstemperatur entsprach in den Jahren 1995 und 1997 in etwa dem langjährigen Mittel, war jedoch 1996 mit 7,1 °C deutlich geringer (Abb. 2).

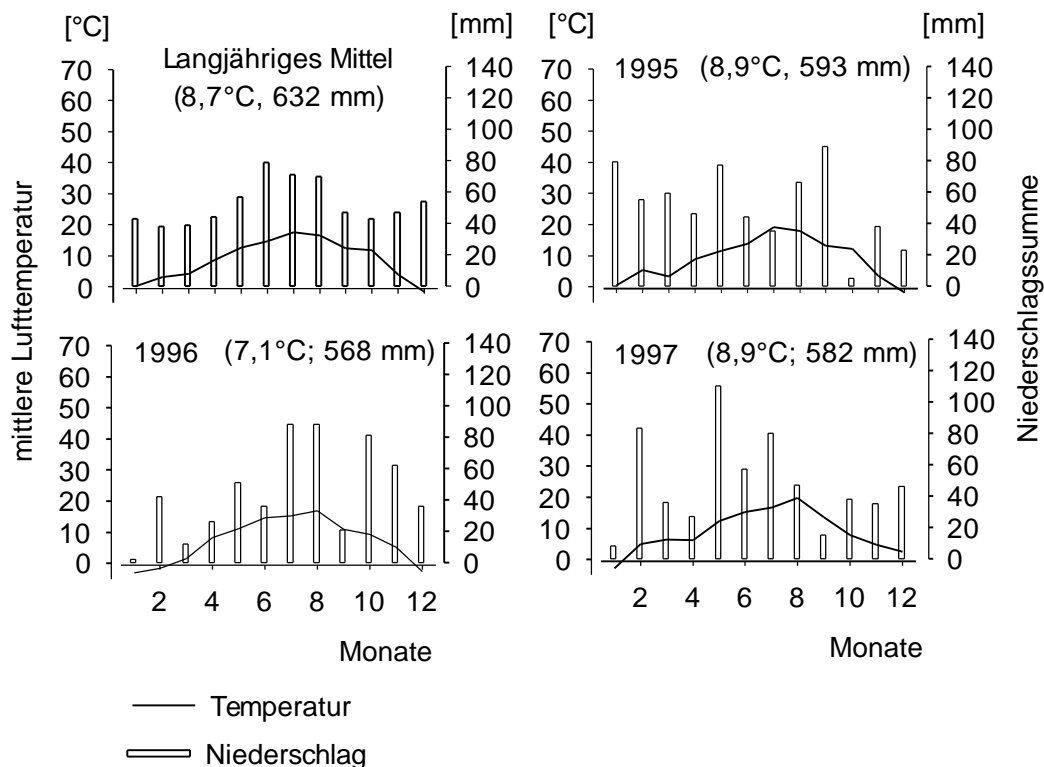


Abb. 2: Niederschläge (Monatssummen) und Lufttemperatur (Monatsmittel) als langjähriges Mittel (1951-1980) und in den Jahren 1995, 1996 und 1997 auf dem Standort **Reinshof**. Die Zahlen in Klammern kennzeichnen die Jahresdurchschnittstemperatur und die Jahresniederschlagsmenge. Die Daten wurden zusammengestellt nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes, Wetterstation Göttingen.

Die Jahresniederschlagsmenge lag in allen drei Versuchsjahren unter dem langjährigen Mittel. Die Verteilung der Niederschläge über das Jahr zeigte in allen Versuchsjahren eine deutliche Abweichung vom langjährigen Mittel: Im ersten Versuchsjahr schwankte die Niederschlagsmenge pro Monat stark. Die beiden Monate Juni und Juli fielen im Vergleich mit dem langjährigen Mittel durch besonders geringe Monatssummen auf. Das zweite Versuchsjahr zeich-

nete sich durch ein niederschlagsarmes Frühjahr und eine regenreiche zweite Jahreshälfte aus. Im Frühjahr des dritten Versuchsjahres lagen die Monatssummen der Monate Februar und Mai erheblich über dem langjährigen Mittel. Mit Ausnahme des trockenen Septembers erreichten die Niederschläge in der zweiten Jahreshälfte annähernd das Niveau des langjährigen Mittels.

3.1.4 Standort **Reliehausen**

3.1.4.1 Versuchsfläche

Die Versuchsfläche liegt am Nord-Ost-Rand des Solling ca. 190 m ü. NN und ist ein Teil des Versuchsgutes **Reliehausen** der Universität Göttingen. Der Boden der Versuchsfläche entstand auf einer bis zu 3 m mächtigen Lößdecke über Hangschutt des mittleren Buntsandsteins. Nach kompletter Entkalkung des primär kalkhaltigen Substrates entwickelte sich eine Pseudogley-Parabraunerde. Tab. 6 zeigt die Horizontfolge und die Korngrößenzusammensetzung des Bodens.

Tab. 6: Horizontfolge und Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf der Versuchsfläche **Reliehausen**. Dargestellt ist der Anteil der Fraktionen [%].

Horizont	Tiefe [cm]	Korndurchmesser [μm]						
		Ton	Schluff			Sand		
		<2	2-6	6-20	20-60	60-200	200-600	600-2000
Ap1	0-16	12,9	3,1	20,4	37,4	24,4	1,2	0,6
Ap2	16-30	11,9	4,0	20,5	36,1	25,9	1,0	0,3
Ap3	30-38	11,7	4,2	21,3	36,8	24,5	1,0	0,3
Al	38-50	12,6	3,4	21,9	39,4	21,1	1,1	0,2
Btg	>50	18,4	2,9	22,2	32,6	22,8	1,6	0,1

Die auf dem Standort **Reliehausen** zur Verfügung stehende Fläche wurden seit 1990 mit den Bearbeitungssystemen LBW und FMW bewirtschaftet. Der Belastungsversuch wurde auf dem bestehenden Versuch zu Bodenbearbeitung eingerichtet. Aus Platzgründen wurden nur zwei Wiederholungen angelegt. Die östliche Wiederholung stand ausschließlich der AG Braunschweig zur Verfügung (Abb. 3).

Verglichen wurden die acht Varianten der beiden Faktoren Bearbeitungssystem und mechanische Bodenbelastung mit den Stufen LBW, FMW sowie 0t, 2x2,5t, 2x5t und 6x5t. Abb. 3 verdeutlicht die Lage und Ausrichtung der Parzellen.

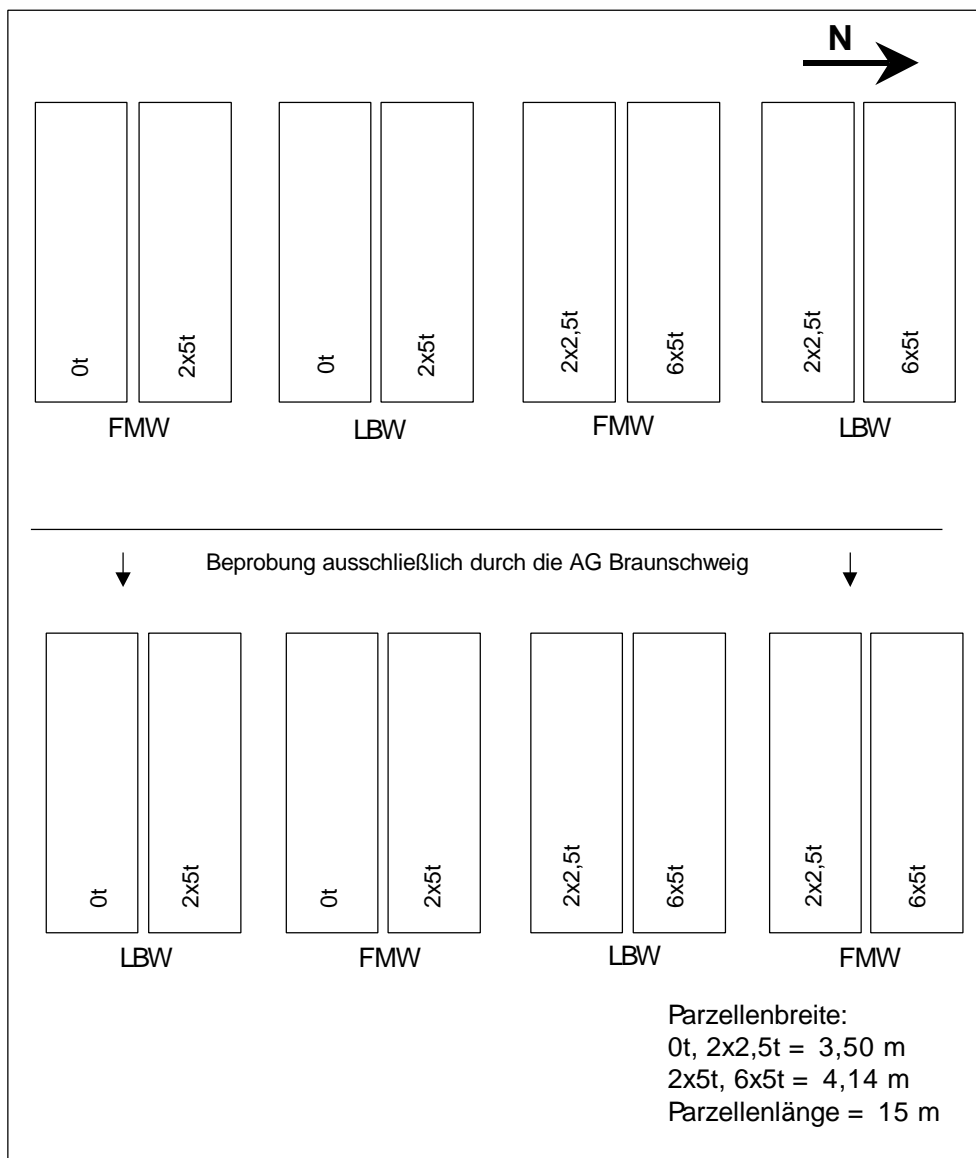


Abb. 3: Versuchsplan Standort **Reliehausen**. Die Darstellung ist nicht maßstabgetreu.

3.1.4.2 Klima

Abb. 4 zeigt die Niederschlagsentwicklung der Versuchsjahre im Vergleich zum langjährigen Mittel und die mittlere Lufttemperatur auf dem Standort **Rellehausen** (190 m. ü. NN). Da für den Standort **Rellehausen** keine Temperaturmessungen zur Verfügung standen, wurden Messungen aus Silberborn (440 m ü. NN) übertragen. Der Höhenunterschied wurde mit $0,5^{\circ}\text{C}$ Temperaturabfall bei 100 m Höhenzunahme berücksichtigt (WEISCHET 1995). Die Entfernung zwischen Silberborn und **Rellehausen** beträgt etwa 14 km, der Höhenunterschied 250 m. Um die Temperaturen von Silberborn auf **Rellehausen** zu übertragen wurden $1,25^{\circ}\text{C}$ addiert.

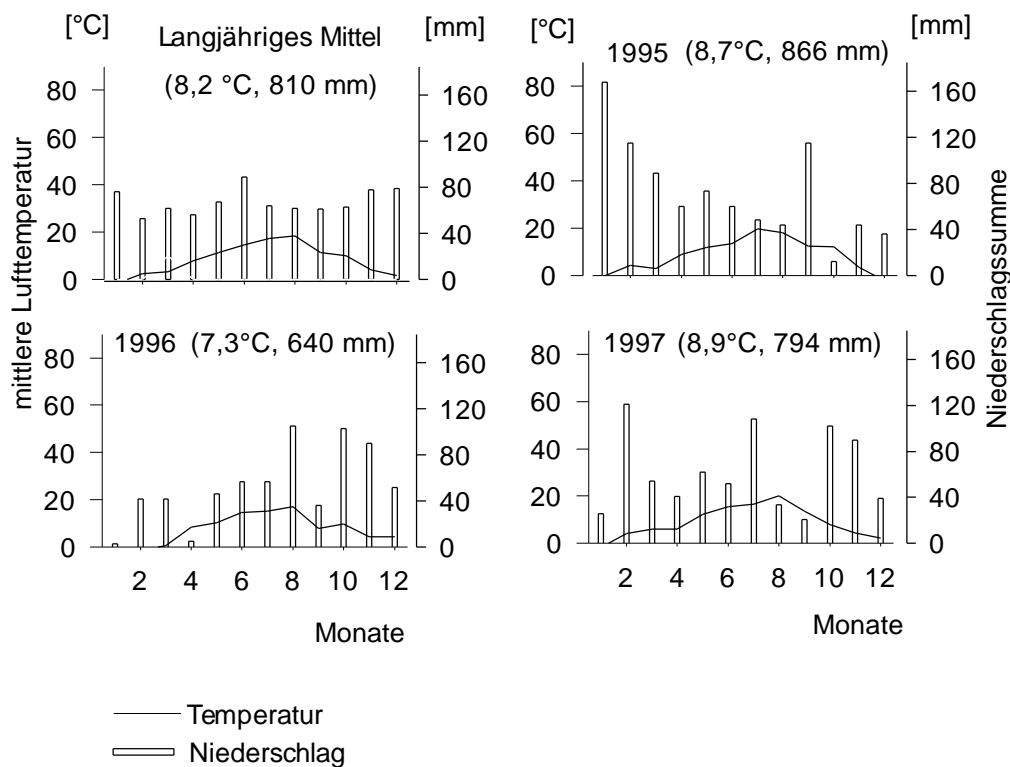


Abb. 4: Niederschläge (Monatssummen) als langjähriges Mittel (1969-1997) und in den Versuchsjahren 1995, 1996 und 1997 sowie die Lufttemperatur (Monatsmittel, 1961-1990 und 1995, 1996 und 1997). Die Daten wurden zusammengestellt nach Messungen auf dem Versuchsgut **Rellehausen**, in 2 km Entfernung vom Versuchsfeld (Niederschläge) und nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes, Wetterstation Silberborn (Lufttemperatur).

Das erste Versuchsjahr zeichnete sich durch ein feuchtes Frühjahr und einen trockenen Herbst aus. Auffällig ist der September mit ungewöhnlich hoher Niederschlagsmenge. Die Jahresniederschlagsmenge lag 56 mm über dem langjährigen Mittel. Im Jahr 1996 lag die Niederschlagsmenge in der ersten Jahreshälfte deutlich unter dem langjährigen Mittel. Das Niveau der Niederschlagsmenge der zweiten Jahreshälfte entsprach in etwa dem des langjährigen Mittels. Insgesamt war das zweite Versuchsjahr deutlich trockener.

Im dritten Versuchsjahr waren die Niederschläge annähernd gleichmäßig über das Jahr verteilt. Der Jahresniederschlag entsprach in etwa dem des langjährigen Mittels. In den Jahren **1995** und **1997** lag die Jahresdurchschnittstemperatur geringfügig über dem langjährigen Mittel. Im Jahr **1996** lag die Durchschnittstemperatur um 1,0°C unter dem langjährigen Mittel.

3.1.5 Standort **Großobringen**

3.1.5.1 Versuchsfläche

Die Versuchsfläche bei **Großobringen** wurde von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zur Verfügung gestellt und betreut. Die Fläche liegt ca. 7 km nördlich von Weimar am Randgebiet des Thüringer Beckens , 240 m ü. NN.

Der Boden der Versuchsfläche wird als flachgründige, lößbeeinflusste Schwarzerde über Keuperton beschrieben. Tab. 7 zeigt die Horizontabfolge und die Korngrößenzusammensetzung des Bodens.

Tab. 7: Horizontabfolge und Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf der Versuchsfläche **Großobringen**. Dargestellt ist der Anteil der Fraktionen [%]. Die Horizontabfolge und die Daten sind zusammengestellt nach den Angaben der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

Horizont	Tiefe [cm]	Korndurchmesser [μm]						
		Ton < 2	Schluff 2-6 6-20 20-60			Sand 60-200 200-600 600-2000		
Ap1	0-5	31,4	6,6	21,2	27,8	10,8	1,8	0,5
Ap2	5-20	31,8	6,4	23,2	25,4	11,0	1,8	0,3
Ap3	20-30	32,0	6,5	22,5	27,0	9,8	1,9	0,4
Ah	30-55	30,9	4,5	23,3	26,4	13,2	1,4	0,2
II Cc	55-70	22,0	5,8	24,0	30,1	15,5	1,9	0,6

Im Vergleich der Standorte fällt in **Großobringen** der besonders hohe Tongehalt des Bodens auf. Aufgrund des hohen Tonanteils wurde der Boden in **Großobringen** - vor allem bei einem hohen Bodenwassergehalt - als besonders belastungsempfindlich eingeschätzt.

Zu Versuchsbeginn standen aus einem Vorversuch (seit 1990) tief (25 cm) und flach (12 cm) bearbeitete Teilflächen zur Verfügung. Die lockernde und wendende Bodenbearbeitung wurde mit der Spatenmaschine durchgeführt.

Der Versuch wurde als Langparzellenversuch ohne Wiederholung angelegt. Unter den beiden Faktoren Bearbeitungssystem und mechanische Bodenbelastung wurden die Stufen LBW tief, LBW flach sowie 0t, 2x2,5t, 2x5t und 6x5t variiert. Insgesamt wurden acht Varianten verglichen. Abb. 5 zeigt die Lage und Ausrichtung der Parzellen.

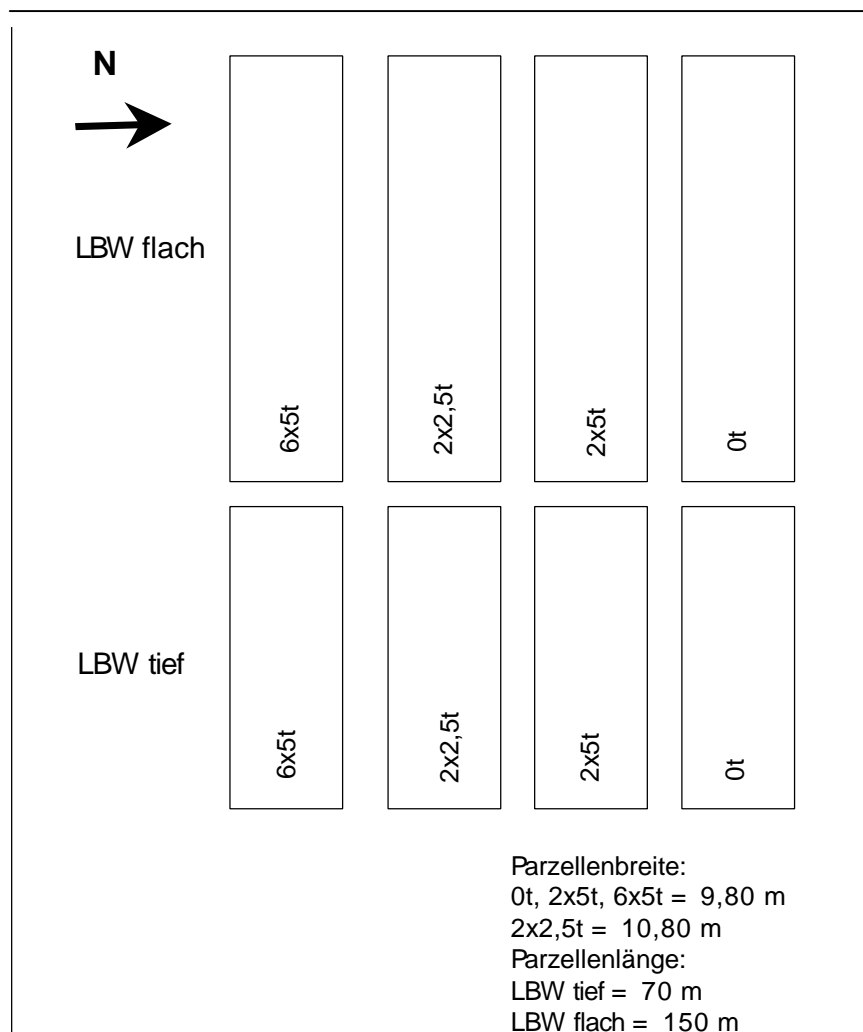


Abb. 5: Versuchsplan Standort **Großobringen**. Die Darstellung ist nicht maßstabgetreu.

3.1.5.2 Klima

Das erste Versuchsjahr zeichnete sich durch überdurchschnittlich hohe Niederschläge in den Monaten Mai, Juni, Juli und September aus (Abb. 6). Das letzte Drittel des Jahres war dagegen deutlich trockener als das langjährige Mittel.

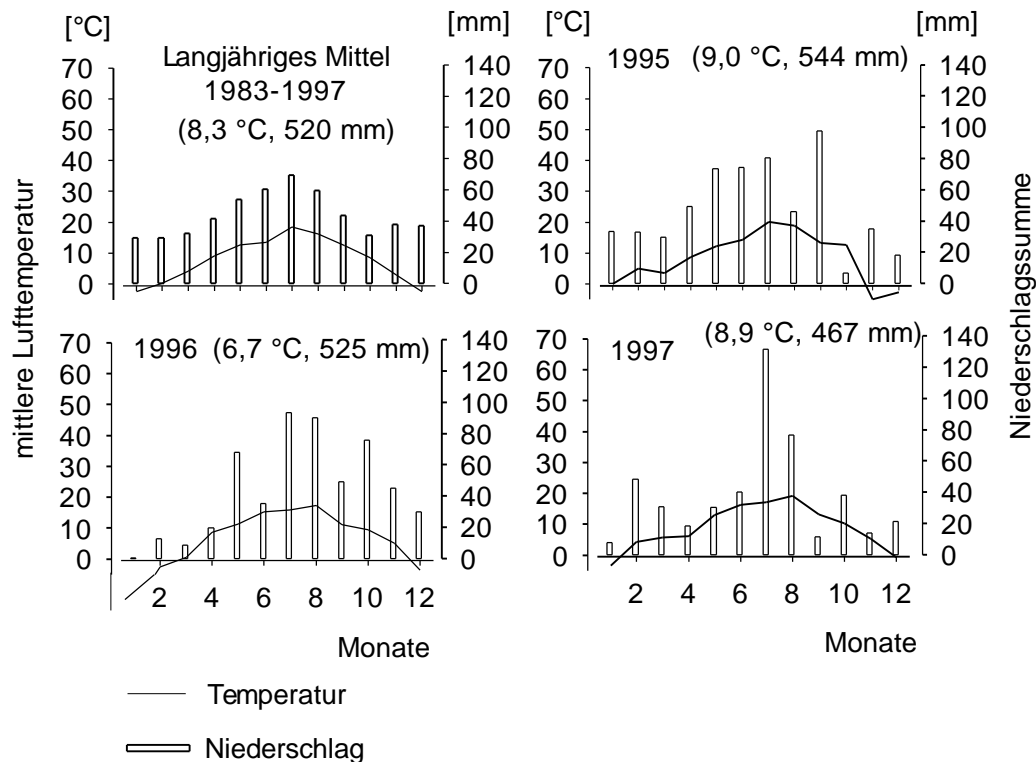


Abb. 6: Niederschläge (Monatssummen) und Lufttemperatur (Monatsmittel) als langjähriges Mittel (1983-1997) und in den Jahren 1995, 1996 und 1997 auf dem Standort **Großobringen**. Die Zahlen in Klammern kennzeichnen die Jahresdurchschnittstemperatur und die Jahresniederschlagsmenge. Die Daten wurden zusammengestellt nach Angaben der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

Das zweite Versuchsjahr zeichnete sich durch einen überdurchschnittlich kalten Jahresbeginn aus. Insgesamt lag die Jahresdurchschnittstemperatur deutlich unter dem langjährigen Mittel. Mit 525 mm entsprach die Jahresniederschlagsmenge in etwa dem des langjährigen Mittels. Die Niederschlagsverteilung über das Jahr wies jedoch Besonderheiten auf: Im ersten Jahresdrittel fiel im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich weniger Niederschlag. Die Monate Juli, August und Oktober zeichneten sich durch hohe Niederschläge aus. Das dritte Versuchsjahr zeichnete sich durch eine außergewöhnlich niedrige Nieder-

schlagssumme aus. Im Frühjahr und im Herbst lag die Niederschlagsmenge beträchtlich unter dem langjährigen Mittel. Besonders auffällig ist der Monat Juli: In diesem Monat fielen mit 131 mm ca. 30 % des gesamten Jahresniederschlags. Die Jahresdurchschnittstemperatur wich 1997 mit 8,9 °C nur gering vom langjährigen Mittel ab.

Im Vergleich der Standorte wurde in **Großobringen** in den drei Versuchsjahren mit durchschnittlich 512 mm die geringste Jahresniederschlagssumme gemessen. Der feuchteste Standort war **Rellehausen** mit durchschnittlich 766 mm Niederschlag in den Versuchsjahren. Göttingen lag mit 581 mm mittlerer Jahresniederschlagssumme zwischen den beiden anderen Standorten.

3.2 Bodenphysikalische Untersuchungen

3.2.1 Bodenwassergehalt

Der gravimetrische Bodenwassergehalt [Gew.%) in Bohrstockproben wurde durch Wiegen vor und nach der Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz ermittelt. Alle Angaben zum gravimetrischen Bodenwassergehalt beruhen auf der Trockensubstanz (TS) als 100% Basis. Zur Berechnung des volumetrischen Wassergehalts [Vol.%) einer Probe wurde der gravimetrische Bodenwassergehalt mit der Lagerungsdichte der entsprechenden Bodenschicht multipliziert. Die Werte der Lagerungsdichte stellte die AG Jena zur Verfügung. Entsprechend der Entnahmehorizont zur Bestimmung der Lagerungsdichte nicht exakt der Bodenschicht zur Bestimmung des Wassergehaltes, wurde die Lagerungsdichte aus den Werten der angrenzenden Bodenschichten interpoliert.

Die Differenz des Bodenwassergehaltes [Vol.%) vom 04.06.1997 bis zum 19.06.1997 gibt die Bodenwasserausschöpfung durch die Kulturpflanzen an. In dieser Zeitspanne fielen keine Niederschläge. Die Angabe Bodenwassergehalt [Vol.%) entspricht der Angabe Bodenwassergehalt [mm/dm Bodenschicht]. Zur Diskussion der Bodenwasserausschöpfung wurden zwei Annahmen gemacht: Eine Wassernachlieferung aus angrenzenden Bodenschichten fand nicht statt. Die Wasserverluste durch Evaporation können unberücksichtigt bleiben. Tab. 8 und 9 zeigen eine Zusammenfassung der Beprobungsdaten zum Bodenwassergehalt.

Tab. 8: Beprobungsplan Bodenwassergehalt auf den Standorten **Reinshof (RH)**, **Rellehausen (RL)** und **Großobringen (GO)**. Die Beprobung wurde während der Vegetation durchgeführt. Die Abkürzungen bedeuten: **Bo** = untersuchtes Bearbeitungssystem; **Bs** = untersuchte Belastungsstufen; **Bl** = untersuchte Blöcke auf dem Standort **RH**; **n** = Anzahl der Meßwiederholungen pro Parzelle und Beprobungstermin; **T** = Tiefe der untersuchten Bodenschicht in [cm].

Standort	Bo	Bs	Bl	n	T
RH	LBW und	1-4	Block 2	3	0-100
	FMW				10 cm-Abschnitte
RL	LBW und	1-4	-	3	0-100
	FMW				10 cm-Abschnitte
GO	LBW tief und	1-4	-	3	0-40
	LBW flach				10 cm-Abschnitte

Das Muster und die Abkürzungen dieser Tabelle werden beibehalten, um die Probenahme der folgenden Methoden zu beschreiben.

Tab. 9: Beprobungszeitpunkte (**Bt**) zum Bodenwassergehalt auf den Standorten **Reinshof (RH)**, **Rellehausen (RL)** und **Großobringen (GO)**.

Standort	Bt		
	Versuchsjahr		
	1995	1996	1997
RH	04.04	16.04.	19.03.
	04.05.	22.04.	16.04.
	13.06.	08.05.	07.05.
	27.06.	22.05.	20.05.
	20.07.	05.06.	03.06.
	01.08.	16.06.	18.06
		03.07.	02.07.
		15.07.	16.07.
		01.08.	
		15.08.	
RL	13.05.	29.04.	13.03.
	21.06.	29.05.	10.06.
	5.07.	26.06.	
	1.08.	25.07.	
GO	wöchentlich	wöchentlich	wöchentlich

3.2.2 Eindringwiderstand

Die Messung des Eindringwiderstandes (EDW) wurde 1995 in RH mit einem selbstregistrierenden Penetrographen der Firma Eijkelkamp (Typ 06.02, mechanische Aufzeichnung) durchgeführt. In diesem Versuchsjahr konnten auf den Standorten RL und GO aus technischen Gründen keine Messungen durchgeführt werden. Zur Messung 1996 und 1997 wurde auf allen Standorten ein selbstregistrierender Penetrograph der Firma Eijkelkamp (Typ 06.05, elektronische Aufzeichnung) eingesetzt. Bei einem Öffnungswinkel von 60 Grad betrug die Fläche der Kegelspitze 1 cm². Die Eindringgeschwindigkeit wurde auf näherungsweise 8 cm/s festgelegt. Die maximale Untersuchungstiefe betrug 70 cm. Die zu den EDW im Anhang dargestellten Lagerungsdichten sind von der AG Jena ermittelt und zur Verfügung gestellt worden. In Tab. 10 ist der Beprobungsplan zur Bestimmung des EDW dargestellt.

Tab. 10: Beprobungsplan Eindringwiderstand; Zur Erläuterung der Abkürzungen vergl. Tab. 8.

Standort	Bt	Bo	Bs	BI	n	T
RH	04.04.1995	LBW und FMW	1-4	Block 2	15	0-70 cm
RH	16.04.1996 19.03.1997	LBW und FMW	1-4	Block 1-4	10	0-70 cm
RL	29.04.1996 13.03.1997	LBW und FMW	1-4	-	10	0-70 cm
GO	25.04.1996 17.04.1997	LBW tief und LBW flach	1-4	-	10	0-70 cm

3.2.3 Gasdiffusion

Probenahme

Zur Messung der Gasdiffusion durch den wasserfreien Porenraum des Bodens wurden Stechzylinderproben mit einem Volumen von 200 cm³ aus vertikaler Einschlagrichtung entnommen. Die Beprobungstiefe wurde unterhalb der lockernden Wirkung des Pfluges (Pflugtiefe max. 25 cm) festgelegt, um eine natürliche Gefügeregeneration ohne mechanische Auflockerung erfassen zu können. Die Bodenproben wurden bei 4-6° C bis zur Untersuchung gelagert. Tab. 11 faßt die Daten der Probenahme zu Gasdiffusion zusammen.

Tab. 11: Beprobungsplan Gasdiffusion

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n	T
RH	12.04.1995 16.04.1997	LBW und FMW	1-4	Block 2	6	28-34
RL	26.04.1995	LBW und FMW	1-4	-	6	28-34
GO	24.03.1995	LBW tief und LBW flach	1-4	-	6	28-34

Meßprinzip

Die 200 cm³- Stechzylinderproben wurden nach der Einstellung einer definierten Wasserspannung (pF 1,0, 1,7 und 2,0) mittels keramischer Platten (SCHLICHTING & BLUME 1966) in Diffusionskammern fixiert. Bei einer Wasserspannung von pF 1,0 sind Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser größer als 300 µm luftgefüllt. Bei pF 1,7 sind Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von mehr als 50 µm luftgefüllt, bei pF 2,0 Poren größer 30 µm. Durch eine Spülung dieser Kammern mit N₂-Gas wurde ein O₂-Konzentrationsgefälle gegenüber der Außenluft geschaffen. Entlang dieses Gefälles diffundierte Sauerstoff aus der Raumluft über die luftführenden Poren der Bodenprobe in die Diffusionskammern hinein. Über einen Zeitraum von vier Stunden und bei einer konstanten Raumtemperatur von 20°C wurde im Abstand von 30 Minuten die O₂-Konzentration in den Diffusionskammern gaschromatographisch festgehalten.

Berechnung des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten

Nach WENDROTH (1990) wurde aus dem Anstieg der O₂-Konzentration in den Diffusionskammern der relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_o) als Funktion des luftführenden Porenraumes berechnet. D_s bezeichnet den scheinbaren Diffusionskoeffizienten [cm²/s]. D_o ist der Diffusionskoeffizient von Sauerstoff in Luft und beträgt 0,203 cm²/s (BAKKER & HIDDING 1970).

3.2.4 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Probenahme

Zur Probenahme wurden 300 cm³ Stechzylinder mit vertikaler Einschlagrichtung eingesetzt. So wie zur Messung der Gasdiffusion wurde auch zur Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit die Beprobungstiefe unterhalb der lokkernden Wirkung des Pfluges festgelegt. Eine Zusammenfassung der Beprobungsdaten ist in Tab. 12 zu finden.

Tab. 12: Beprobungsplan ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n	T
RH	12.04.1995	LBW und FMW	1-4	Block 2	4	28-34
RL	26.04.1995	LBW und FMW	1-4	-	4	28-34
GO	24.03.1995	LBW tief und LBW flach	1-4	-	4	28-34

Meßprinzip

Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_u) wurde im Porenbereich < 300 µm mit einer langsamen Verdunstungsmethoden ermittelt. In einer basal abgedichteten, nach oben offenen Stechzylinder-Probe (Höhe 6 cm) ist in 1,5 und 4,5 cm Höhe jeweils ein Druckaufnehmertensiometer in waagerechter Position installiert. Über die offene Oberseite der Probe verdunstet Wasser. Im Zeitverlauf wird der Wasserverlust durch Wägung bestimmt. Gleichzeitig werden die Matrixpotentialwerte am oberen und unteren Tensiometer registriert. Aus den Wertepaaren des Gradienten des Matrixpotentials im SZ und des

Wasserverlustes der Probe zwischen zwei Meßzeitpunkten wurde nach VAN GENUCHTEN (1980) die pF-Kurve des Bodens berechnet. Nach WÖSTEN und VAN GENUCHTEN (1988) konnte anschließend die ku-Matrixpotential-Funktion berechnet werden. Die benötigten Fitparameter wurden mit dem Programm RETC (WÖSTEN und VAN GENUCHTEN 1988) ermittelt. Eine genaue Beschreibung des Aufbaus der Meßapparatur und der Methode der Messung ist bei WENDROTH (1990) zu finden.

3.3 Bestandesentwicklung

3.3.1 Pflanzendichte

Tab. 13 zeigt die Daten der Untersuchung zur Pflanzendichte.

Tab. 13: Beprobungsplan Pflanzendichte; Die Abkürzung „m“ bezeichnet die Meßwiederholungen pro Parzelle x Länge der ausgezählten Pflanzenreihe einer Messung. (Termine zu Aussaat und Feldaufgang siehe Tab. 57-59)

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	m
RH	18.05.1995	LBW und FMW	1-4	Block 1-4	10x1m
	22.11.1995				
	29.10.1996				
RL	11.05.1995	LBW und FMW	1-4	-	10x1m
	23.11.1995				
	04.03.1997				
GO	26.04.1995	LBW tief und LBW flach	1-4	-	10x1m
	09.04.1996				
	28.10.1996				

3.3.2 Wurzelsystem

3.3.2.1 Profilwandmethode

Diese Methode wurde in **Reinshof** und **Rellehausen** benutzt.

An einer 1m x 1m großen Profilwand wurde eine 0,5 cm dicke Bodenschicht abgewaschen und alle freigespülten Wurzeln in Wurzellängeneinheiten von 0,5 cm Länge ausgezählt. Die Profilwand war in ein Raster von 5 cm x 5 cm Kan-

tenlänge eingeteilt. Das Verhältnis gezählter Wurzellänge zum Volumen des abgespülten Bodens ergibt die Wurzellängendichte (WLD). Sie gilt als Maß für die Durchwurzelungsintensität. In **Reinshof** wurde **1995** die Wurzellängendichte in der Bodenmatrix und in Bioporen getrennt erfaßt (Tab. 50, 51, Anhang). Die gezählte WLD wurde nicht mit einem Korrekturfaktor verrechnet (KÖPKE 1979).

Die Gesamtwurzellänge (GWL) gibt die aus der WLD einzelner Bodenschichten errechnete Gesamtlänge des Wurzelsystems unter einem m² Boden bis zur maximalen Durchwurzelungstiefe an. Als maximale Durchwurzelungstiefe wurde die Profilmächtigkeit definiert, in der 99 % der Gesamtwurzellänge gefunden wurden.

Die Darstellung eines Wurzelprofils zeigt eine Wurzellängeneinheit (0,5 cm) als einen Punkt. An der Punktdichte und der Punktverteilung ist die Durchwurzelungsdichte und die Wurzelverteilung abzulesen. Auf dem Standort **Reinshof** wurde die Untersuchung des Wurzelsystems ebenso wie die Messungen zur oberirdischen Trockenmasse und der Blattfläche auf Block 2 durchgeführt.

Tab. 14 zeigt eine Zusammenfassung der Beprobungsdaten zur Untersuchung des Wurzelsystems.

3.3.2.2 Bruchflächenmethode

Diese Methode wurde von der AG Jena in **Großobringen** eingesetzt.

Die Anzahl Wurzelpassagen pro Fläche wurde mit der Bruchflächenmethode nach VETTER & SCHARAFAT (1964) erfaßt (Tab. 14). Mit Hilfe eines Metallrahmens (10 cm Kantenlänge, 5 cm Rahmenhöhe) wurde ein Bodenblock aus dem Boden gebrochen. An der Bruchfläche des Stechzylinders wurden die Wurzelpassagen ausgezählt und auf eine Fläche von 1m² umgerechnet. Der Wert Wurzelpassagen pro m² gibt an, wieviele Wurzeln eine Ebene mit der Fläche von einem m² in der gemessenen Bodentiefe durchbrechen. Um von der Durchwurzelungshäufigkeit einer Fläche auf die WLD eines Bodenvolumens umrechnen zu können, wurden folgende Annahmen gemacht: In der Bodenschicht 0,5 cm über, und der Schicht 0,5 cm unter der ausgezählten Fläche verzweigen sich die Wurzeln nicht und durchwachsen den Bodenhorizont vertikal. Einer Wurzelpassage kann so eine Wurzellänge von 1 cm Höhe zugeordnet werden. Aus der Wurzellänge in der Bodenschicht mit den Ausmaßen 100 cm x

100 cm x 1cm läßt sich unschwer die WLD in cm pro cm³ errechnen. Die so berechnete WLD wird als Annäherung an die tatsächliche Durchwurzelungsintensität in der untersuchten Bodentiefe angesehen. Um ein Maß für die Größe des Wurzelsystems zu erlangen, wurde die WLD der nicht untersuchten Bodenschichten auf der Grundlage des vorliegenden Datenmaterials nach folgendem Muster interpoliert: Die WLD der Messung bei 10 cm Bodentiefe wurde als WLD der Bodenschicht 0 - 15 cm angenommen, die Werte der Messung bei 20 cm für die Schicht 15 – 30 cm, die Werte bei 35 cm für die Schicht 30 – 40 cm und die Werte bei 50 cm für die Schicht 40 - 50 cm. Aus der Summe der WLD der einzelnen Bodenschichten ergibt sich die GWL bis 50 cm Bodentiefe. Aussagen zur maximalen Durchwurzelungstiefe können nicht gemacht werden.

Tab. 14: Beprobungsplan Wurzelsystem.

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n	T
	Profilwandmethode					
RH	03.07. u. 26.07.'95					
	15.05., 12.06. und 17.07. 96	LBW und FMW	1-4	Block 2	1	0-100
	14.05. u. 02.06.'97					
RL	06.07.1995 und 08.08.1995	LBW und FMW	1-4	-	1	0-100
	Bruchflächenmethode					
GO	08.08.1995					10, 20,
	22.05. u. 17.06.'96	LBW tief und	1-4	-	10	35 und
	07.04. u. 02.06.'97	LBW flach				55

3.3.2.3 Wurzeldurchmesser

Im Versuchsjahr 1996 wurde auf dem Standort RH der Wurzeldurchmesser des Winterweizens in drei Bodentiefen bei **LBW** und **FMW** mit 0t und 6x5t auf Block 2 erfaßt. Eine Beschreibung der Methode findet sich bei MERTEN (1997).

3.3.3 Oberirdische Trockenmasse

Pro Parzelle wurden Teilernten auf einer Fläche von 1 m² durchgeführt. Die Daten zur Probenahme sind in Tab. 15 und 16 zusammengefaßt.

Tab. 15: Beprobungstermine (**Bt**) der Teilernten zur Bestimmung der oberirdischen Biomasse und der Blattfläche. Neben dem Versuchsjahr sind die angebauten Feldfrüchte Sommergerste (**SG**), Winterweizen (**WW**) und Wintergerste (**WG**) angegeben.

Standort	Versuchsjahr und Feldfrucht		
	1995 (SG)	1996 (WW)	1997 (WG)
RH	30.05.	22.04.	23.04.
	13.06.	08.05.	07.05.
	29.06.	22.05.	22.05.
		05.06.	26.05.
		19.06.	04.06.
		03.07.	16.06.
		18.07	25.06.
		01.08.	
RL	06.06.	03.05.	
	21.06.	02.06.	-
	01.07.	26.06.	
		27.07.	
GO		25.04.	14.04.
		09.05.	29.04.
		23.05.	12.05.
	-	06.06.	26.05.
		20.06.	09.06.
		04.07.	26.06.
		18.07.	
		01.08.	
	15.08.		

Die Lage der Ernteflächen in den Parzellen wurden so gewählt, daß sie - aneinander anschließend - über die gesamte Vegetationsdauer den gleichen Pflanzenreihen folgten. Zu den Ernten wurde der gesamte oberirdische Aufwuchs der Erntefläche flach über dem Boden abgetrennt. Pflanzenteile, die nicht von den Kulturpflanzen stammten, wurden ebenso wie Strohreste und Verunreinigungen beseitigt. An dem so gewonnenen Erntegut wurde neben der oberirdischen Biomasse auch die Blattfläche bestimmt. Zur Trockenmassebestimmung wurde ein Aliquot 24 h bei 65°C und anschließend 24 h bei 105°C bis zur Ge-

wichtskonstanz getrocknet. Pro Parzelle wurde pro Termin eine Probe gewonnen.

3.3.4 Blattfläche

Bei allen Teilernten wurde die Fläche der Blattspreiten der Kulturpflanzen an einem Aliquot mit einem Blattflächenmeßgerät des Typs CI-203 der Firma CID, Inc., Vancouver, U.S.A ermittelt. Der Blattflächenindex gibt die Gesamtfläche der Blattspreiten in m² pro m² Bodenoberfläche an. Tab. 15 und 16 zeigen den Beprobungsplan.

Tab. 16: Beprobungsplan oberirdische Biomasse und Blattfläche.

Standort	Bo	Bs	BI	n
RH	LBW und FMW	1-4	Block 2 (1995/96) Block 3 (1997)	1
RL	LBW und FMW	1-4	-	1
GO	LBW tief und LBW flach	1-4	-	1

3.3.5 Bestandeshöhe

Die Bestandeshöhe wurde nicht an Einzelpflanzen erfaßt, sondern an ca. 25 m² großen Teilflächen. Die mittlere Bestandeshöhe einer Teilfläche wurde aus ca. 5 m Entfernung geschätzt, indem die ablesende Person genau über den Bestand einen Maßstab anvisierte. Tab. 17 faßt die Untersuchungsdaten zusammen.

Tab. 17: Beprobungsplan Bestandeshöhe

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n
RH	27.05. u. 28.06.'95	LBW und FMW	1-4	Block 1-4	10
	19.05. u. 17.06.'96				
	22.04. u. 26.05.'97				
RL	02.06. u. 26.06.'96	LBW und FMW	1-4	-	3
GO	08.08. 1995	LBW tief und LBW flach	1-4	-	10
	09.09.1996				
	15.07.1997				

3.3.6 Fahnenblattlänge

Die Länge eines Fahnenblattes wurde vom Blatthütchen bis zur Spitze der Blattspreite bestimmt. Gemessen wurde an nicht abgetrennten Blättern lebender Pflanzen im Bestand. Die Daten der Messungen zur Fahnenblattlänge sind in Tab. 18 zusammengefaßt.

Tab. 18: Beprobungsplan Fahnenblattlänge

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n
RH	18.06.1997	LBW und FMW	1-4	Block 1-4	30

3.3.7 Wachstumsstadien

Die Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen wurden nach ZADOKS et al. (1974) bestimmt. Tab. 40 im Anhang zeigt die Einteilung des Getreidewachstums nach ZADOKS et al. (1974).

3.3.8 Gesamtwasserpotential

Zur Messung des Gesamtwasserpotentials (GWP) der Kulturpflanzen wurde eine Druckkammer der Firma pms instrument corp., Oregon, U.S.A. eingesetzt. Die Technik, das GWP mit Hilfe einer Druckkammer zu erfassen, wurde grundlegend von SCHOLANDER et al. (1965) entwickelt. Eine genaue Beschreibung der

Messung des GWP mit Hilfe der Druckapparatur findet sich bei EHLERS (1996). Das jüngste voll ausgebildete Blatt einer Pflanze wurde abgetrennt und zur Messung in die Druckkammer eingespannt. Die Zeitspanne von der Probenahme bis zum Beginn der Messung betrug maximal 40 s. Die Druckzunahme wurde auf 0,2 bar/s festgelegt. Tab. 19 zeigt eine Zusammenfassung der Beprobungsdaten zur Untersuchung des GWP.

Tab. 19: Beprobungsplan Gesamtwasserpotential

Mit dem Beginn einer Messung wurden die Belastungsstufen nach dem Muster FMW Stufe 4 bis 1, dann LBW Stufe 1 bis 4 in nicht regelmäßigen Abständen fortlaufend bis zum Ende der Messung beprobt.

Standort	Bt	Bo	Bs	BI
RH	23.06.1996 (07:00-18:00)			Block 2
	04.06.1997 (09:00-09:40)			(1996)
	05.06.1997 (08:40-16:50)			Block 3
	11.06.1997 (08:35-14:30)	LBW und		(1997)
	12.06.1997 (04:10-13:30)	FMW	1-4	
	17.06.1997 (12:05-15:40)			
	18.06.1997 (04:10-08:00)			
	19.06.1997 (08:00-15:40)			

3.3.9 Gaswechsel der Kulturpflanzen

Der CO₂ / H₂O Gaswechsel der Kulturpflanzen und die Strahlungsintensität wurden zeitgleich mit einem tragbaren Porometer des Typs CIRAS S/N 110 (Combined Infrared Gas Analysis System) der Firma PP-Systems, Großbritannien gemessen. Zu jeder Einzelmessung wurde das jüngste voll entwickelte Blatt einer Pflanze in eine Küvette von 4,5 cm² Fläche (Typ PLC N, PP-Systems, Groß Britannien) eingespannt. In der Küvette wurde ein Luftstrom mit einer Flußrate von 5 cm³/s bei 20 °C und 1 bar Luftdruck an der Blattfläche vorbeigeführt. Die CO₂ - Konzentration und der Wassergehalt des eingehenden Luftstroms waren festgelegt auf 350 ppm CO₂ und 99% der umgebenden Luftfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Messung. Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) zwischen 400 und 700 nm erfaßte ein Punktsensor an der Küvette. Aus

der Lufttemperatur wurde nach der MAGNUSSCHEN Formel (WEISCHET 1995) der Sättigungsdampfdruck errechnet. Die Differenz des Sättigungsdampfdruckes und des aktuellen Wasserdampfdruckes ergab das Sättigungsdefizit. Da der Gaswechsel und das GWP der Pflanzen auch bei hohem Wasserstreß ermittelt werden sollte, wurden die Messungen nur an warmen, strahlungsreichen Tagen mit einer geringen Wolkendecke in einer Trockenperiode ohne Niederschlag durchgeführt. Bei aufziehender Bewölkung wurden die Messungen abgebrochen. Wenn möglich wurde der Tagesgang erfaßt. Der Beprobungsplan für die Gaswechselfmessung findet sich in Tab. 20.

Tab. 20: Beprobungsplan CO₂ / H₂O – Gaswechsel

Mit dem Beginn einer Messung wurden die Belastungsstufen nach dem Muster **FMW** Stufe 4 bis 1, dann **LBW** Stufe 1 bis 4 in nicht regelmäßigen Abständen fortlaufend beprobt.

Standort	Bt	Bo	Bs	Bi
RH	23.06.1996 (07:00-18:00)			Block 2
	04.06.1997 (09:00-09:40)			(1996)
	05.06.1997 (08:40-16:50)			
	11.06.1997 (08:35-14:30)	LBW		Block 3
	12.06.1997 (04:10-13:30)	und	1-4	(1997)
	17.06.1997 (12:05-15:40)	FMW		
	18.06.1997 (04:10-08:00)			
	19.06.1997 (08:00-15:40)			

3.3.9.1 Ableitung von Gaswechselkenngrößen

Die folgenden Kenngrößen wurden vom internen Rechner des Porometers berechnet.

3.3.9.1.1 CO₂ – Assimilationsrate

Die CO₂ – Assimilationsrate ergab sich aus der Differenz der CO₂ Konzentration der in die Küvette einströmenden Luft und der aus der Küvette austretenden

Luft. Die CO_2 – Assimilationsrate gibt an, wieviel CO_2 [μmol] pro Blattfläche [m^2] und pro Zeiteinheit [s] aufgenommen wurde.

3.3.9.1.2 Transpirationsrate

Aus dem Wasserdampfdruck der in die Küvette einströmenden Luft und dem Wasserdampfdruck der austretenden Luft wurde die Menge an Wasser ermittelt, welche die Blattfläche in der Küvette während der Messung abgab. Die Transpirationsrate gibt an, wieviel Wasser [mmol] pro Blattfläche [m^2] und pro Zeiteinheit [s] aus dem Blattinneren in die umgebende Luft diffundierte.

3.3.9.1.3 Stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf

Aus der Transpirationsrate und dem Grenzflächenwiderstand für Wasserdampf an der Blattoberfläche wurde die stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf der eingespannten Blattfläche berechnet. Diese Vorgehensweise setzte voraus, daß der Grenzflächenwiderstand an Blattober- und Blattunterseite gleich war. Eine weitere Annahme war die gleichmäßige Verteilung der Stomata auf beiden Seiten des Blattes. Die stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$] ist ein Maß für die Öffnungsweite der Stomata. Bei dieser Betrachtungsweise wurde die kutikuläre Wasserabgabe nicht berücksichtigt.

3.4 Untersuchungen der Ertragsbildung und des Ertrages

3.4.1 Ährendichte und Kornbesatz der Ähre

Die Daten zur Untersuchung der Ährendichte und des Kornbesatzes der Ähre sind in Tab. 21 dargestellt.

Tab. 21: Beprobungsplan Ährendichte und Kornbesatz der Ähre;
Die Abkürzung „n“ bezeichnet die Meßwiederholungen pro Parzelle x Länge der untersuchten Pflanzenreihe einer Messung.

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n
t		<u>Ährendichte</u>			
RH	15.08.1995	LBW und FMW	1-4	Block 1-4	10 x 1 m
	12.08.1996				
	10.07.1997				
RL	15.08.1995	LBW und FMW	1-4	-	10 x 1 m
	01.08.1996				
	05.07.1997				
GO	23.08.1996	LBW tief und LBW flach	1-4	-	10 x 1 m
	17.07.1997				
		<u>Kornbesatz der Ähre</u>			
RH	22.08.1996	LBW und FMW	1-4	Block 1-4	3 x 20 cm
	11.07.1997				
GO	23.08.1996	LBW tief und LBW flach	1-4	-	3 x 20 cm
	17.07.1997				

3.4.2 Korn- und Strohertrag

Das von Hand gemähte Erntegut wurde auf allen Standorten mit einem stationär betriebenen Parzellenmähdröschler in Stroh und Korn geteilt. Anschließend wurde das Frischgewicht der Fraktionen festgehalten. Teilproben (Stroh: 2x100g Frischmasse, Korn 2x200g Frischmasse) dienen zur Feststellung des Trockengewichtes. Alle Trocknungsvorgänge liefen bis zur Gewichtskonstanz 24 Std bei 60°C und anschließend 24 Std bei 105°C. Die geernteten Mengen wurden gemittelt und umgerechnet auf dt Trockenmasse/ha. Angegeben wird der gereinigte Kornertrag. Die Beprobungsdaten der Ernten zeigt Tab. 22.

Tab. 22: Beprobungsplan Korn- und Strohertrag

Standort	Bt	Bo	Bs	Bl	n
RH	15.08.1995	LBW und	1-4	Block 1-4	4 x 1 m ²
	23.08.1996	FMW			
RH	22.07.1997	LBW und	1-4	Block 1-4	8 x 1 m ²
		FMW			
RL	15.08.1995	LBW und FMW	1-4	-	4 x 1 m ²
	01.08.1996				
	05.07.1997				
GO	14.06.1995	LBW tief und LBW flach	1-4	-	5 x 1 m ²
GO	23.08.1996	LBW tief und LBW flach	1-4	-	10 x 1 m ²
	17.07.1997				

3.4.3 Einzelkornmasse

Aus dem gereinigten Erntegut der Parzellen wurden 8 Proben von je 100 ganzen Körnern bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Zur Trockenmassebestimmung wurde das Erntegut 24 h bei 65°C und anschließend 24 h bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Einzelkornmasse [mg] ergab sich als der hundertste Teil einer Probe. Angegeben wird der Mittelwert aus den 8 Messungen.

3.4.4 Ernteindex

Der Ernteindex gibt das Verhältnis des gereinigten Kornertrages (Trockenmasse) zum oberirdischen Gesamtertrag (Trockenmasse) an. Der Gesamtertrag setzt sich zusammen aus dem gereinigten Kornertrag (Trockenmasse) pro Fläche und dem Strohertrag (Trockenmasse) pro Fläche.

3.4.5 Berechneter Ertrag

Auf den Standorten **Reinshof** und **Großobringen** wurden in den Versuchsjahren 1996 und 1997 der Kornertrag als Produkt der ertragsbestimmenden Faktoren Ähren pro Flächeneinheit, Körner pro Ähre und Einzelkornmasse bestimmt. Der berechnete Ertrag wird in dt TM pro ha angegeben.

3.5 Statistische Auswertung

Statistische Analysen wurden mit Hilfe des SAS-Programms (Statistical-Analysis-System, SAS-INSTITUT INC. 1989, Version 6.11) nach dem allgemeinen linearen Modell (GLM-Prozedur) durchgeführt. Tests auf Normalverteilung der Residuen wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test durchgeführt.

Bei der Analyse von Zeitreihen wurde die 'GLM'-Prozedur um die 'repeated' Anweisung ergänzt. Multiple Vergleiche der Mittelwerte wurden mit Hilfe des Tukey-Tests durchgeführt. Bei allen Berechnungen galt ein Testniveau von $p < 5\%$ als Widerlegung der Nullhypothese.

4 Ergebnisse

4.1 Bodenphysikalische Eigenschaften

4.1.1 Eindringwiderstand

Die Untersuchung des EDW sollte zeigen, ob die mechanische Bodenbelastung bei den unterschiedlichen Bearbeitungssystemen zu Gefügeveränderungen geführt hat, und wie sich diese Veränderungen im Verlauf der Zeit darstellten. Da mit sinkendem Bodenwassergehalt der EDW eines Bodens zunimmt (EHLERS et al. 1983), wurde die Messung bei oder nahe der Feldkapazität (FK) der Böden jeweils im Frühjahr durchgeführt. Die Werte für den EDW bei geringer und mittlerer Bodenbelastung lagen zwischen den Werten bei keiner und hoher Belastung. Deshalb wird auf deren Darstellung hier verzichtet. Abb. 7 und 8 zeigen den EDW dargestellt als Funktion der Bodentiefe auf den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen**.

Die EDW - Tiefenfunktionen bei **LBW 0t** (Abb.7 und 8, links oben) zeigen auf beiden Standorten einen für gepflügte Böden typischen Verlauf: Im Bearbeitungshorizont ist der EDW gering. Im Bereich der Pflugsohle nimmt er sprunghaft zu. Unterhalb dieser Verdichtungs- und Verformungszone nimmt der EDW wieder ab. Der Verlauf der Funktionen kann einen Hinweis auf die Stärke und die Mächtigkeit einer Krümmenbasisverdichtung (KBV) unterhalb des Bearbeitungshorizontes geben. Auf dem Standort **Reinshof** lag der EDW bei gepflügtem Boden ohne Belastung (Abb. 7, links oben), gemittelt über die Versuchsjahre, in der Pflugfurche bei ca. 3,0 MPa. Die Mächtigkeit dieses Horizontes mit hohem EDW betrug weniger als 10 cm.

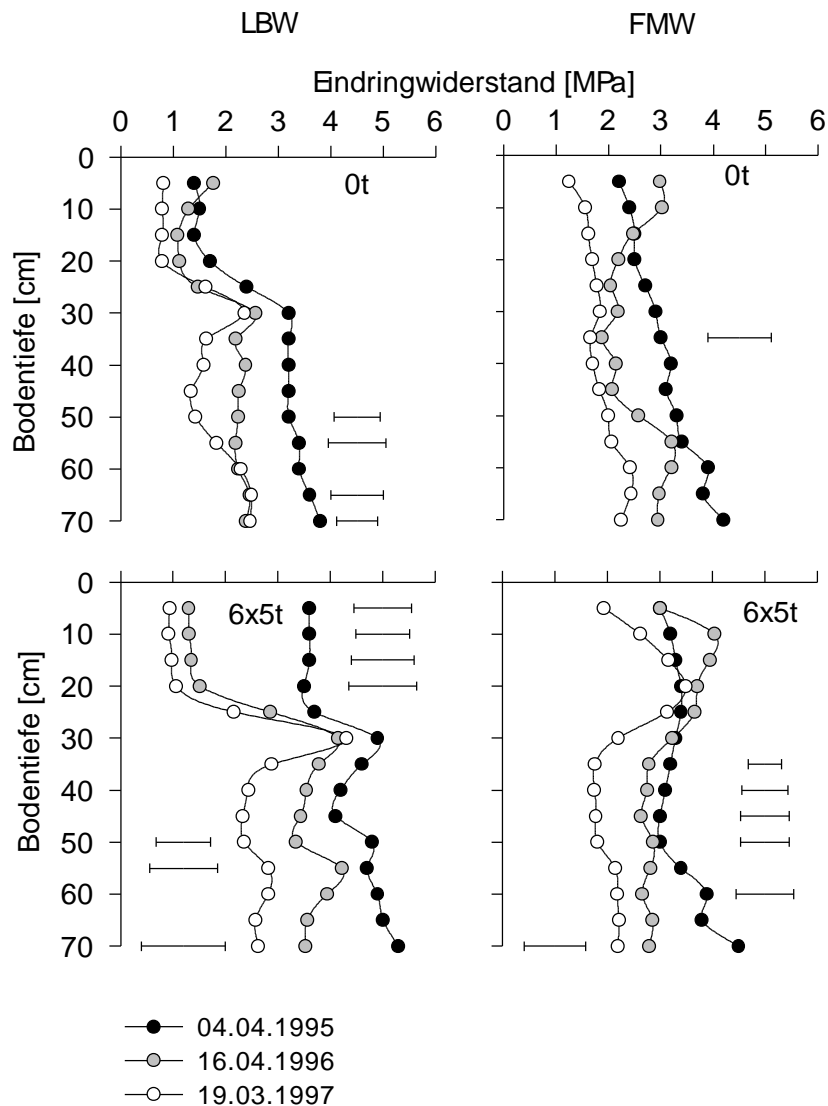


Abb. 7: Eindringwiderstand - Tiefenfunktionen des Standortes **Reinshof** der Jahre **1995,1996** und **1997**. Links dargestellt ist die Lockerbodenwirtschaft (**LBW**), rechts die Festboden-Mulchwirtschaft (**FMW**). Die Abkürzungen **0t** und **6x5t** geben die Überrollhäufigkeit x Radlast an. Aufgetragen sind arithmetische Mittelwerte. Signifikante Unterschiede zwischen den Jahren werden durch horizontale Striche (Grenzdifferenz) dargestellt.

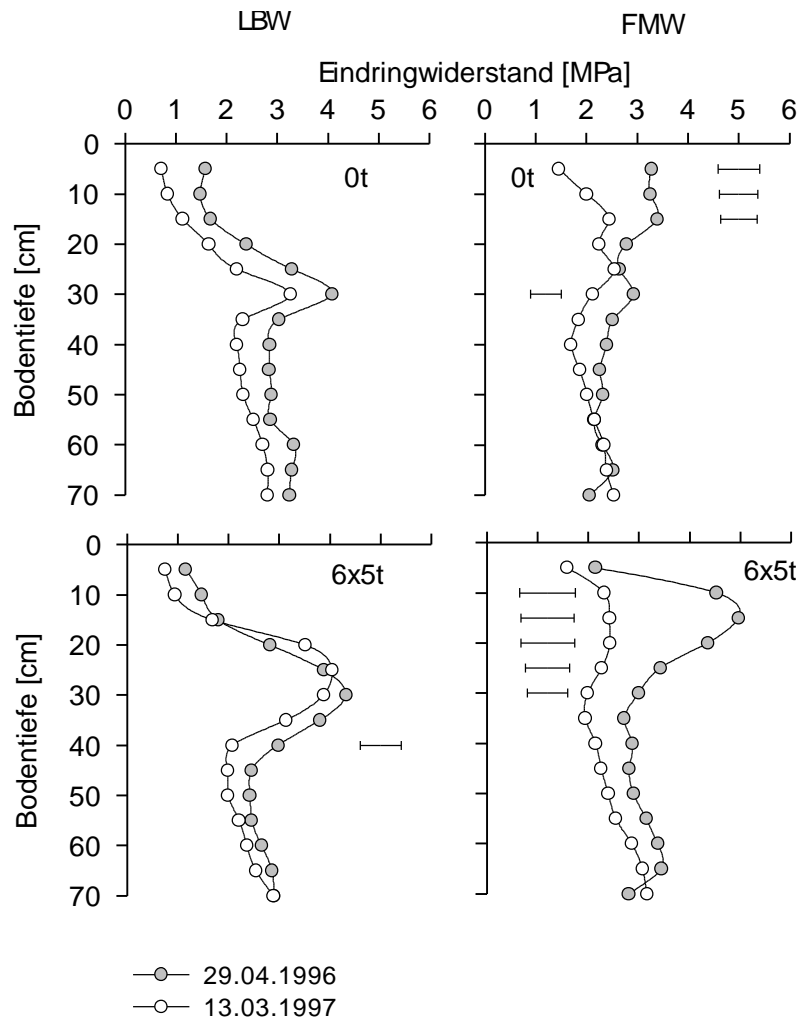


Abb. 8: Eindringwiderstand - Tiefenfunktionen des Standortes **Rellehausen** der Jahre **1996** und **1997**. Aufgetragen sind arithmetische Mittelwerte. Signifikante Unterschiede zwischen den Jahren werden durch horizontale Striche (Grenzdifferenz) dargestellt.

In **Reinshof** führte die hohe Belastung des gepflügten Bodens in der Ackerkrume zu einem Anstieg des EDW um ca. 1,5 MPa (Abb. 7, links unten). Die Mächtigkeit der Verdichtungs- und Verformungszone an der Krumbasis nahm – verglichen mit dem unbelasteten Boden – durch die hohe Belastung kaum zu. Unterhalb von 40 cm Bodentiefe lag der EDW auf dem Standort **Reinshof** bei **LBW 6x5t** in den drei Versuchsjahren jeweils um ca. 1 MPa höher als bei **LBW 0t** (Abb.7 links). Auf dem Standort **Reinshof** stieg bei **FMW 0t** der EDW - über die drei Versuchsjahre gemittelt - von ca. 1,5 MPa in der obersten Bodenschicht annähernd linear auf etwa 2,5 MPa in 70 cm Bodentiefe an. Durch die hohe Belastung wurde der EDW in den obersten 30 cm

stark erhöht. Die Höchstwerte liegen - über die Jahre gemittelt - bei 3,0 bis 3,5 MPa (Abb. 7 rechts unten). Unterhalb von 30 cm Bodentiefe unterschieden sich bei **FMW** die EDW der Böden mit unterschiedlichen Belastungsstufen nicht. Betrachtet man den EDW des gepflügten Boden über die Versuchsjahre, so zeigt sich auf dem Standort **Reinshof** bei hoher Belastung die Wirkung des Pfluges im Bearbeitungshorizont besonders deutlich: Im ersten Versuchsjahr - direkt nach der mechanischen Bodenbelastung - lag der EDW im Oberboden mit Werten um 3,5 MPa hoch. Durch die Wirkung des Pfluges wurde der EDW auf Werte um 1,1 MPa in den Jahren **1996** und **1997** gesenkt. So wie der EDW, so nahm auch die Lagerungsdichte des Bodens in der Bodenschicht um 10 cm Tiefe von **1995** nach **1997** ab (Tab. 41-43, Anhang). Unterhalb von 30 cm Bodentiefe schien der EDW auf dem gepflügten Boden bei beiden Belastungsstufen über die Versuchsjahre stetig abzunehmen (Abb. 7, links). Die Lagerungsdichten deuteten im Unterboden bei einer Tiefe von 40 cm keine Veränderung über die Zeit an. Eine tendenzielle Verringerung des EDW im Unterboden von **1995** bis **1997** war nicht nur bei **LBW**, sondern auch bei **FMW** festzustellen. Wie Tab. 41-43 im Anhang zeigen, blieben auch hier die Lagerungsdichten im Unterboden (40 cm Tiefe) über die Versuchsjahre annähernd konstant.

In **Rellehausen** zeichnete sich **1996** die Zone unter dem Bearbeitungshorizont bei **LBW 0t** mit Maximalwerten um 3,5 MPa und einer Mächtigkeit von ca. 10 cm aus (Abb. 8 links oben). Maximalwerte des EDW wurden bei **LBW 6x5t** (Abb. 8, links unten) mit ca. 4,5 MPa gemessen. Die Mächtigkeit der Zone mit hohem EDW unter dem Bearbeitungshorizont lag in etwa bei 15 cm. Die hohe Belastung führte in diesem Horizont zu einer Erhöhung des EDW um ca. 1,0 MPa (Abb. 8 links unten).

In **Rellehausen** nahm, gemittelt über **1996** und **1997**, bei **FMW 0t** der EDW bis zu einer Bodentiefe von 15 - 20 cm bis auf etwa 2,5 MPa zu (Abb. 8 rechts oben). Im Jahr **1996** lag bei **FMW** mit hoher Belastung der EDW in der Bodentiefe um 15 cm bei Höchstwerten von 5,0 MPa. Im Jahr **1997** fielen die Werte auf etwa 2,5 MPa zurück (Abb. 8 rechts). Unterhalb von 30 cm Bodentiefe lag

der EDW bei allen Belastungsstufen und über die zwei Versuchsjahre mit ca. 2,5 MPa auf gleichem Niveau (Abb. 8 rechts). Wie auf dem Standort **Reinshof** zeigte sich auch in **Rellichausen** die Tendenz, daß von einem Jahr zum anderen der EDW der Böden abnahm. Dies zeigte sich bei **FMW 6x5t** besonders deutlich (Abb. 8 rechts unten).

Bei **LBW** stieg **1995** die Lagerungsdichte des Bodens in **Rellichausen** unterhalb der Krumbasis in der Bodentiefe 30 – 36 cm von 1,57 g/cm³ ohne Belastung auf 1,65 g/cm³ bei hoher Belastung an (Tab. 44-46, Anhang). Durch die hohe Belastung wurde **1995** die Lagerungsdichte der Krumbasis stark erhöht. Im Gegensatz zum EDW zeigte die Lagerungsdichte über die Versuchsjahre **1996** und **1997** in der Krumbasis bei **LBW** keine kontinuierliche Abnahme (Tab. 44-46, Anhang). Bei **FMW 0t** wurden in den drei Versuchsjahren keine Unterschiede der Lagerungsdichte des Bodens über die Tiefe gemessen. Die hohe Belastung führte unterhalb von ca. 10 cm Bodentiefe zu einem geringfügigen Anstieg der Lagerungsdichte. In **Rellichausen** zeigte die Lagerungsdichte bei **FMW 6x5t** über die Versuchsjahre keine deutlichen Unterschiede (Tab. 44-46, Anhang).

Auf dem Standort **Großobringen** wiesen die EDW keine Unterschiede zwischen den Bearbeitungssystemen, den Belastungsstufen oder den Versuchsjahren auf (Abb. 9). Allein auf dem flach gepflügten Boden (Abb. 9 rechts unten) lag der EDW in der Bodenschicht um 15 cm **1997** signifikant höher als im Jahr **1996**. Im Gegensatz zu **Reinshof** und **Rellichausen** wurden Werte von 2,0 MPa kaum erreicht und überschritten.

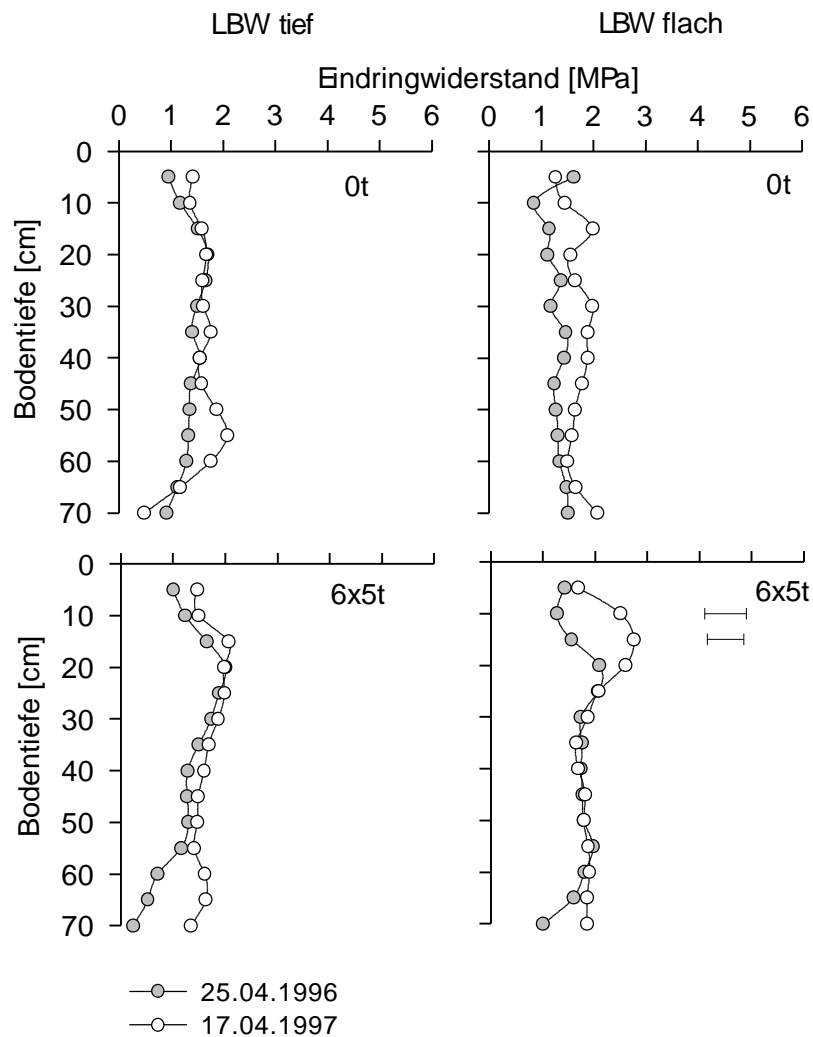


Abb. 9: Eindringwiderstand - Tiefenfunktionen des Standortes **Großobringen** der Jahre **1996** und **1997**. Links dargestellt ist die Lockerbodenwirtschaft mit tiefer Bearbeitung, rechts die Lockerbodenwirtschaft mit flacher Bearbeitung. Aufgetragen sind arithmetische Mittelwerte. Signifikante Unterschiede zwischen den Jahren werden durch horizontale Striche (Grenzdifferenz) dargestellt.

Bei beiden Bearbeitungssystemen lagerte der Boden nach der hohen Belastung in der Bodenschicht von ca. 15 cm bis zur maximalen Meßtiefe (40 cm Bodentiefe) deutlich dichter als der Boden ohne Belastung (Tab. 47, Anhang). Die Zunahme der Lagerungsdichte bei Bodenbelastung deutete auf eine Gefügeveränderung hin. Diese Gefügeveränderung spiegelte sich nicht in den EDW wider.

4.1.2 Transportfunktionen

Neben der Verankerung der Pflanze im Boden ist die Wasser- und Nährstoffaufnahme eine der wichtigsten Aufgaben der Wurzel. Alle Prozesse der Stoffaufnahme und -abgabe sind in hohem Maße abhängig von den Eigenschaften, die den umgebenden Boden charakterisieren. Ist der Porenraum eingeschränkt oder sind existierende Poren isoliert und bilden kein vernetztes System, kann die Gasdiffusion im Boden beeinträchtigt sein. Dies kann dazu führen, daß das Entweichen des von den Wurzeln produzierten Kohlendioxids über das Porensystem ebenso behindert wird wie der Eintritt von Sauerstoff in den Boden. Nach einer Literaturstudie von GRABLE & SIEMER (1968) liegt der für das Pflanzenwachstum kritische D_s/D_o -Wert bei 0,02. Fallen die D_s/D_o -Werte unter 0,02, kann mit Wachstumsstörungen der Pflanzen gerechnet werden. In den Graphiken zum Gasaustausch ist der D_s/D_o -Wert 0,02 durch die horizontalen gestrichelten Hilfslinien markiert. Die vertikalen gestrichelten Hilfslinien kennzeichnen ein luftgefülltes Porenvolumen von $0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Das entspricht einem Anteil von 10 % am Gesamtporenvolumen.

Für die Wasserbewegung im teilgesättigten Boden stellt die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit (k_u) eine Kenngröße dar, unter der die Eigenschaften des Bodens zusammengefaßt werden, welche die Fließbewegung des Wassers als Massenfluß beeinflussen. Solche Einflüsse gehen von der Porengröße und der Porenform (Porengeometrie) aus, die ihrerseits von der Textur und der Struktur des Bodens bestimmt werden.

Die große Bedeutung des Porendurchmessers für die Wasserleitung als Massenfluß drückt sich im starken Abfall von k_u mit zunehmender Wasserspannung aus. Ein hoher Anteil an groben Poren in einer Bodenschicht bedingt einen hohen Fließquerschnitt und ermöglicht so eine große Transportrate, solange die Proben mit Wasser gefüllt sind.

4.1.2.1 Gasdiffusion

Auf dem Standort **Reinshof** wurde im ersten Versuchsjahr bei **LBW** mit steigender mechanischer Belastung der luftgefüllte Porenraum bei einer Wasserspannung von pF 2,0 in der Bodenschicht von 28-34 cm reduziert (Abb. 10 oben). Diese Reduktion des Porenvolumens (Poren > $30 \mu\text{m}$ Äquivalenzdurch-

messer) führte zu einer Abnahme des relativen scheinbaren Diffusionskoeffizienten, D_s/D_o von ca. 0,05 auf 0,015. Der Kennwert D_s/D_o beschreibt das Verhältnis des scheinbaren Diffusionskoeffizienten im Boden (D_s) zum Sauerstoff-Diffusionskoeffizienten in Luft (D_o) und wird im weiteren Verlauf des Textes als Diffusionskoeffizient abgekürzt.

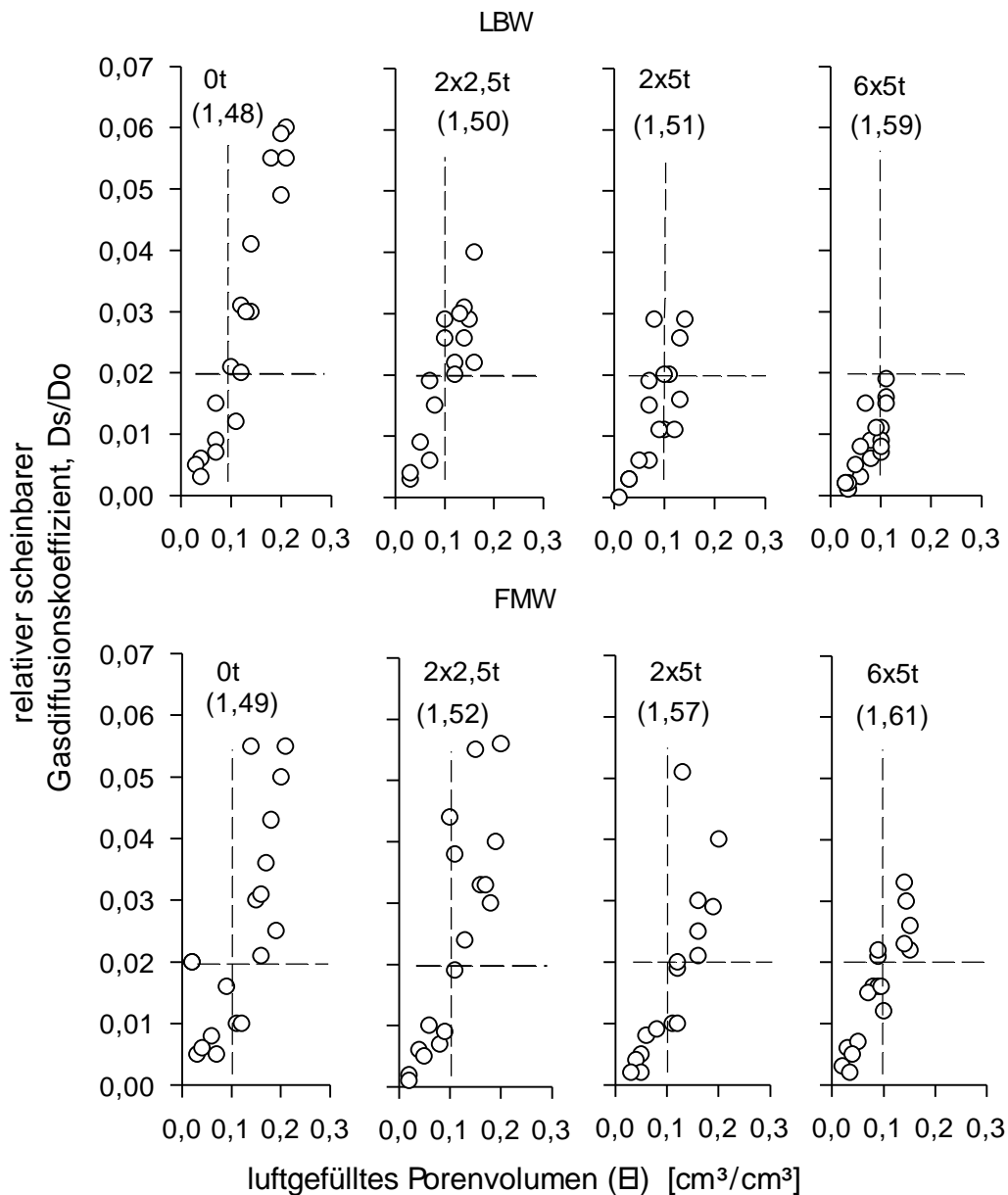


Abb. 10: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (θ) auf den Standort **Reinshof** am 12.04.1995 in 28-34 cm Bodentiefe. Die Zahlen in Klammern geben Mittelwerte der Lagerungsdichte des Bodens [g/cm^3] in der untersuchten Probe an. Die gestrichelten Hilfslinien werden im Text erklärt. Die D_s/D_o -Werte bei $pF\ 2,0$ sind durch ausgefüllte Symbole dargestellt.

Besonders deutlich zeigte sich die Begrenzung des Diffusionskoeffizienten auf hoch belastetem Boden. Bei dieser Variante lagen alle Diffusionskoeffizienten unter 0,02.

Auf dem Boden mit **FMW** stellte sich die Abnahme des luftführenden Porenvolumens und der Diffusionskoeffizienten bei mechanischer Belastung weniger drastisch dar als auf gepflügtem Boden (Abb. 10 unten): Bei geringer Belastung zeigte sich keine Veränderung zur Kontrolle. Erst bei mittlerer Belastung nahmen der luftgefüllte Porenraum und der Diffusionskoeffizient ab. Diese Tendenz setzte sich bei hoher Belastung fort. Die Diffusionskoeffizienten sanken noch weiter ab, erreichten aber nicht die Werte von **LBW 6x5t**. Mit der Abnahme des luftführenden Porenraumes (EI) und der Diffusionskoeffizienten ging die Zunahme der Lagerungsdichte einher (Abb. 10).

Auf dem Standort **Rellehausen (1995)** führte die mittlere und hohe mechanischen Bodenbelastung bei **LBW** zu einer starken Zunahme der Lagerungsdichte, verbunden mit einer Reduktion des luftführenden Porenraumes. Dies zog eine drastischen Beeinträchtigung der Diffusion nach sich (Abb. 11). Im Gegensatz zu **Reinshof** (Abb. 10 oben) war in **Rellehausen** auf dem gepflügten Boden – vor allem bei mittlerer und hoher Bodenbelastung - die Abnahme der Diffusionskoeffizienten stärker. Bei **LBW 2x5t** lagen die D_s/D_o - Wert bis auf eine Ausnahme unter 0,02. Bei **LBW 6x5t** wurde der D_s/D_o - Wert 0,02 deutlich unterschritten. Bei **FMW** nahm die Lagerungsdichte in **Rellehausen** mit steigender Belastung deutlich zu (Abb. 11 unten). Wie auch bei gepflügtem Boden wurde bei einer höheren Dichte des Bodens eine Reduktion des luftgefüllten Porenraumes und eine Beeinträchtigung der Diffusion (Abb. 11) gemessen, aber doch weit weniger ausgeprägt als bei **LBW**.

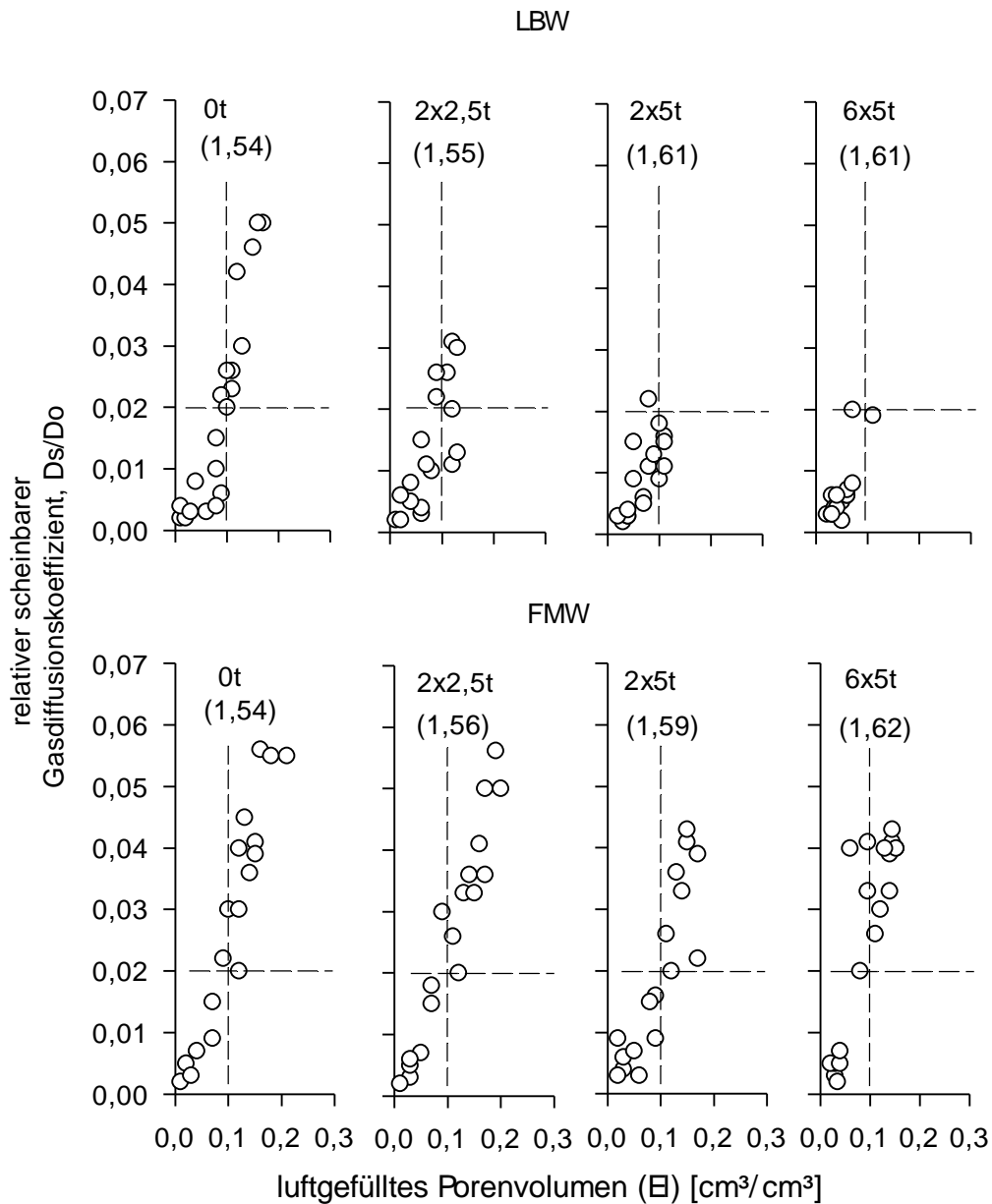


Abb. 11: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (E) auf den Standort **Rellehausen** am 26.04.1995 in 28-34 cm Bodentiefe. Die Zahlen in Klammern geben Mittelwerte der Lagerungsdichte des Bodens [g/cm^3] in der untersuchten Probe an. Die gestrichelten Hilfslinien werden im Text erklärt. Die D_s/D_o -Werte bei pF 2,0 sind durch ausgefüllte Symbole dargestellt.

Wie in **Reinshof** und **Rellehausen** kam es in **Großbringen** auf gepflügtem Boden bei mechanischer Bodenbelastung zu einem Anstieg der Lagerungsdichte, verbunden mit einem Verlust an luftgefülltem Porenraum und einer Beeinträchtigung der Diffusion (Abb.12).

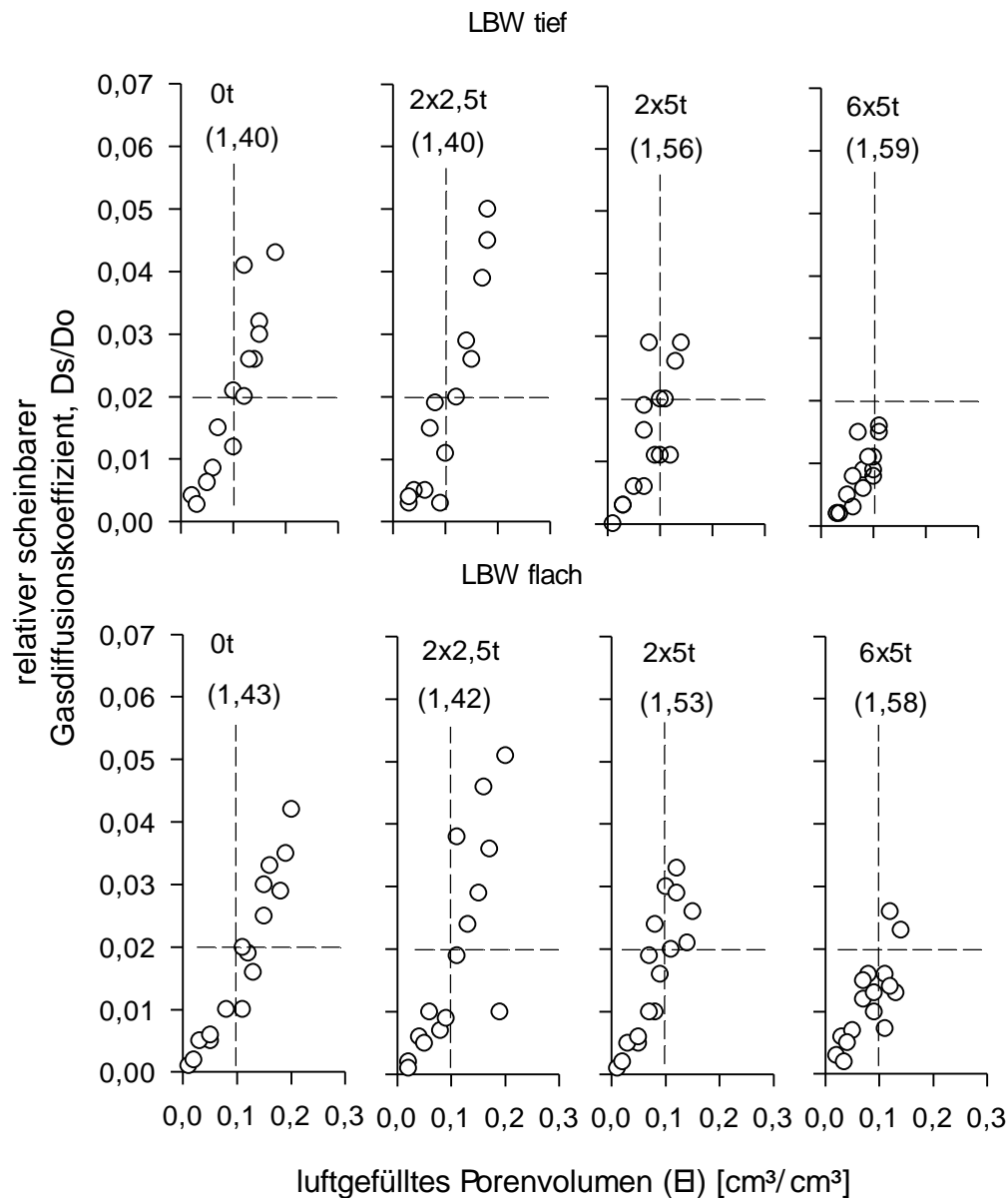


Abb. 12: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (EI) auf den Standort **Großobringen** am 24.03.1995 in 28-34 cm Bodentiefe. Die Zahlen in Klammern geben Mittelwerte der Lagerungsdichte des Bodens [g/cm³] in der untersuchten Probe an. Die gestrichelten Hilfslinien werden im Text erklärt. Die D_s/D_o -Werte bei pF 2,0 sind durch ausgefüllte Symbole dargestellt.

Bei beiden Bearbeitungssystemen führte die geringe Bodenbelastung nicht zu einem Anstieg der Lagerungsdichte oder zu einer Beeinträchtigung der Diffusion. Erst bei mittlerer und hoher Bodenbelastung wurden in beiden Systemen die Lagerungsdichten erhöht und die Diffusionskoeffizienten reduziert. Dies zeigte sich bei tiefer Bodenbearbeitung deutlicher als bei flacher Bearbeitung.

Auf dem Standort **Reinshof** wurden im Frühjahr **1997** erneut Messungen der Gasdiffusion durchgeführt (Abb. 13). Die Untersuchung sollte zeigen, ob sich die Bedingungen vor allem auf hoch belastetem Boden bei **LBW** über die Zeit geändert haben.

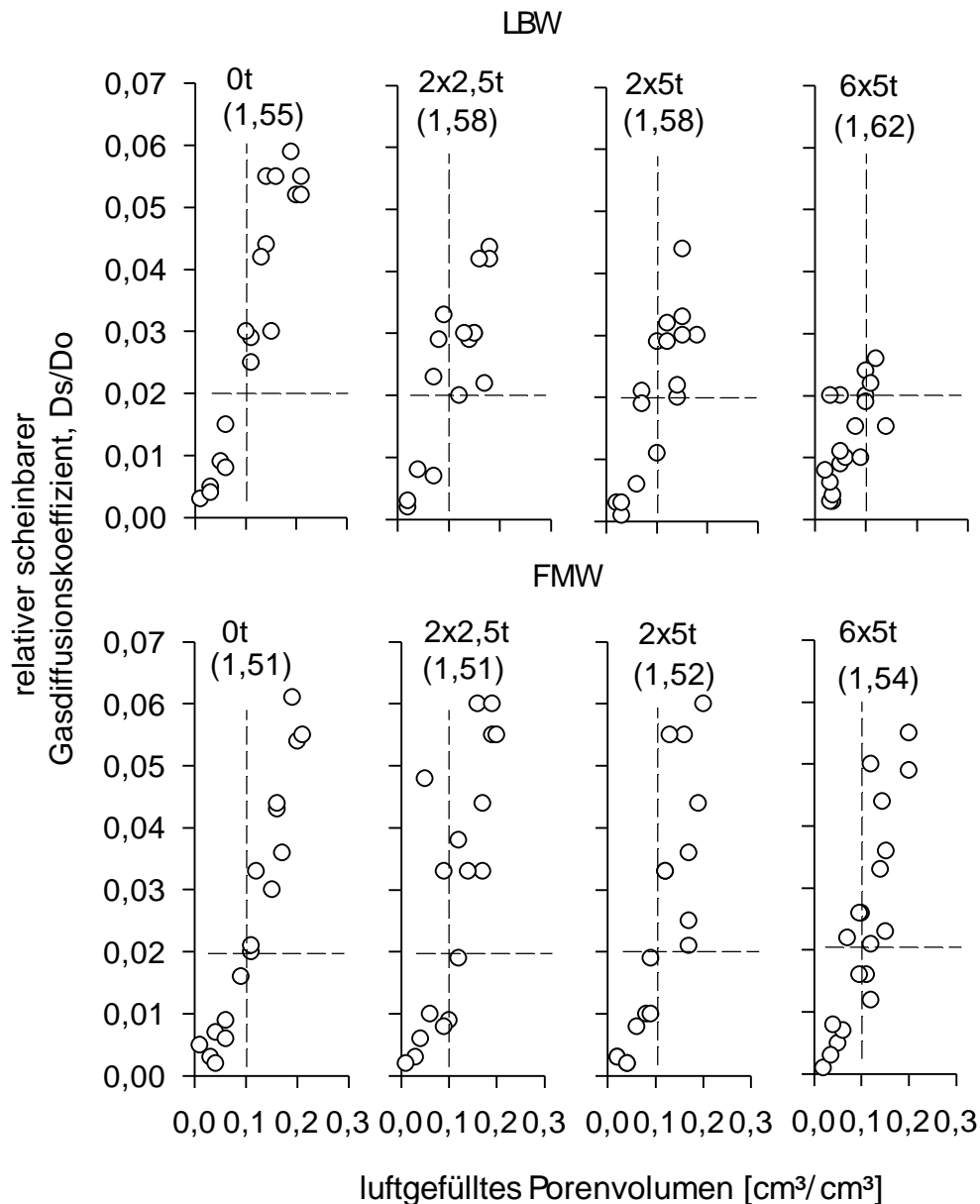


Abb. 13: Beziehung zwischen D_s/D_o und dem luftgefüllten Porenvolumen (EI) auf den Standort **Reinshof** am 16.04.1997 in 28-34 cm Bodentiefe. Die Zahlen in Klammern geben Mittelwerte der Lagerungsdichte des Bodens [g/cm^3] in der untersuchten Probe an. Die gestrichelten Hilfslinien werden im Text erklärt. Die D_s/D_o -Werte bei $pF\ 2,0$ sind durch ausgefüllte Symbole dargestellt.

Bei **LBW** konnte auch zwei Jahre nach der mechanischen Belastung eine Abnahme des luftgefüllten Porenraumes, gekoppelt mit einer Abnahme der Diffusionskoeffizienten bei geringer, mittlerer und hoher Belastung gemessen werden (Abb. 13 oben). Dennoch sind Veränderungen aufgetreten: Die Abnahme der Diffusionskoeffizienten von **LBW 0t** nach **2x2,5t** und **2x5t** war **1997** auf dem gepflügten Boden (Abb. 13 oben) deutlich geringer als **1995** (Abb. 10 oben). Bei einem Vergleich des ersten und dritten Versuchsjahres der Variante **LBW 6x5t** deutete sich die Zunahme des Porenanteils $> 30 \mu\text{m}$ Äquivalenzdurchmesser an (Abb. 13 oben, ausgefüllte Symbole). Der größere Porenanteil führte zu einem Anstieg der Diffusionskoeffizienten, der D_s/D_o - Wert von 0,02 wurde im Gegensatz zu **1995** überschritten.

Wie im ersten Versuchsjahr waren **1997** die Diffusionskoeffizienten als Funktion des luftgefüllten Porenvolumens auf dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden bei keiner, geringer und mittlerer Bodenbelastung annähernd identisch (Abb. 13 unten). Insgesamt lagen bei diesen Varianten **1997** die Diffusionskoeffizienten geringfügig über denen von **1995**. Auf dem hoch belasteten Boden zeigte sich **1997**, im Vergleich zu **1995**, ein deutlicher Anstieg der Diffusionskoeffizienten.

Die Lagerungsdichten des gepflügten Bodens lagen **1997** (Abb. 13 oben) bei keiner, geringer und mittlerer Bodenbelastung auf gleichem Niveau, insgesamt aber auffallend höher als im ersten Versuchsjahr (Abb. 10 oben). Bei hoher Belastung wurde im Vergleich zu den ersten drei Belastungsstufen und dem Jahr **1995** die höchste Lagerungsdichte gemessen. Auf dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden stieg die Lagerungsdichte von $1,44 \text{ g/cm}^3$ auf dem Boden ohne Belastung auf $1,58 \text{ g/cm}^3$ bei hoher Bodenbelastung an (Abb. 13 unten). Diese Werte entsprachen in etwa den Lagerungsdichten des Jahres **1995** (Abb. 10 unten).

4.1.2.2 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Auf dem Standort **Reinshof** verlief die Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in der Bodentiefe 28-34 cm bei **LBW 0t**, **2x2,5t** und **2x5t** sowie bei **FMW** (alle Belastungsstufen) nahezu auf gleicher Höhe (Abb. 14).

Durch die Belastung mit **6x5t** wurde die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei einer Wasserspannung zwischen 10 und 50 hPa auf dem gepflügten Boden stark reduziert.

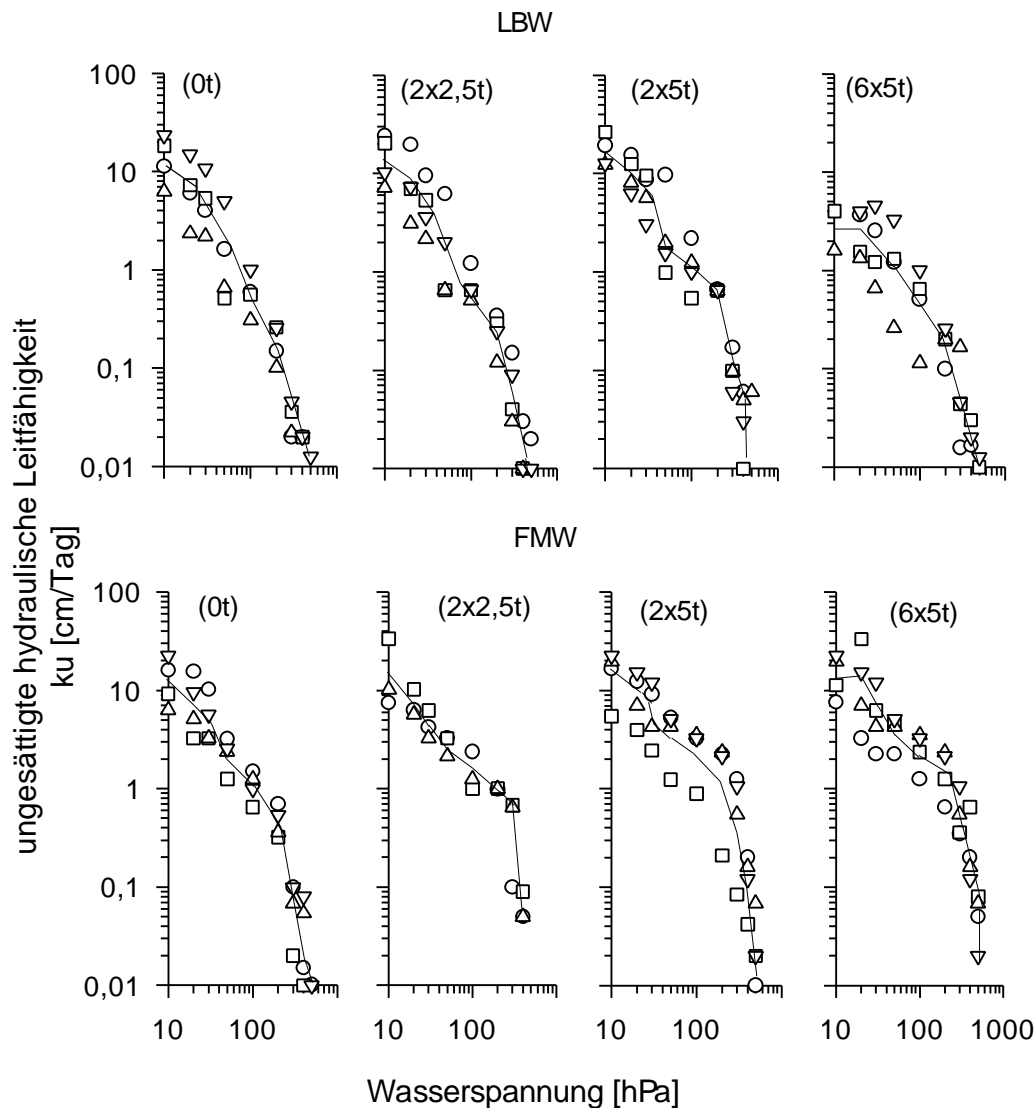


Abb. 14: Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_u) und der Wasserspannung des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm am 12.04.1995 auf dem Standort **Reinshof**. Gleiche Symbole stehen für die Meßwerte gleicher Stechzylinderproben. Die durchgezogene Linie verbindet die geometrischen Mittel der k_u -Werte bei gleicher Wasserspannung miteinander.

Auf dem Standort **Rellehausen** stellte sich die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit in der Bodentiefe 28-34 cm ähnlich dar wie auf dem Standort **Reinshof**: Nur bei **LBW 6x5t** und einer Wasserspannung zwischen 10 und 50 hPa lag die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit deutlich unter den Werten der

drei anderen Belastungsstufen (**LBW** und **FMW**) bei gleicher Wasserspannung (Abb. 15).

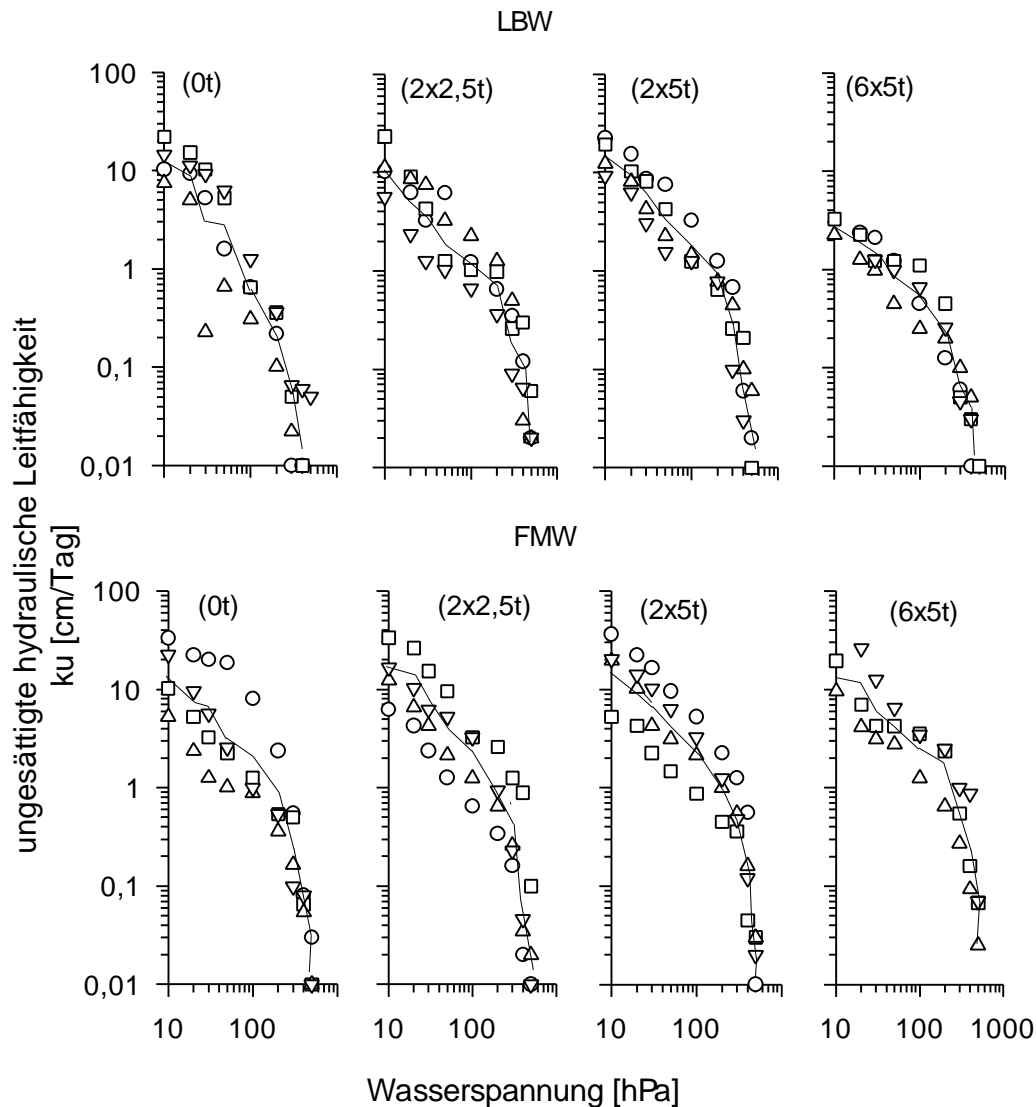


Abb. 15: Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_u) und der Wasserspannung des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm am 26.04.1995 auf dem Standort **Relliehausen**. Gleiche Symbole stehen für die Meßwerte gleicher Stechzylinderproben. Die durchgezogene Linie verbindet die geometrischen Mittel der k_u -Werte bei gleicher Wasserspannung miteinander.

Auf dem Standort **Großobringen** fiel die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit in der Bodenschicht 28-34 cm bei **LBW tief** und **LBW flach** annähernd identisch aus (Abb. 16). Die Werte auf dem **tief** und **flach** bearbeiteten Boden la-

gen bei hoher Bodenbelastung und einer Wasserspannung von ca. 10-50 hPa deutlich unter den Werten der anderen Belastungsstufen.

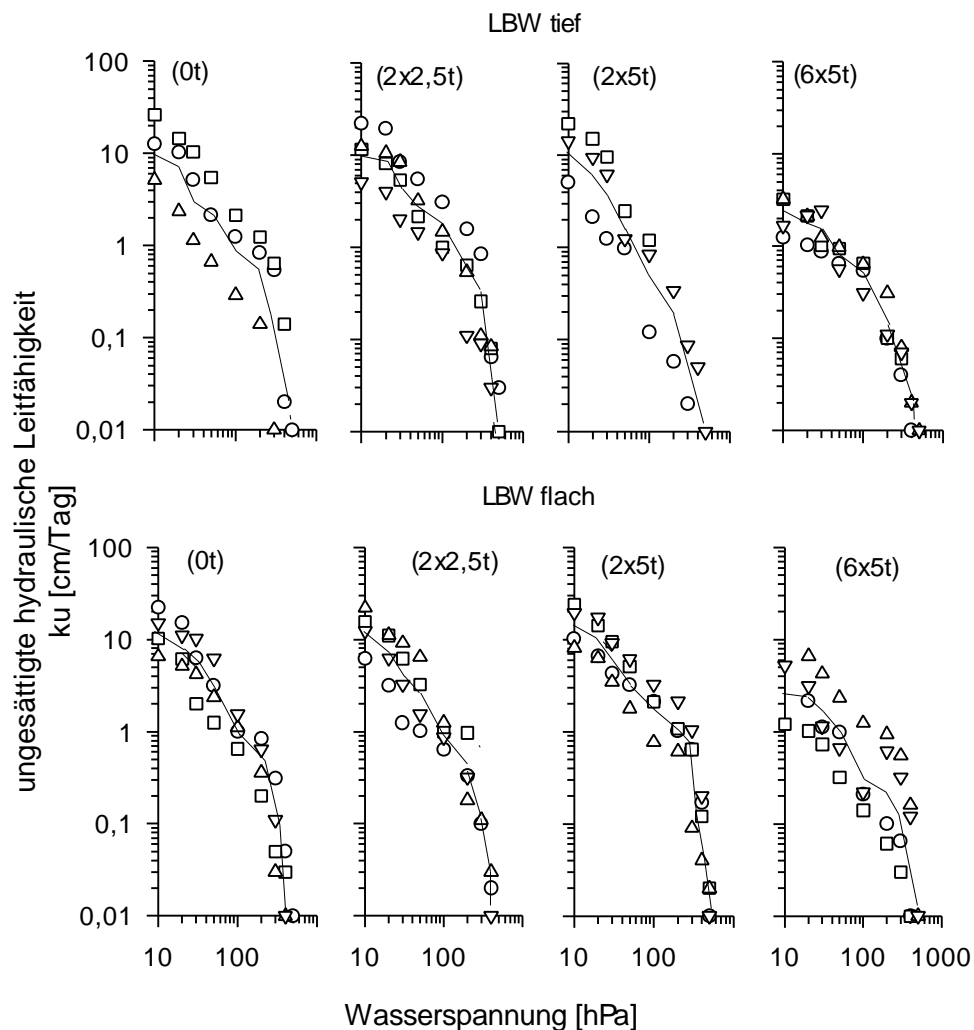


Abb. 16: Beziehung zwischen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_u) und der Wasserspannung des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm am 24.03.1995 auf dem Standort **Großobringen**. Gleiche Symbole stehen für die Meßwerte gleicher Stechzylinderproben. Die durchgezogene Linie verbindet die geometrischen Mittel der k_u -Werte bei gleicher Wasserspannung miteinander.

In **Großobringen** war der Unterschied zwischen den ersten drei Belastungsstufen zur hoch belasteten Stufe in den k_u -Werten bei niedriger Wasserspannung größer (eine Zehnerpotenz) als bei den anderen Standorten. Zudem wurde im Vergleich zu den Standorten **Reinshof (LBW)** und **Rellehausen (LBW)** in **Großobringen** die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei einer Wasserspannung zwischen 10 und 50 hPa durch den hohen Lasteintrag auf beiden Bearbeitungsvarianten stärker reduziert.

4.2 Bestandesentwicklung

Im vorangegangenen Kapitel wurde aufgezeigt, welche Auswirkung die mechanische Bodenbelastung auf den EDW, die Lagerungsdichte und die Transportfunktionen der Böden für Gas und Wasser hatte. Die Untersuchung der Wurzelsysteme sollte zeigen, wie die Pflanzen auf die auflastbedingte Veränderung der Wachstumsbedingungen im Boden reagieren. Neben dem Wasser- und Nährstoffangebot des Bodens und seiner Leitfähigkeit für Wasser und Gas hat die Größe und die Leistungsfähigkeit des Wurzelsystems einen direkten Einfluß auf das oberirdische Pflanzenwachstum. Um Auswirkungen der mechanischen Bodenbelastung über das Wurzelsystem auf Sproß und Blattwachstum zu erfassen, wurde die Massezunahme der oberirdischen Pflanzenteile und die Ausprägung der Blattfläche festgehalten. Messungen der Gesamtwasserspannung und des $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Gaswechsels der Pflanzen sollten zeigen, inwieweit die mechanische Bodenbelastung – über Wurzel- und Sproßwachstum – eine Einschränkung der Photosyntheseleistung bewirken kann.

4.2.1 Wurzelsystem

4.2.1.1 Standort **Reinshof**

Für den Standort **Reinshof** wird das Wurzelsystem der Sommergerste (**1995**) und der Wintergerste (**1997**) zunächst an Wurzelprofilen in den Abb. 17 und 18 vorgestellt. Auf die Darstellung der Wurzelprofile des Winterweizes (**1996**) wird an dieser Stelle verzichtet, da das Wurzelwachstum des Weizens nur schwach durch die Bodenbelastung beeinträchtigt wurde. Eine Darstellung der WLD des Winterweizens **1996** findet sich in den Tab. 52-54 im Anhang. Im Anschluß an die Beschreibung der Wurzelprofile soll die GWL und die maximale Durchwurzelungstiefe in Abb. 19 betrachtet werden. Am Wurzelprofil lassen sich un schwer Bearbeitungshorizonte, durchwurzelte Bioporen und Durchwurzelungswiderstände erkennen: Horizontale Übergänge von hoher zu geringerer Punktdichte trennen bei **LBW** in ca. 25 cm Bodentiefe den bearbeiteten, aufgelockerten Boden vom unbearbeiteten Unterboden (Beispiel: gestrichelte Hilfslinie in Abb. 18 **LBW 2x5t**). Bei dem nicht gepflügten Boden wurden bei der Aussaat durch die vorlaufende Kreiselegge die ersten 5 bis 7 cm des Bodens aufgelock-

kert. Hohe Punktdichten in dieser Schicht spiegeln eine hohe Durchwurzelungsdichte wider. Wird eine Biopore intensiv durchwurzelt, zeigt das Wurzelprofil eine vertikal ausgerichtete, eng und scharf begrenzte Fläche mit deutlich erhöhter Punktdichte (Beispiel: gestrichelte Hilfslinie in Abb. 18 **FMW 2x5t**).

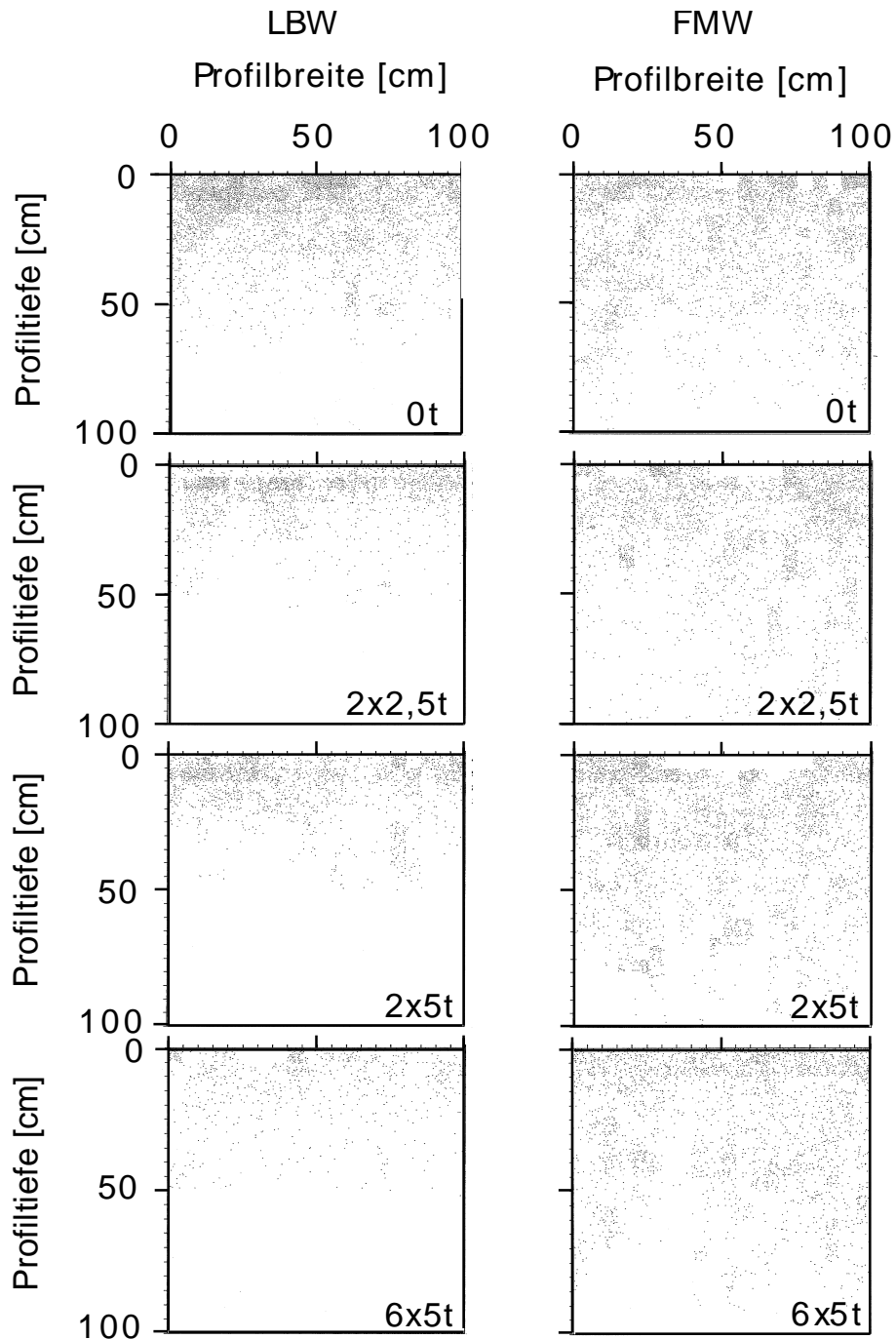


Abb.17: Wurzelprofil für Sommergerste nach der Profilwandmethode im Versuchsjahr **1995** auf dem Standort **Reinshof**. Die Zählung wurde zum Stadium EC 45 (03.07.1995) durchgeführt. Jeder Punkt entspricht einer Wurzellängeneinheit von 0,5 cm.

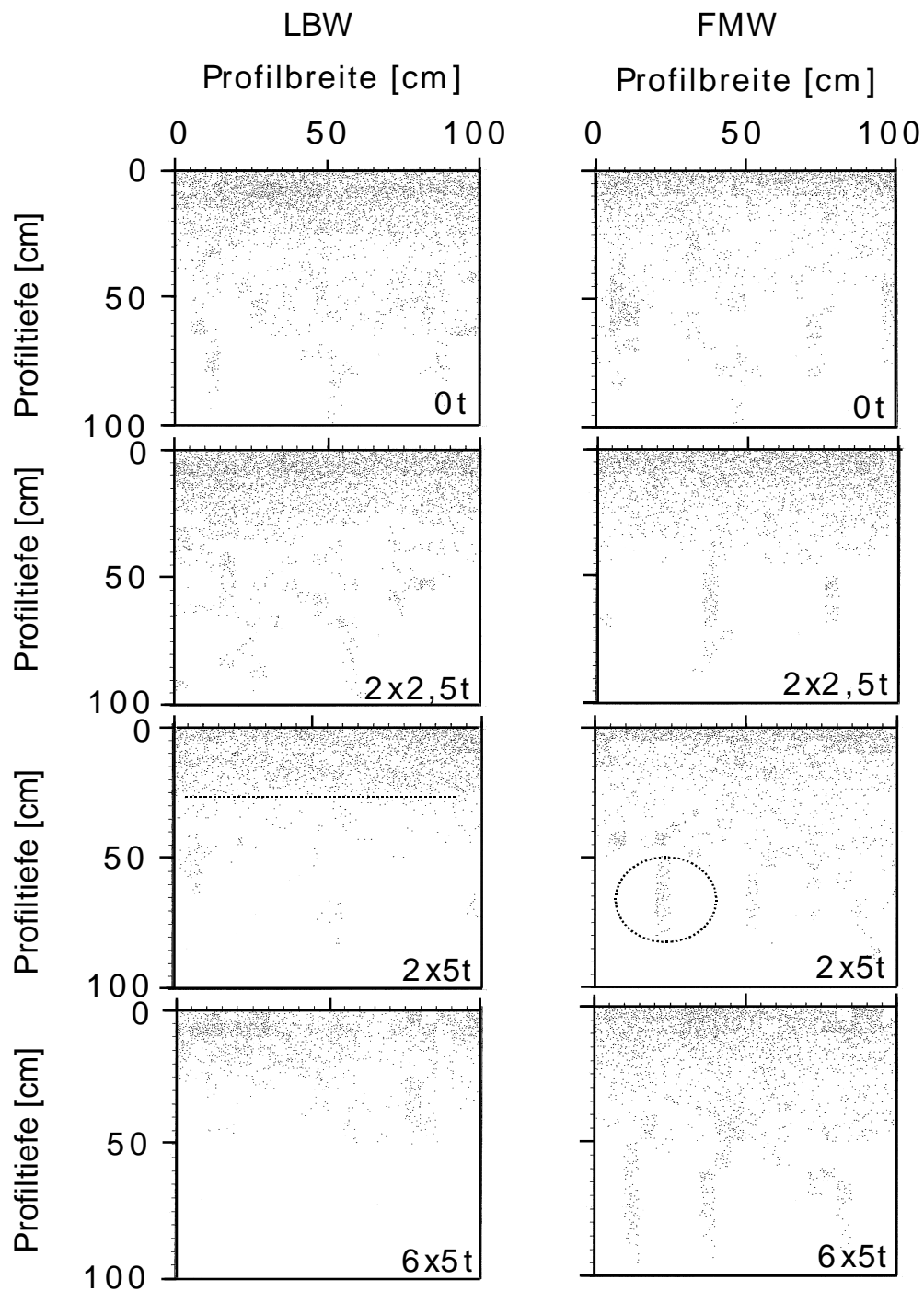


Abb. 18: Wurzelprofil für Wintergerste nach der Profilwandmethode im Versuchsjahr **1997** auf dem Standort **Reinshof**. Die Zählung wurde zum Stadium EC 45 (02.06.1997) durchgeführt. Jeder Punkt entspricht einer Wurzellängeneinheit von 0,5 cm. Die gestrichelten Hilfslinien werden im Text erläutert.

Im ersten Versuchsjahr war das Wurzelsystem der Sommergerste auf dem gepflügten Boden mit geringer, mittlerer und hoher Bodenbelastung gegenüber dem nicht belasteten Boden deutlich eingeschränkt: Über die gesamte Durchwurzelungstiefe nahm die Wurzellängendichte mit steigender Belastung des Bodens ab. Der Grad der Einschränkung war bei hoher Belastung stärker als bei geringer und mittlerer Bodenbelastung.

Auf dem flach bearbeiteten Boden (Abb. 17 rechts) konnten **1995** keine Auswirkungen der Bodenbelastung auf die WLD festgestellt werden. Ein Vergleich der Bearbeitungssysteme zeigte für **FMW** eine Durchwurzelung mit höherer Intensität und größerer Tiefe.

Im Jahr **1997** – zwei Jahre nach der mechanischen Bodenbelastung – war die Wurzellängendichte der Wintergerste von **LBW 0t** und **LBW 2x2,5t** auf gleichem Niveau (Abb. 18 links). Deutlich geringer stellte sie sich bei **LBW 2x5t** und **6x5t** dar. Auf dem gepflügten Boden ist bei allen Belastungsstufen die Pflugsohle oder Krumenbasisverdichtung deutlich an der sprunghaften Abnahme der Punktdichte in ca. 25 cm Tiefe zu erkennen (Beispiel: gestrichelte Hilfslinie in Abb. 18 **LBW 2x5t**). Das Wurzelprofil von **2x5t** und **6x5t** zeigt, wie stark eine Pflugsohle als Durchwurzelungswiderstand wirken kann: Nur vereinzelt konnten Wurzeln den verdichteten Horizont durchbrechen. Eine Durchwurzelung des Unterbodens fand kaum statt. Bei **FMW** konnte im letzten Versuchsjahr (Abb. 18 rechts) kein Einfluß der mechanischen Bodenbelastung auf das Wurzelwachstum festgestellt werden.

Aus der WLD der Bodenschichten errechnet sich die GWL. Sie wird angegeben in km Wurzellänge unter 1 m² Bodenoberfläche. Abb. 19 zeigt die GWL bei den Bearbeitungssystemen **LBW** und **FMW** auf dem Standort **Reinshof** in den drei Versuchsjahren. Die Darstellung der GWL – unterteilt in Ober- und Unterboden - soll einen Vergleich der Wurzelsysteme beider Bearbeitungssysteme und aller Belastungsstufen vereinfachen.

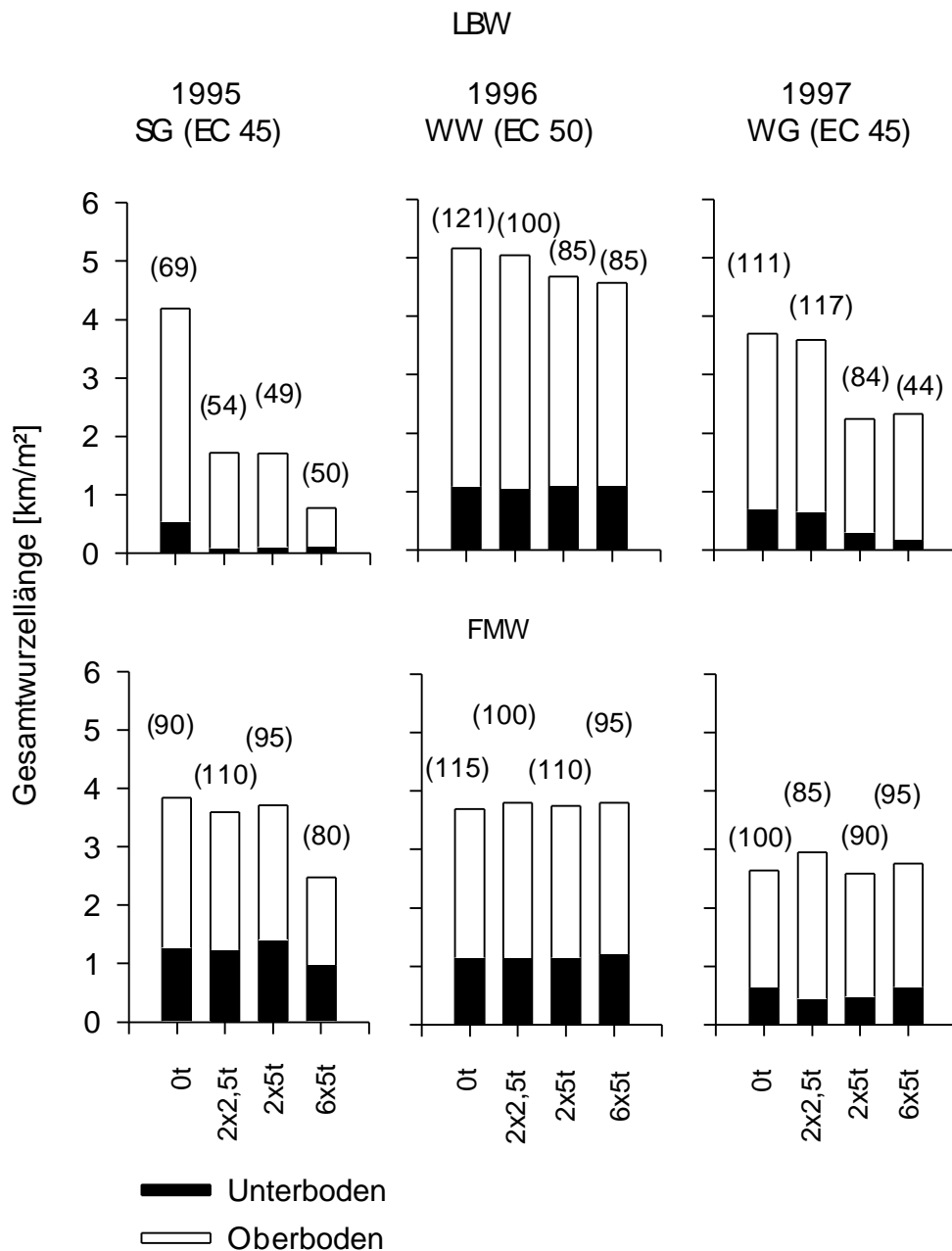


Abb.19: Gesamtwurzellänge (GWL) und GWL in Oberboden (0-30 cm Bodentiefe, weiße Säulen) und Unterboden (von 30 cm Bodentiefe - maximale Durchwurzelungstiefe, schwarze Säulen) auf dem Standort **Reinshof**. Dargestellt sind auch die Beprobungstermine und die angebauten Feldfrüchte: 03.07.1995 Sommergerste (SG); 12.06.1996 Winterweizen (WW); 02.06.1997 Wintergerste (WG). Die Zahlen in Klammern zeigen die maximale Durchwurzelungstiefe [cm].

Bei **LBW 1995** (Abb. 19 oben links) ist die Auswirkung der mechanischen Bodenbelastung auf das Wurzelsystem der Sommergerste offensichtlich: Verglichen mit dem unbelasteten Boden führte die geringe und mittlere Belastung zu einer Reduktion der GWL um 59 %. Die GWL auf dem hoch belasteten Boden erreichte nur 18 % der GWL auf der Kontrolle (**LBW 0t**). Besonders drastisch war der Effekt der Belastung auf die Durchwurzelung des Unterbodens: Die GWL des Unterbodens bei geringer, mittlerer und hoher Bodenbelastung erreichte nur ca. 15 % des entsprechenden Wertes im unbelasteten Boden. Neben der Gesamtlänge des Wurzelsystems wurde auch die Tiefe der Durchwurzelung beeinträchtigt. Die Sommergerste auf dem Boden ohne Belastung (**LBW 0t**) wurzelte etwa 18 cm tiefer als bei geringer, mittlerer und hoher Bodenbelastung. Im Versuchsjahr **1996** (Abb. 19 oben mitte) zeigte das Wurzelsystem des Winterweizens – verglichen mit der Sommergerste - im Ober- und Unterboden eine geringere Empfindlichkeit gegen die mechanische Bodenbelastung. Dennoch wurden Unterschiede zwischen den Belastungsstufen gemessen. Auf dem gepflügten Boden nahm die Durchwurzelung des Oberbodens mit steigender Belastung merklich ab. Die GWL fiel von **0t** nach **6x5t** um 12 % ab. Die WLD im Unterboden war bei allen Belastungsstufen annähernd gleich. Bei **2x5t** und **6x5t** erreichte das Wurzelsystem eine um ca. 19 % geringere Tiefe als bei **0t** und **2x2,5t**. Im dritten Versuchsjahr (Abb. 19 oben rechts) lag die GWL der Wintergerste bei **0t** und **2x2,5t** auf gleichem Niveau. Bei **2x5t** und **6x5t** nahm die GWL um ca. 36 % ab. Die GWL des Unterbodens erreichte bei **2x5t** 43 % und bei **6x5t** nur 24 % der Kontrolle (**LBW 0t**).

Bei **FMW** (Abb. 19 unten links) zeigte im ersten Versuchsjahr das Wurzelsystem der Sommergerste nur auf dem hoch belasteten Boden eine Reduktion der GWL: Im Oberboden erreichten die Werte 58 %, im Unterboden 75 % der Kontrolle (**FMW 0t**). Nicht nur die WLD, sondern auch die Durchwurzelungstiefe war eingeschränkt. Im zweiten und dritten Versuchsjahr lagen die Werte der GWL im Ober- und Unterboden bei allen Belastungsstufen auf einem Niveau. Auch wurde die maximalen Durchwurzelungstiefe nicht deutlich reduziert (Abb. 19 mitte und rechts). Ein Vergleich der Bearbeitungssysteme zeigte **1995** vor allem bei der Unterbodendurchwurzelung eine größere Streßverträglichkeit der **FMW**: Bei zunehmender Radlast und steigender Überrollhäufigkeit blieb die Durchwurzelung des Unterbodens bei **FMW** annähernd gleich. Bei **LBW** hinge-

gen führte die mechanische Bodenbelastung zu einer drastischen Abnahme der Durchwurzelung des Unterbodens. Im zweiten Versuchsjahr war bei **FMW** die Oberbodendurchwurzelung beträchtlich geringer als bei **LBW** nach Pflugeinsatz. Die Unterbodendurchwurzelung erreichte unabhängig von der Belastungsstufe bei beiden Bearbeitungssystemen dieselbe Höhe. So wie im ersten Versuchsjahr, so konnte auch im dritten Versuchsjahr eine größere Unempfindlichkeit des **flach** bearbeiteten Bodens gegenüber mechanischer Belastung festgestellt werden: Die Durchwurzelung des Ober- und Unterbodens stellte sich - im Gegensatz zum gepflügten Boden (Abb. 19 oben rechts) - unabhängig von der Belastungsstufe dar (Abb. 19 unten rechts).

Im Rahmen einer Diplomarbeit (MERTEN1998) wurde auf dem Standort **Reins-
hof** auf Block 2 im Jahr **1996** der Wurzeldurchmesser des Winterweizens in drei Bodentiefen gemessen (Abb. 20). Die Beprobungstiefen wurden so gewählt, daß bei **LBW** Messungen in der gelockerten Krume (11-22 cm Bodentiefe), im Bereich der Pflugsohle (22-32 cm Bodentiefe) und unterhalb der Pflugsohle (33-43 cm Bodentiefe) möglich waren. Bei **FMW** wurden identische Beprobungstiefen gewählt. Die Untersuchungen sollten zeigen, ob die mechanische Bodenbelastung zu einer Verdickung der Wurzeln führte.

Auf gepflügtem Boden nahm bei **6x5t** in 11-22 cm Bodentiefe der Anteil der Wurzeln mit höherem Durchmesser (200- >500 μm) ab (Abb. 20 links unten). In 22-32 cm Bodentiefe entsprachen sich die Häufigkeitsverteilungen der Wurzeldurchmesser beider Belastungsstufen. In der Bodentiefe 33-43 cm wurde eine deutliche Zunahme der Wurzeln mit einem Durchmesser von 200-300 μm festgestellt. Die Ergebnisse deuten an, daß bei hoher Bodenbelastung der Wurzeldurchmesser in der Krume abgenommen hat. Unterhalb des Bearbeitungshorizontes in der Bodentiefe 33-43 cm führte der Lasteintrag dagegen zu einer Verdickung der Wurzeln.

Auf der Kontrollparzelle des Bodens mit **FMW** (Abb. 20 rechts oben) verlief die Häufigkeitsverteilung der Wurzeldurchmesser in den Bodentiefen 22-32 cm und 33-43 cm annähernd identisch. In der Bodenschicht 11-21 cm wurde ein höherer Anteil an Wurzeln mit einem Durchmesser von 100-300 μm und ein geringerer mit einem Durchmesser von 300-500 μm festgestellt. Durch den Lasteintrag von **6x5t** wurde in der Bodenschicht 11-21 cm der Anteil der Wurzeln mit 100-200 μm Durchmesser erheblich erhöht. Der Anteil der Wurzeln mit 200-300 μm

Durchmesser nahm deutlich ab. Auch in der Bodenschicht 33-43 cm nahm die Anzahl der Wurzeln mit einem Durchmesser von 100-200 μm zu.

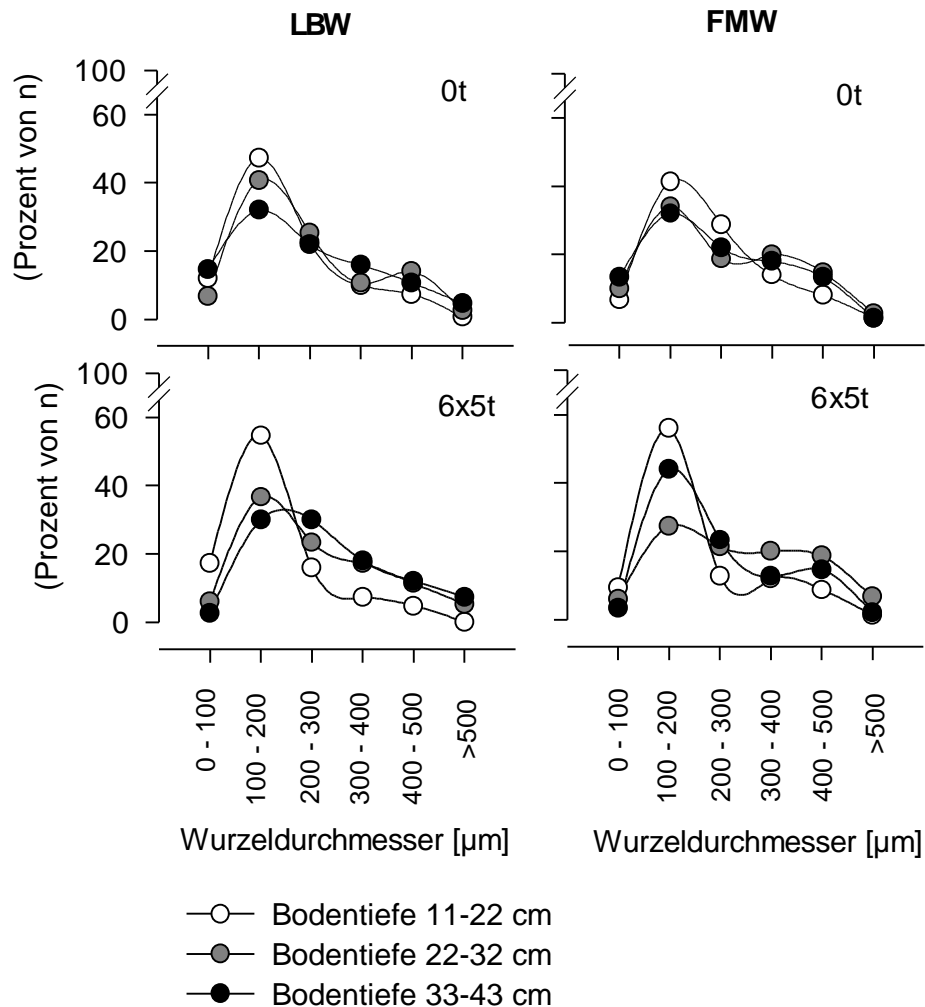


Abb. 20: Wirkung der mechanischen Bodenbelastung und des Bearbeitungssystems auf den Wurzeldurchmesser von Winterweizen auf dem Standort **Reins- hof 1996**. Die gemessenen Wurzeldurchmesser ($n=150$ pro Bodentiefe) wurden in sechs Klassen eingeteilt. Die Beprobung wurde zum EC Stadium 45 in drei Bodentiefen durchgeführt.

4.2.1.2 Standort **Reliehausen**

Auf dem gepflügten Boden hatte die mechanische Bodenbelastung eine deutlich einschränkende Wirkung auf die WLD und die Durchwurzelungstiefe der Sommergerste (Abb. 21). Auf dem gepflügten Boden ohne Belastung betrug die GWL 5,05 km/m². Bei geringer und mittlerer Belastung erreichte die GWL ca. 60% der Kontrolle. Auf dem hoch belasteten Boden erreichte die GWL nur 44%

der Kontrolle. Die GWL im Unterboden wurde – im Vergleich zur Kontrolle – bei geringer bis hoher Bodenbelastung um ca. 60 % verringert. Mit steigender Bodenbelastung nahm die maximale Durchwurzelungstiefe von 78 cm auf dem unbelasteten Boden auf 41 cm bei hoher Belastung ab. Das entspricht einem drastischen Verlust an durchwurzeltem Boden von annähernd 50 %.

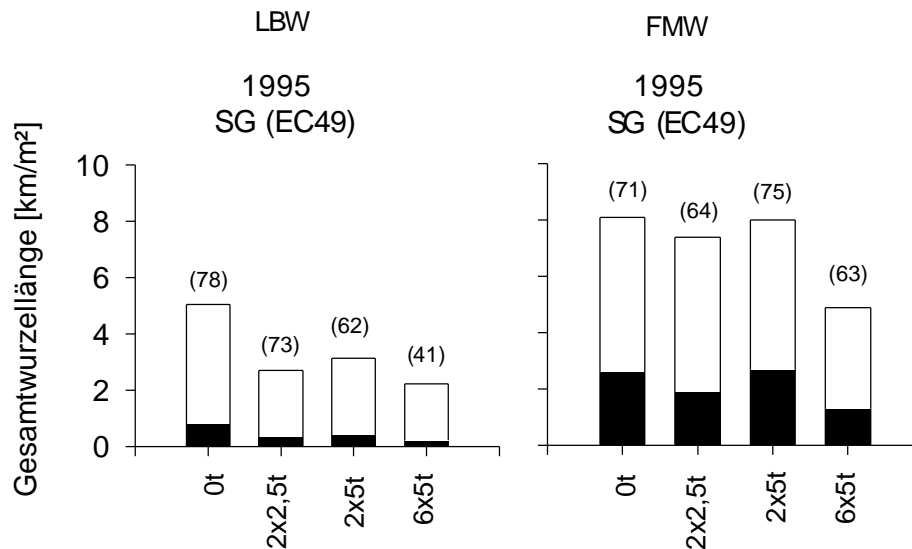


Abb. 21: Gesamtwurzellänge (GWL) und GWL in Oberboden (0-30 cm Bodentiefe, weiße Säulen) und Unterboden (von 30 cm Bodentiefe - maximale Durchwurzelungstiefe, schwarze Säulen) auf dem Standort **Reliehausen**. Dargestellt ist der Beprobungstermin 06.07.1995. Die angebaute Feldfrucht ist Sommergerste (SG). Die Zahlen in Klammern zeigen die maximale Durchwurzelungstiefe [cm].

Auf dem **flach** bearbeiteten Boden lag die GWL sowohl im Ober- als auch im Unterboden bei keiner bis mittlerer Belastung auf gleicher Höhe. Bei hoher Belastung wurde das Wurzelwachstum begrenzt: Die GWL des Oberbodens lag um 33 %, die GWL des Unterbodens um 46 % unter den Werten der Kontrolle (**FMW 0t**). Die Durchwurzelungstiefe wurde weniger stark eingeschränkt.

Ein Vergleich der Bearbeitungssysteme – gemittelt über die Belastungsstufen – zeigt beträchtliche Unterschiede: Die GWL bei **FMW** lag um den Faktor 2,3 höher als bei **LBW**. Bei Betrachtung der Unterbodendurchwurzelung wird der Unterschied noch deutlicher: Die Werte bei **FMW** lagen um den Faktor 5,2 höher als bei **LBW**.

4.2.1.3 Standort **Großobringen**

Abb. 22 zeigt die GWL der Kulturpflanzen in den drei Versuchsjahren auf dem Standort **Großobringen**. Im ersten Versuchsjahr wurden die Wurzeln zu einem wesentlich späteren Termin in der Vegetation untersucht als an den anderen Standorten.

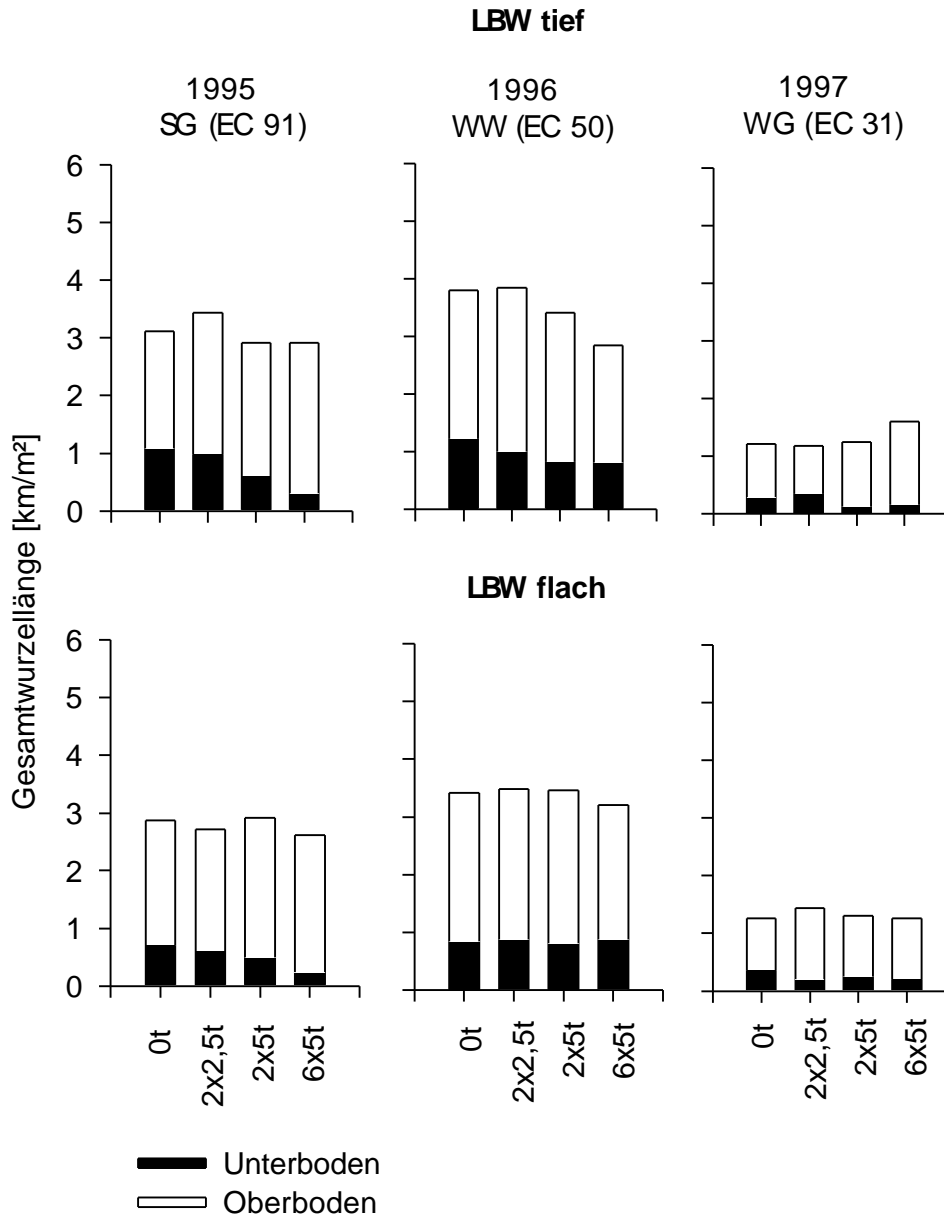


Abb. 22: Gesamtwurzellänge (GWL) und GWL in Oberboden (0-30 cm Bodentiefe, weiße Säulen) und Unterboden (von 30 cm Bodentiefe – 50 cm Durchwurzelungstiefe, schwarze Säulen) auf dem Standort **Großobringen**. Dargestellt sind die Beprobungstemine und die angebauten Feldfrüchte: 08.08.1995, Sommergerste (SG); 17.06.1996 Winterweizen, (WW); 07.04.1997 Wintergerste, (WG).

Unabhängig vom Bearbeitungssystem lag die GWL der Sommergerste **1995** bei allen Belastungsstufen auf etwa gleicher Höhe (Abb. 22 links). Sowohl die unterschiedliche Pflugtiefe bei **LBW tief** und **LBW flach** als auch die Höhe der Bodenbelastung hatten keine kennzeichnenden Auswirkungen auf die Gesamtlänge der Wurzelsysteme. Bei der GWL des Unterbodens zeigten sich deutliche Unterschiede: Bei beiden Bearbeitungssystemen nahm sie mit steigender Bodenbelastung ab. Wie Abb. 22 (links) zeigt, lagen die Werte der GWL des Unterbodens bei **LBW flach** um ca. 20 % niedriger als bei **LBW tief**. Im zweiten Versuchsjahr lag die GWL des Winterweizens in den ersten beiden Belastungsstufen von **LBW tief** auf gleicher Höhe. Die GWL bei **2x5t** lag um 10 % tiefer als bei der Kontrolle. Bei **6x5t** lag die GWL um 25 % unter der Kontrolle. Wie auch im ersten Versuchsjahr nahm die GWL des Unterbodens mit steigender Belastung ab: Bei der Kontrolle wurden im Unterboden 1,22 km Wurzellänge pro m² gemessen. Bei hoher Belastung waren es nur noch 0,8 km pro m². Bei **LBW flach** lag die GWL von **0t**, **2x2,5t** und **2x5t** auf gleichem Niveau (Abb. 22 mitte). Die GWL bei **6x5t** war um 12 % geringer als bei der Kontrolle. Innerhalb der Belastungsstufen unterschied sich die GWL des Unterbodens nicht. Im dritten Versuchsjahr (Abb. 22 rechts) nahm bei **LBW tief** mit mittlerer und hoher Bodenbelastung die GWL im Vergleich zur Kontrolle (**LBW tief 0t**) zu, bei **LBW flach** erreichte die GWL bei allen Belastungsstufen annähernd die gleichen Werte. Im Unterboden konnte bei **LBW tief** und **LBW flach** eine geringfügige Reduktion der GWL bei steigender Bodenbelastung beobachtet werden. Diese Tendenz stellte sich bei **LBW tief** stärker dar als bei **LBW flach**.

4.2.2 Oberirdische Trockenmasse und Blattfläche

Die mechanische Belastung eines Bodens über seine Eigenstabilität hinaus führt zu Gefügedeformationen. Diese Deformationen können die Speicher- und Leitungsfunktionen des Bodens als poröser Körper für Wasser und Gas stark einschränken. Eine mögliche Folge ist die Beeinträchtigung der physiologischen Wurzelfunktionen und des Wurzelwachstums. Geht man von einer belastungsabhängigen Reduktion des Wurzelsystems aus, so ist auch eine belastungsabhängige Beeinträchtigung des oberirdischen Pflanzenwachstums denkbar. Eine mögliche Ursache wäre eine verminderte Nährstoff- und Wasseraufnahme, oder eine Wachstumsdepression, die nicht direkt auf eine Mangelsituation in der Rhizosphäre zurückzuführen ist, vielleicht aber mit einer Reaktion des Hormonhaushaltes zu erklären wäre. Um eine auflastabhängige Beeinträchtigung des oberirdischen Pflanzenwachstums nachzuweisen, wurden Messungen der Trockensubstanz und der Blattfläche vorgenommen. Grundlage einer solchen Untersuchung ist die Erfassung der Produktion (oder Reduktion) der oberirdischen Trockenmasse und der Blattfläche eines Pflanzenbestandes über ein Zeitintervall (BEADLE 1993). Die Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse spiegelt das Pflanzenwachstum unter den aktuellen Wachstumsbedingungen wider. Die Größe der Blattfläche bestimmt neben der Pigmentierung die Kapazität zur Licht- und CO_2 – Aufnahme und damit zur Stoffproduktion. Die Blattfläche [m^2] bezogen auf die Bodenoberfläche [m^2] ergibt den Blattflächenindex (BFI). Der BFI nimmt bei den Getreidearten während des Schossens (EC 31-39) stark zu (zu den EC-Standien vgl. Tab 40, Anhang). Maximale Werte werden mit dem Ährenschieben, beziehungsweise kurz davor erreicht (EC 49/55). Danach sinkt der BFI kontinuierlich ab, was auf das Absterben älterer Blätter, am Halm von unten nach oben, zurückzuführen ist. Dieser Prozess wird dadurch gefördert, daß Blätter in den unteren „Blatttagen“ zunehmend beschattet werden und bald mehr Substanz veratmen als sie durch ihre Photosynthese gewinnen können.

Mit steigendem BFI in der Jugendentwicklung nimmt die aufgefangene Lichtmenge und damit die Substanzproduktion pro Zeiteinheit zu. Der maximale potentielle Ertragszuwachs, der bei den Getreidearten der gemäßigten Breiten

ca. 25 g Trockenmasse pro m² Bodenoberfläche und Tag betragen kann, wird im allgemeinen unter den Strahlungsbedingungen des (Früh)- Sommers bei einem BFI von 3-5 erreicht. Wird dieser „Schwellenwert des BFI“ überschritten, führt die Steigerung der Lichtinterzeption nur noch zu einer sehr geringen Zunahme der Substanzproduktion pro Zeiteinheit. Da eine maximale Substanzproduktion im Sinne des potentiellen Ertragszuwachses eine maximale Strahlungsinterzeption voraussetzt, sind Pflanzenbestände mit einem BFI weit unterhalb des „Schwellenwertes“ in ihrer Substanzproduktion eingeschränkt. Die Größe der assimilierenden Blattfläche und deren Beständigkeit über die Zeit wird mit der Blattflächendauer (BFD) beschrieben. Die BFD ist das Integral des BFI über die Zeit (EHLERS 1996). In der vorliegenden Arbeit wird die BFD nach der Blüte bis zur mittleren Milchreife betrachtet. In diesem Entwicklungsabschnitt der Kornfüllung kann eine hohe BFD ein hohes Maß an eingelagerter Assimilate bedeuten.

4.2.2.1 Standort **Reinshof**

4.2.2.1.1 Versuchsjahr **1995**

Im Versuchsjahr **1995** zeigte sich auf dem Standort **Reinshof** bei beiden Bearbeitungssystemen ein deutlicher Einfluß der Belastungsstufen auf die oberirdische Trockenmasse und die Blattfläche der Sommergerste (Abb. 23). Auf dem gepflügten Boden konnten die Pflanzen bis gegen Ende des Schossens auf dem Boden mit geringer und mittlerer Belastung nur ca. 50% der oberirdischen Trockenmasse und der Blattfläche der Pflanzen auf der Kontrollparzelle (**LBW 0t**) bilden (Abb. 23 links). Die Wachstumsbedingungen bei hoher Bodenbelastung waren so ungünstig, daß die Sommergerste im Vergleich zur Kontrolle 70% weniger oberirdische Trockenmasse und Blattfläche ausbildete. Auf dem gepflügten Boden war mit steigender Bodenbelastung die Produktion von Trockenmasse und Blattfläche zunehmend eingeschränkt.

Bei **FMW** (Abb. 23 rechts) bildeten die Pflanzen mit keiner, geringer und mittlerer Bodenbelastung auf gleichem Niveau mehr oberirdische Trockenmasse als die Pflanzen auf dem hoch belasteten Boden. Die Entwicklung der Blattfläche zeigte die gleiche Tendenz: Zu den Entwicklungsstadien EC 25 und EC 30 lag

der BFI bei keiner, geringer und mittlerer Bodenbelastung um ca. $0,6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ höher als hoher Belastung. Zum Ende des Schossens betrug die Differenz zwischen den ersten drei Belastungsstufen und der hoch belasteten Variante ca. $1 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Sowohl bei der Trockenmasse als auch bei der Blattfläche war das Niveau der Belastungsstufen **2x2,5t** und **2x5t** bei **FMW** gleich dem der Kontrollvariante (**FMW 0t**). Auf dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden wurde die oberirdische Trockenmasse und die Blattfläche nur in der Variante mit hoher Bodenbelastung deutlich eingeschränkt. Ausgesät wurde die Sommergerste direkt nach Versuchsbeginn am 13. April **1995**. Der späte Aussaattermin verkürzte die Vegetationsperiode, so daß die einzelnen Wachstumsabschnitte schnell durchlaufen wurden. Möglicherweise ist das der Grund für die insgesamt geringe Trockenmasse- und Blattflächenbildung der Sommergerste auch auf den unbelasteten Parzellen.

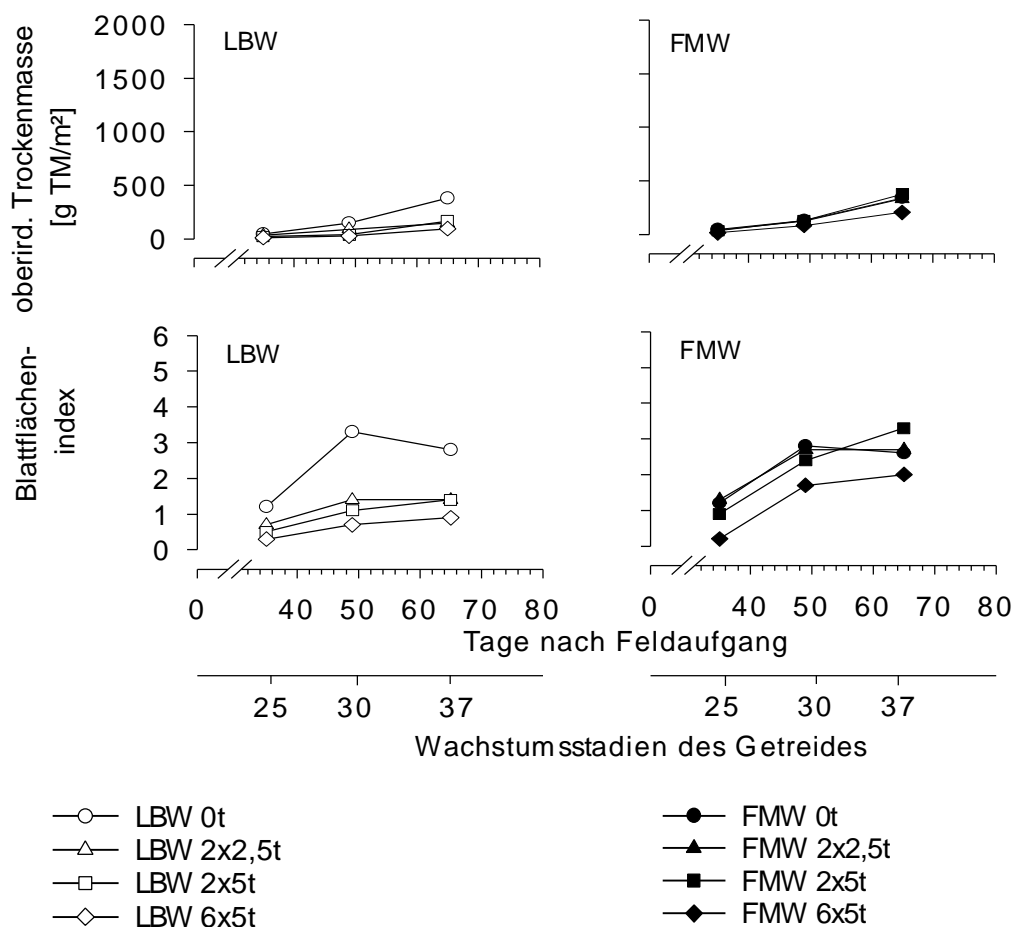


Abb. 23: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Sommergerste über die Zeit auf dem Standort **Reins-hof** im Versuchsjahr **1995**. Der Termin des Feldaufgangs geht aus Tab. 57 hervor. Dargestellt sind Ergebnisse von Block 2.

Tendenziell erreichte der Bestand auf dem gepflügten Boden bei mittlerer und hoher Bodenbelastung zu EC 61 nicht die Höhe des Bestandes bei fehlender und geringer Belastung: Die Bestandeshöhe bei **2x5t** war um 20% niedriger als bei **0t**, bei **6x5t** betrug die Differenz zur Kontrolle (**LBW 0t**) 30% (Abb. 24).

Auf dem flach bearbeiteten Boden war zu EC 31 - wie auf dem gepflügten Boden - die Bestandeshöhe bei allen Belastungsstufen in etwa gleich. Zu EC 61 erreichte der Bestand mit hoher Bodenbelastung 80% der Bestandeshöhe der Kontrolle (**FMW 0t**).

Beeinträchtigungen des Längenwachstums durch die mechanische Bodenbelastung traten bei **LBW 2x5t** und **6x5t** auf (Abb. 24). Bei **FMW** war das Längenwachstum nur bei **6x5t** eingeschränkt. Die Bestandeshöhe auf den Bearbeitungssystemen zeigte eine ähnliche Reaktion auf die Belastungsstufen wie die Trockenmasse und die Blattfläche (Abb. 23).

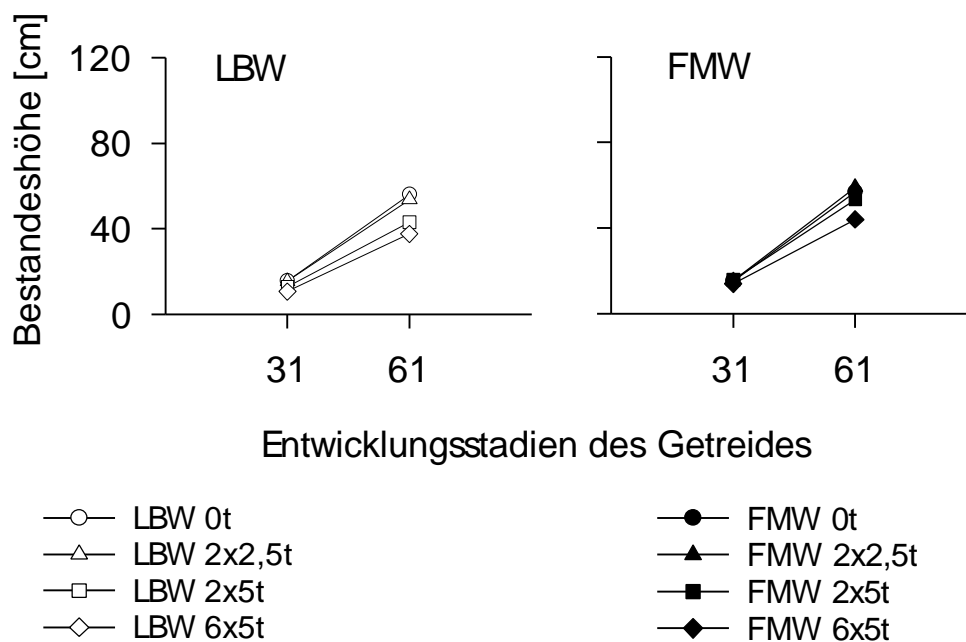


Abb. 24: Bestandeshöhe der Sommergerste auf dem Standort **Reinshof 1995** zu den Entwicklungsstadien EC 31 und EC 61. Dargestellt sind arithmetische Mittelwerte aus Block 1-4.

4.2.2.1.2 Versuchsjahr **1996**

Die oberirdische Trockenmasse des Winterweizens zeigte bei gepflügtem Boden bis EC 75 keine belastungsabhängigen Unterschiede (Abb.25). Während der Reife lag die Trockenmasse der Kontrolle (**LBW 0t**) deutlich höher als in den belasteten Parzellen (Abb. 25 links).

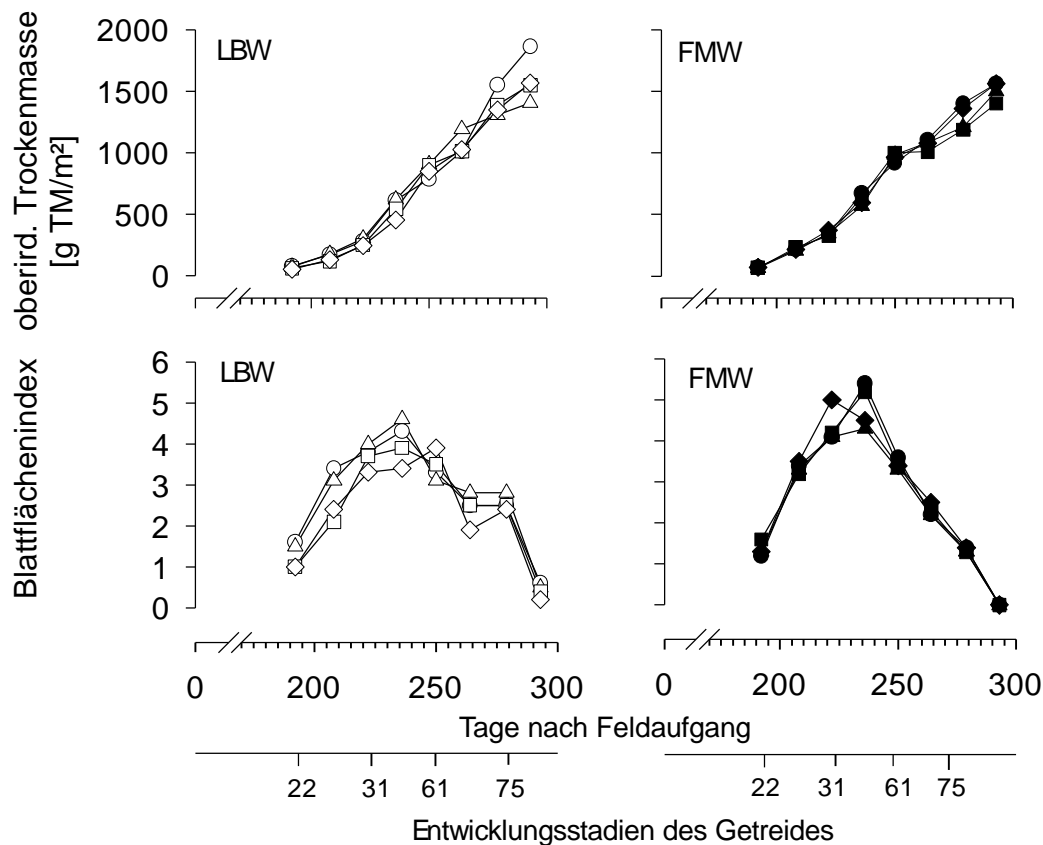


Abb. 25: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Winterweizen über die Zeit auf dem Standort **Reins-hof** im Versuchsjahr **1996**. Dargestellt sind Ergebnisse aus Block 2.

Bei der Blattfläche zeigten sich Unterschiede von Anfang an: Auf der Kontrollparzelle (**LBW 0t**) und bei geringer Belastung bildete sich zu Vegetationsbe-

ginn eine um ca. 0,8 m²/m² größere Blattfläche als bei mittlerer und hoher Bodenbelastung. Auf dem gepflügten Boden setzte die alterungsbedingte Reduktion der Blattfläche bei **0t**, **2x2,5t** und **2x5t** vor EC 61 ein. Bei **6x5t** nahm die Blattfläche bis zum Beginn der Blüte (EC 61) zu. Nach der Blüte nahm die Blattfläche bei hoher Belastung stärker und schneller ab als bei den anderen Belastungsstufen.

Bei **FMW** (Abb. 25 rechts) verlief sowohl die Trockenmassezunahme als auch die Entwicklung der Blattfläche über die gesamte Vegetation bei allen Belastungsstufen in etwa gleich. Abweichend davon setzte bei **6x5t** die Reduktion der Blattfläche ca. 10 Tage früher ein als bei **0t**, **2x2,5t** und **2x5t**.

Auf dem gepflügten Boden und bei hoher Belastung lag die BFD um 10% niedriger als bei den Belastungsstufen **0t**, **2x2,5t** und **2x5t**. Auf dem flach bearbeiteten Boden kehrte sich diese Tendenz um: Die BFD bei **6x5t** lag um 7% höher als bei den anderen Belastungsstufen (Abb. 26). Insgesamt lag die BFD bei **FMW** auffallend niedriger als bei **LBW**.

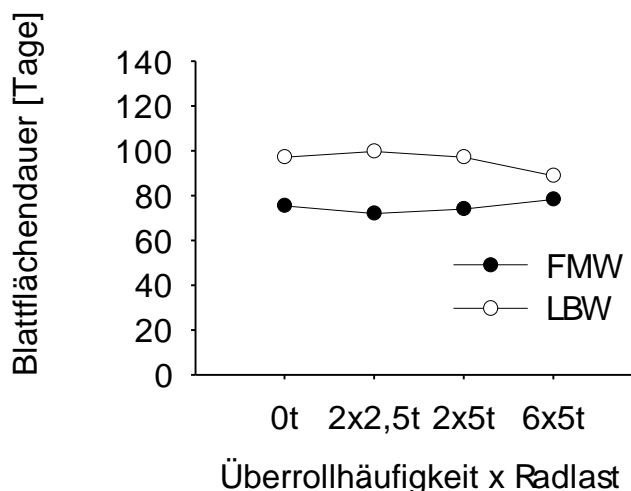


Abb. 26: Blattflächendauer (BFD) des Winterweizens vom Ende der Blüte (EC 69) bis zur mittleren Milchreife (EC 75) auf dem Standort **Reinschhof 1996** in Abhängigkeit von der Belastungsstufe. Dargestellt sind Ergebnisse aus Block 2.

Abb. 27 zur Bestandeshöhe zeigt zum Schoß- und Blühbeginn annähernd identische Werte bei beiden Bearbeitungssystemen und allen Belastungsstufen. Die Bestandeshöhe bei **LBW 6x5t** lag zum Stadium EC 61 ca. 10% unter der Höhe bei **LBW 0t**, **2x2,5t** und **2x5t**.

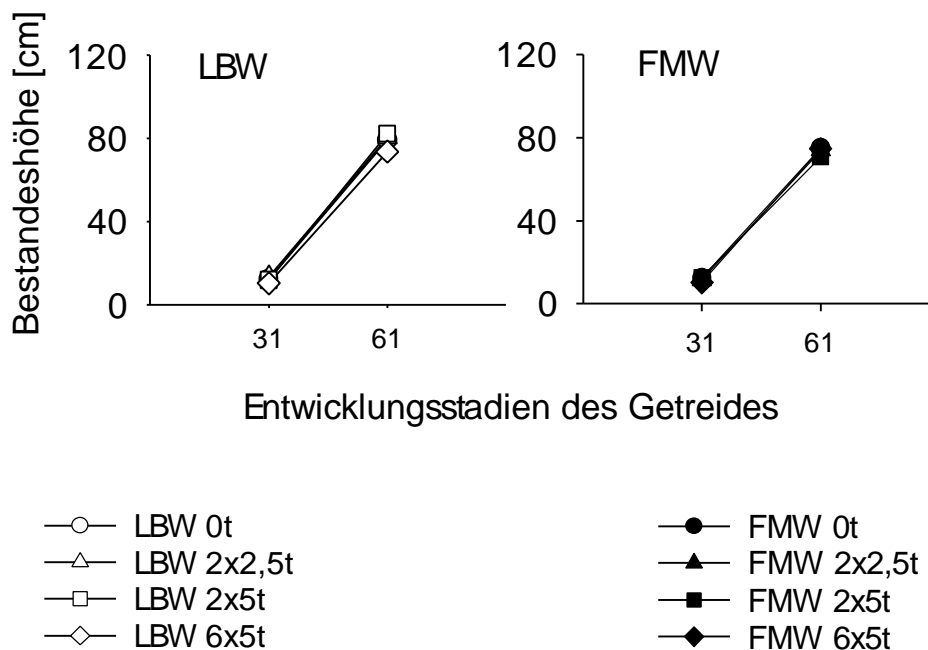


Abb. 27: Bestandeshöhe des Winterweizens auf dem Standort **Reinshof 1996** zu den Entwicklungsstadien EC 31 und EC 61. Dargestellt sind arithmetische Mittelwerte aus Block 1-4.

Die mechanische Bodenbelastung zu Versuchsbeginn **1995** beeinträchtigte das Längenwachstum des Winterweizens **1996** nur bei **LBW 6x5t**. Bei **FMW** konnte keine Einschränkung nachgewiesen werden.

4.2.2.1.3 Versuchsjahr **1997**

Auf dem Standort **Reinshof** trat im Frühjahr **1997** bei **FMW** ein hoher Konkurrenzdruck durch Windhalm (*Apera spica-venti* (L.)) auf. 192 Tage nach Feldaufgang der Wintergerste wurde auf beiden Bearbeitungssystemen eine Windhalmbekämpfung mit Ralon Super (36 g/ha Fenoxaprop-ethyl, s. Tab. 57) durchgeführt. Diese Maßnahme führte nicht zu einer ausreichenden Reduktion der Windhalmpopulation. 202 Tage nach Feldaufgang wurde als zweite Maßnahme, wiederum bei beiden Bearbeitungssystemen, Isoproturon (1000 g/ha) eingesetzt. Der wiederholte Herbizideinsatz unterdrückte das Windhalmwachstum bei **FMW** zufriedenstellend, beeinträchtigte aber bei beiden Bearbeitungssystemen die Entwicklung der Wintergerste (Abb. 28).

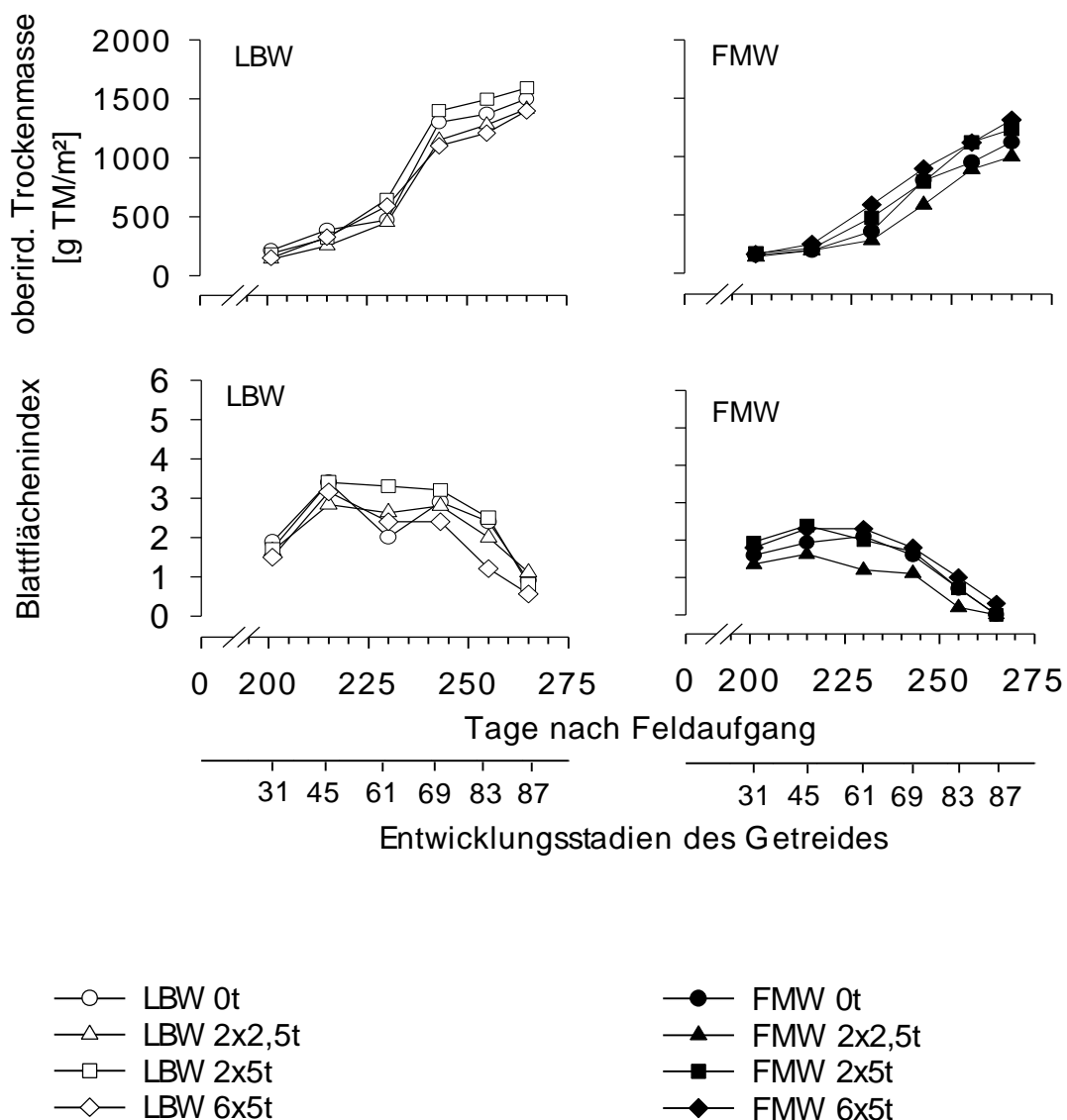


Abb. 28: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Wintergerste auf dem Standort **Reinshof** über die Zeit im Versuchsjahr **1997**. Dargestellt sind Ergebnisse aus Block 3.

Der maximale Blattflächenindex von Getreide wird in der Literatur im Mittel mit ca. 6 angegeben (GEISLER 1983; STÜLPNAGEL 1979). Bei **LBW** (Abb. 28 links) wurde ein maximaler Blattflächenindex um 3,5 erreicht. Da auf dem gepflügten Boden keine Windhalmkonkurrenz auftrat, wird die belastende Wirkung des intensiven Herbizideinsatzes als Ursache der schwachen Blattflächenentwicklung angenommen.

Nicht nur die Größe der Blattfläche, sondern auch die Blattflächenentwicklung war untypisch: Bei Wintergetreide erreicht die Blattfläche zu EC 45-55 ihr Ma-

ximum und nimmt dann stetig ab (GEISLER 1983). Auf dem gepflügten Boden war die maximale Blattfläche zu EC 45 erreicht und nahm dann bis EC 61 ab. In der Blüte (EC 61-69) kam es zu einem Wachstumsschub – die Blattfläche nahm noch einmal zu. Nach diesem zweiten Anstieg setzte die Phase der alterungsbedingten Blattflächenreduktion ein. Möglicherweise ist die Wachstumsbeeinträchtigung vor der Blüte durch den zweimaligen, späten Herbizideinsatz der Grund für den untypischen Wachstumsschub in der Blüte. Dies ist besonders deutlich in Abb.28 (links) bei **LBW 0t** zu beobachten. Ab EC 45 zeigte sich bei den vier Belastungsstufen ein unterschiedlicher Verlauf der Trockenmasse und der Blattfläche. Bei **0t** war die Beeinträchtigung der Massezunahme stärker als bei den anderen Belastungsstufen (EC 45-61). Nach der Blüte (EC 69) konnte bei **2x5t** die höchste Trockenmasse pro Fläche festgestellt werden. Auf der Kontrolle hatten die Pflanzen eine etwas höhere Masse pro Fläche als bei **2x2,5t** und **6x5t**. Bei der Blattfläche zeigte sich ein ähnlicher Verlauf. Bis EC 45 lagen alle Belastungsstufen auf gleicher Höhe. Die Wachstumsbeeinträchtigung vor der Blüte (bis EC 61) war bei **0t** am stärksten und bei **2x5t** am schwächsten. Im zweiten Wachstumsschub (EC 61-69) stieg die Blattfläche bei **0t** stärker an als bei den anderen Belastungsstufen, erreichte aber nicht die Fläche von **2x5t**. Die Blattfläche bei **6x5t** stieg nach der Wachstumsdepression nicht wieder an und blieb bis zum Ende der Messungen unter der Blattfläche der anderen Belastungsstufen.

Bei **FMW** (Abb. 28 rechts) war der Ungrasdruck selbst nach zweimaligem Herbizideinsatz bei **0t** gering (50-100 Rispen/m²), bei **2x2,5t** sehr hoch (>300 Rispen/m²) und bei **2x5t** und **6x5t** mäßig (150-200 Rispen/m²). Der für die einzelnen Belastungsstufen angegebene Ungrasdruck wiederholte sich auf den Blöcken 1-4. Es kam zu einer erheblichen Wachstumsdepression als Folge einer kombinierten Wirkung des Konkurrenzdruckes durch den Windhalm und der Belastung durch den Herbizideinsatz: Die maximal erreichten Blattflächenindizes lagen unter 2,5.

Bis EC 45 war das Pflanzengewicht und die Blattfläche auf allen Belastungsstufen von FMW in etwa gleich. Ab EC 61 lag das Gewicht und die Blattfläche bei **6x5t** höher als auf der Kontrolle (**FMW 0t**). Bei **2x2,5t** – der Belastungs-

stufe mit dem stärksten Windhalmdruck – wurde die geringste Trockenmasse und die geringste Blattfläche gemessen.

Die Höhe der BFD zeigt erhebliche Unterschiede zwischen den Bearbeitungssystemen und den Belastungsstufen (Abb. 29)

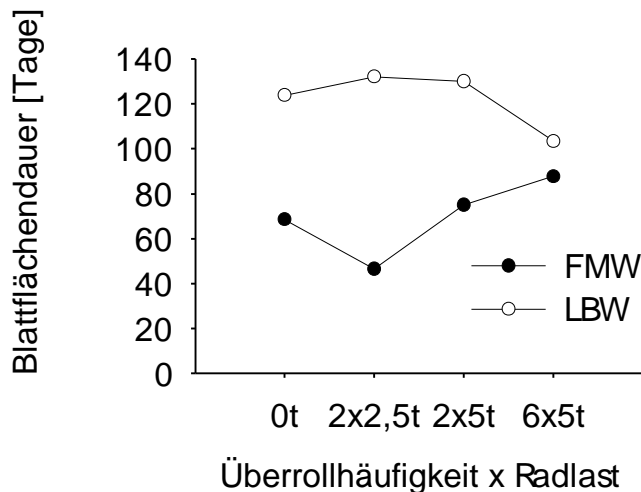


Abb. 29: Blattflächendauer (BFD) der Wintergerste vom Ende der Blüte (EC 69) bis zur Gelbreife (EC 87) auf dem Standort **Reinshof 1997** in Abhängigkeit von der Belastungsstufe. Dargestellt sind Ergebnisse aus Block 3.

Bei **LBW** lag die BFD bei **6x5t** um 20% unter der mittleren BFD der anderen drei Belastungsstufen. Bei **FMW 2x2,5t** wurde die geringste BFD gemessen. Sie lag 32% unter dem Wert der Kontrolle (**FMW 0t**). Die BFD auf der maximal belasteten Parzelle (**6x5t**) lag um 30% über der BFD der Kontrolle (**FMW 0t**). Der hohe Konkurrenzdruck durch den Windhalm beeinträchtigte das Blattwachstum nur bei **FMW**. Hier lag die mittlere BFD um 44% unter der von **LBW**. Die Entwicklung der Bestandeshöhe von EC 31 bis EC 61 zeigte einen identischen Verlauf bei **LBW 0t, 2x2,5t, 2x5t** einerseits und bei **FMW** über alle Belastungsstufen andererseits (Abb. 30). Der Bestand bei **LBW 6x5t** erreichte zu EC 61 82% der Höhe des Bestandes auf der Kontrolle (**LBW 0t**). Die mittlere Bestandeshöhe bei **FMW** lag zu EC 61 ca. 14% unter der mittleren Höhe bei **LBW**.

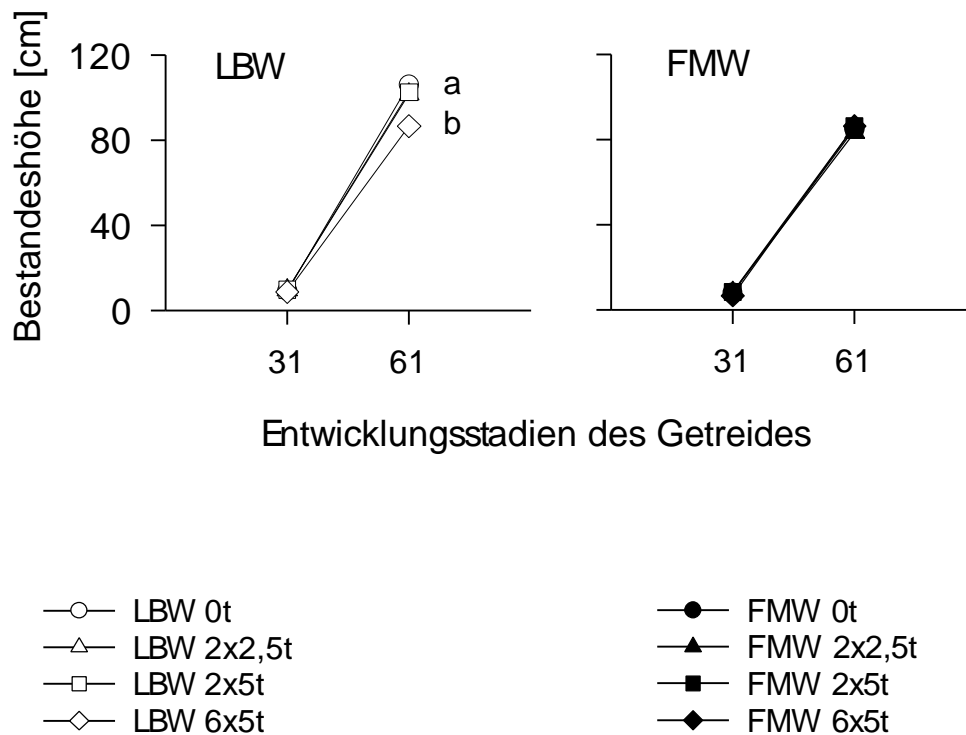


Abb. 30: Bestandeshöhe der Wintergerste auf dem Standort **Reinshof 1997** zu den Entwicklungsstadien EC 31 und EC 61. Dargestellt sind arithmetische Mittelwerte aus Block 1-4. Ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb eines Bearbeitungssystems.

4.2.2.2 Standort **Rellehausen**4.2.2.2.1 Versuchsjahr **1995**

Bei beiden Bearbeitungssystemen zeigten Trockenmasse und Blattfläche einen unterschiedlichen Verlauf abhängig von der Belastungsstufe und dem Entwicklungsstadium der Sommergerste (Abb. 31). Ein Vergleich der Bearbeitungssysteme zeigte keine kennzeichnenden Unterschiede. Die Bestände auf beiden Systemen erreichten annähernd die gleichen Trockengewichte und ähnlich hohe BFI.

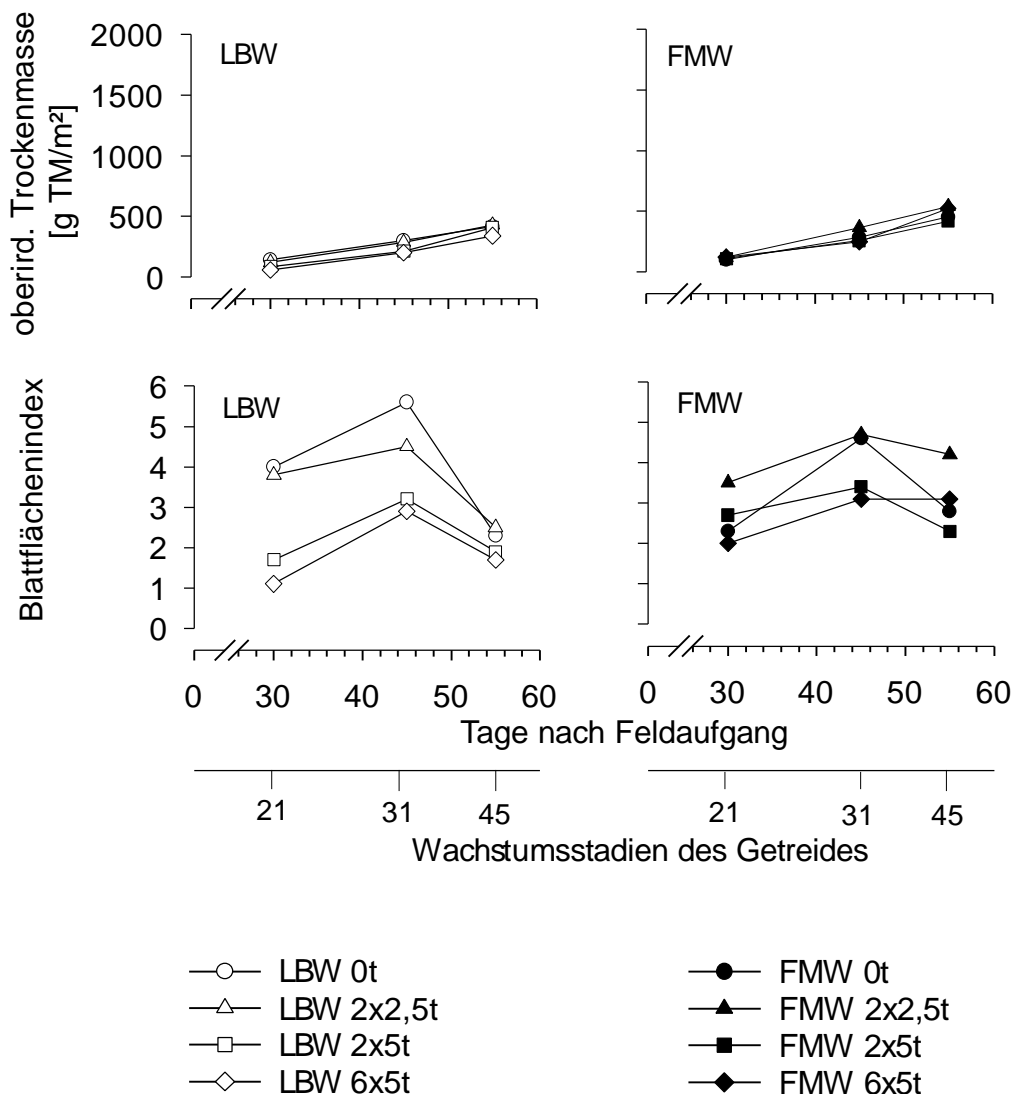


Abb. 31: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Sommergerste auf dem Standort **Rellehausen** über die Zeit im Versuchsjahr **1995**.

Auf dem gepflügten Boden (Abb. 31 links) stand zu Beginn der Bestockung bei **0t** (BFI 4) und **2x2,5t** (BFI 3,8) mit einem BFI über 3 mehr Blattfläche zu Verfügung, um eingestrahlte Energie aufzufangen und zur Substanzproduktion umzusetzen. Bei **2x5t** und **6x5t** lag der BFI zum selben Zeitpunkt unter 2,0. Wie der Verlauf der Trockenmassebildung zeigt, reichte bei **2x5t** und **6x5t** die Blattfläche nicht aus, um eine Stoffproduktion in der Höhe von **0t** und **2x2,5t** zu erreichen. Zu EC 31 (Abb. 31 links) lag die gemittelte Trockenmasse von **2x5t** und **6x5t** um 40% unter der gemittelten Trockenmasse von **0t** und **2x2,5t**. Zu diesem Zeitpunkt zeigte auch die Blattfläche geringere Werte mit steigender Belastung: Auf dem Boden mit geringer Belastung lag die Blattfläche um 20% unter der Kontrolle (**LBW 0t**), bei mittlerer und hoher Bodenbelastung um etwa 40 % unter dem Wert der Kontrolle (**LBW 0t**). Zu EC 45 war der BFI bei allen Belastungsstufen bereits stark abgefallen. Zu diesem Stadium war der BFI bei **2x5t** und **6x5t** um 25% kleiner als der BFI bei **0t** und **2x2,5t**.

Auf dem **flach** bearbeiteten und gemulchten Boden (Abb. 31 rechts) lag zu EC 21 nur der BFI von **2x2,5t** über 3. Bei dieser Belastungsstufe lag die Höhe der produzierten Trockenmasse von EC 21 bis EC 45 über den Werten der anderen Belastungsstufen. Bis EC 31 stieg der BFI bei **2x5t** und **6x5t** auf knapp über 3. Bei **0t** und **2x2,5t** erreichte der BFI 4,5. Auffällig ist der starke Anstieg des BFI bei **0t** von EC 21 bis EC 31. Zu EC 45 hatte der BFI bei **0t**, **2x2,5t** und **2x5t** abgenommen. Bei **6x5t** blieb der BFI von EC 31 bis EC 45 auf dem gleichen Niveau – die grüne Blattfläche wurde nicht reduziert. Möglicherweise wurde die hohe Dauerhaftigkeit der assimilierenden Blattfläche zu einer verstärkten Substanzproduktion genutzt: Die Zunahme an Trockensubstanz von EC 31 bis EC 45 betrug auf bei hoher Belastung 17 g Trockenmasse pro m² Bodenoberfläche und Tag, bei den anderen Belastungsstufen betrug die Zunahme dagegen nur 11 g Trockenmasse pro m² Bodenoberfläche und Tag.

Bei **LBW 0t**, **2x2,5t** und **FMW 2x2,5t** zeigt Abb. 31 zu EC 21 und 31 sehr hohe Blattflächenindizes. Möglicherweise sind die hohen Werte auf Meßfehler zurückzuführen.

4.2.2.2.2 Versuchsjahr **1996**

Die Entwicklung der Trockenmasse und der Blattfläche des Winterweizens auf dem Standort **Reliehausen** im Versuchsjahr **1996** ist in Abb. 32 dargestellt.

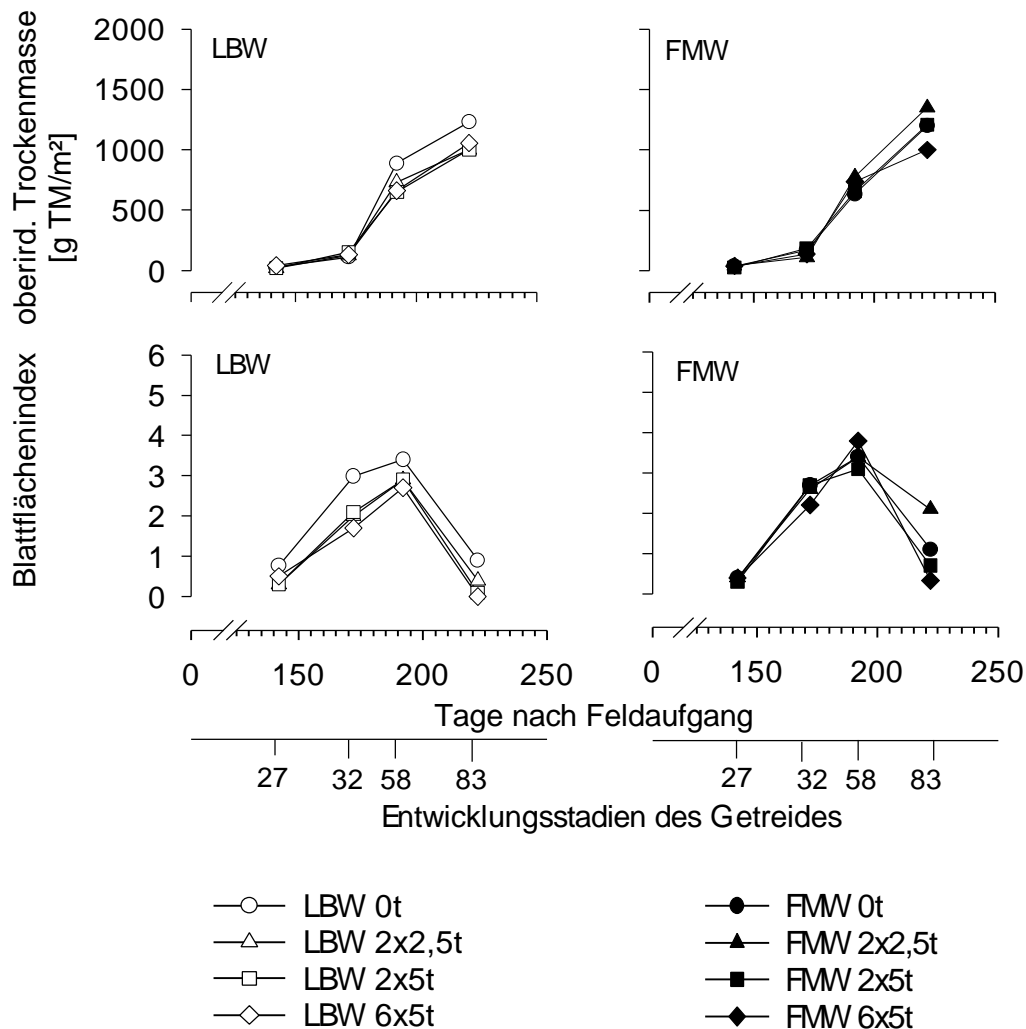


Abb. 32: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Winterweizen auf dem Standort **Reliehausen** über die Zeit im Versuchsjahr **1996**.

Bei **LBW** (Abb. 32 links) erreichte der Bestand auf der unbelasteten Parzelle zu EC 32 einen BFI über 3. Bei den anderen Belastungsstufen lag der BFI zum selben Zeitpunkt bei 2. Die größere Blattfläche bei keiner Belastung führte zu einer geringfügig höheren Trockenmassebildung: Von EC 32 bis EC 58 betrug der Trockenmassezuwachs auf dem Boden ohne Belastung 25 g Trockenmasse pro m² Bodenoberfläche und Tag. Der gemittelte Trockenmassezuwachs bei geringer, mittlerer und hoher Belastung lag bei 22 g Trockenmasse pro m² Bodenoberfläche und Tag. Von EC 58 bis zum Ende der Messungen (EC 83)

lag das Trockengewicht der Pflanzen auf der Kontrolle (**LBW 0t**) um ca. 15% über dem gemittelten Trockengewicht der Parzellen mit Bodenbelastung.

Bei **FMW** (Abb. 32 rechts) wies die Entwicklung des Trockengewichtes und der Blattfläche bei allen Belastungsstufen bis zum Beginn der Blüte kaum Unterschiede auf. Ab EC 58 nahm bei allen Belastungsstufen der BFI alterungsbedingt ab. Diese Abnahme der Blattfläche fiel bei **2x2,5t** am geringsten aus: Zu EC 83 war der BFI bei **2x2,5t** um 195% höher als der gemittelte BFI von **0t**, **2x5t** und **6x5t**. Die größere Blattfläche führte zu einem höheren Trockengewicht der Pflanzen. Auffällig ist der Kurvenverlauf der Trockenmasse als Funktion der Zeit bei der hoch belasteten Variante (**FMW**): Hier war der tägliche Trockenmassezuwachs in der Zeit von EC 58 bis EC 83 um 54% geringer als bei der Kontrolle (**FMW 0t**). Der BFI zeigte bei dieser Belastungsstufe den stärksten Rückgang der Blattfläche im Alterungsprozess. Die BFD des Winterweizens (Abb. 33) nahm auf dem gepflügten Boden im beobachteten Zeitabschnitt mit steigender Bodenbelastung ab. Bei **FMW** war eine solche Beziehung nicht festzustellen. Da sich bei **FMW** die alterungsbedingte Abnahme der Blattfläche bei geringer Belastung deutlich geringer darstellte als bei den anderen Belastungsstufen, war auch die BFD bei dieser Variante am höchsten. Die BFD bei **0t**, **2x5t** und **6x5t** lag auf dem gleichen Niveau aber 20% unter der BFD von **2x2,5t**.

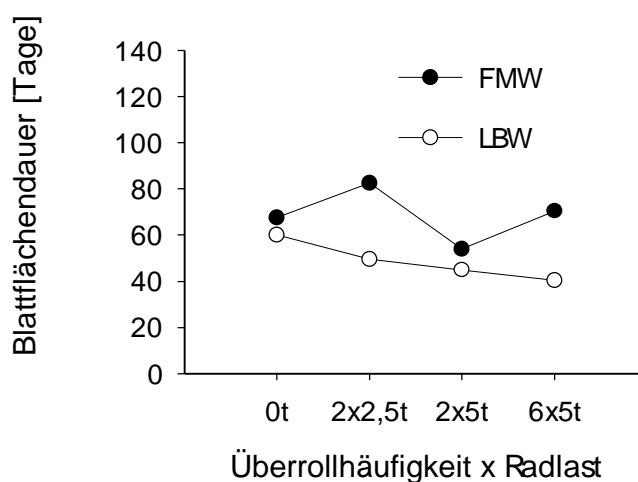


Abb. 33: Blattflächendauer (BFD) des Winterweizens vom Ende der Blüte (EC 69) bis zur mittleren Milchreife (EC 75) auf dem Standort **Rellehausen 1996** in Abhängigkeit von der Belastungsstufe.

Bei einem Vergleich der beiden Bearbeitungssysteme zeigt sich bei **FMW** eine um ca. 45% höhere BFD: Von EC 69 bis EC 75 stand auf dem **flach** bearbeiteten und gemulchten Boden wesentlich mehr Blattfläche zur Trockenmassebildung zur Verfügung als auf den gepflügten Varianten. Das war genau umgekehrt zu **Reinshof** (Abb. 26).

Abb. 34 zeigt die Bestandeshöhe und ihren Verlauf vom Beginn des Schossens bis zum Beginn der Blüte. Auf beiden Bearbeitungssystemen gab es keine signifikanten Unterschiede in der Bestandeshöhe. Tendenziell lagen die Werte für **LBW 6x5t** und **FMW 6x5t** zu EC 58 unter den Werten der anderen Belastungsstufen.

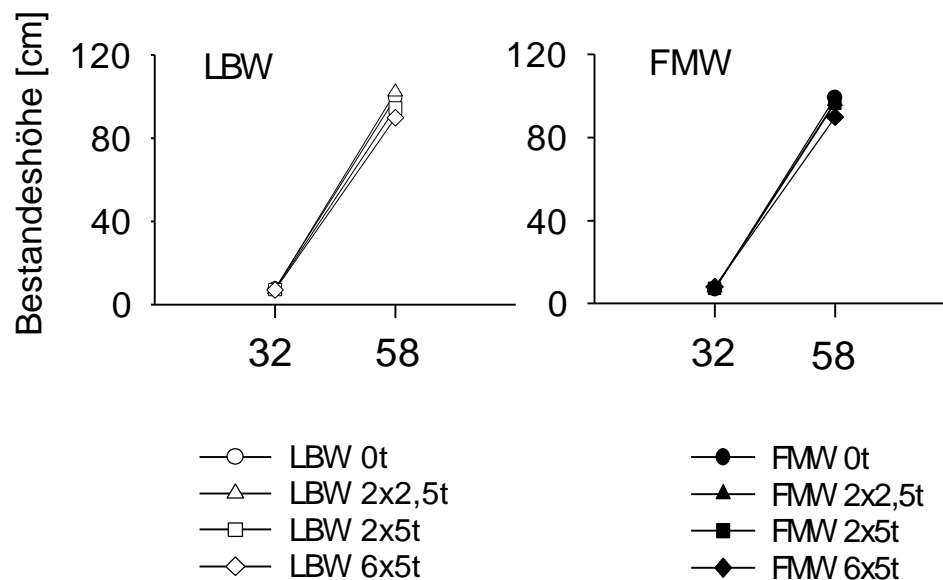


Abb. 34: Bestandeshöhe des Winterweizens auf dem Standort **Rellehausen 1996** zu den Entwicklungsstadien EC 32 und EC 58.

Im dritten Versuchsjahr **1997** mußte in **Rellehausen** auf die Erfassung der Trockenmasse und der Blattfläche der Wintergerste aus arbeitstechnischen Gründen verzichtet werden.

4.2.2.3 Standort **Großbringen**

4.2.2.3.1 Versuchsjahr **1995**

Auf dem Standort **Großbringen** wurden **1995** keine Untersuchungen zum Trockengewicht und zur Blattfläche der Sommergerste durchgeführt. Wohl aber wurde die Bestandeshöhe gemessen (Tab. 23). Tendenziell nahm mit steigender Bodenbelastung die Bestandeshöhe auf beiden Bearbeitungssystemen ab.

Tab. 23: Bestandeshöhe der Sommergerste zum Zeitpunkt der Ernte im Versuchsjahr **1995** auf dem Standort **Großbringen**. Gezeigt werden arithmetische Mittelwerte und die Grenzwerte des 95%-Vertrauensintervalls.

Bearbeitungssystem	Bestandeshöhe [cm]			
	Belastungsstufe			
	0t	2x2,5t	2x5t	6x5t
LBW tief	59 ($\pm 3,7$)	58 ($\pm 2,5$)	49 ($\pm 4,5$)	39 ($\pm 2,1$)
LBW flach	58 ($\pm 1,2$)	56 ($\pm 2,2$)	45 ($\pm 4,0$)	41 ($\pm 4,0$)

4.2.2.3.2 Versuchsjahr **1996**

Im Versuchsjahr **1996** zeigte die Trockenmasse und die Blattfläche keine kennzeichnenden Unterschiede zwischen den Belastungsstufen bei den Systemen **LBW tief** und **LBW flach** (Abb. 35). Zwischen den Bearbeitungssystemen traten geringe Unterschiede auf. Auf dem **tief** gepflügten Boden (Abb. 35 links) lag die maximal ausgebildete Blattfläche geringfügig höher als auf dem **flach** gepflügten Boden (Abb. 35 rechts). Da die Blattfläche ansonsten keine auffallenden Unterschiede zwischen den Bearbeitungssystemen oder den Belastungsstufen aufweist, wurde auf eine Darstellung der BFD verzichtet. Um den Einfluß der mechanischen Bodenbelastung auf das Längenwachstum des Winterweizens im Versuchsjahr **1996** zu erkennen, wurde die Bestandeshöhe zur Zeit der Reife (EC 83) erfaßt (Tab. 24). Innerhalb der Bearbeitungssysteme konnte zwischen den Belastungsstufen kein Unterschied in der Bestandeshöhe festgestellt werden. Zwischen den Bearbeitungssystemen deuten die Werte auf eine reduzierte Bestandeshöhe bei **LBW flach** hin.

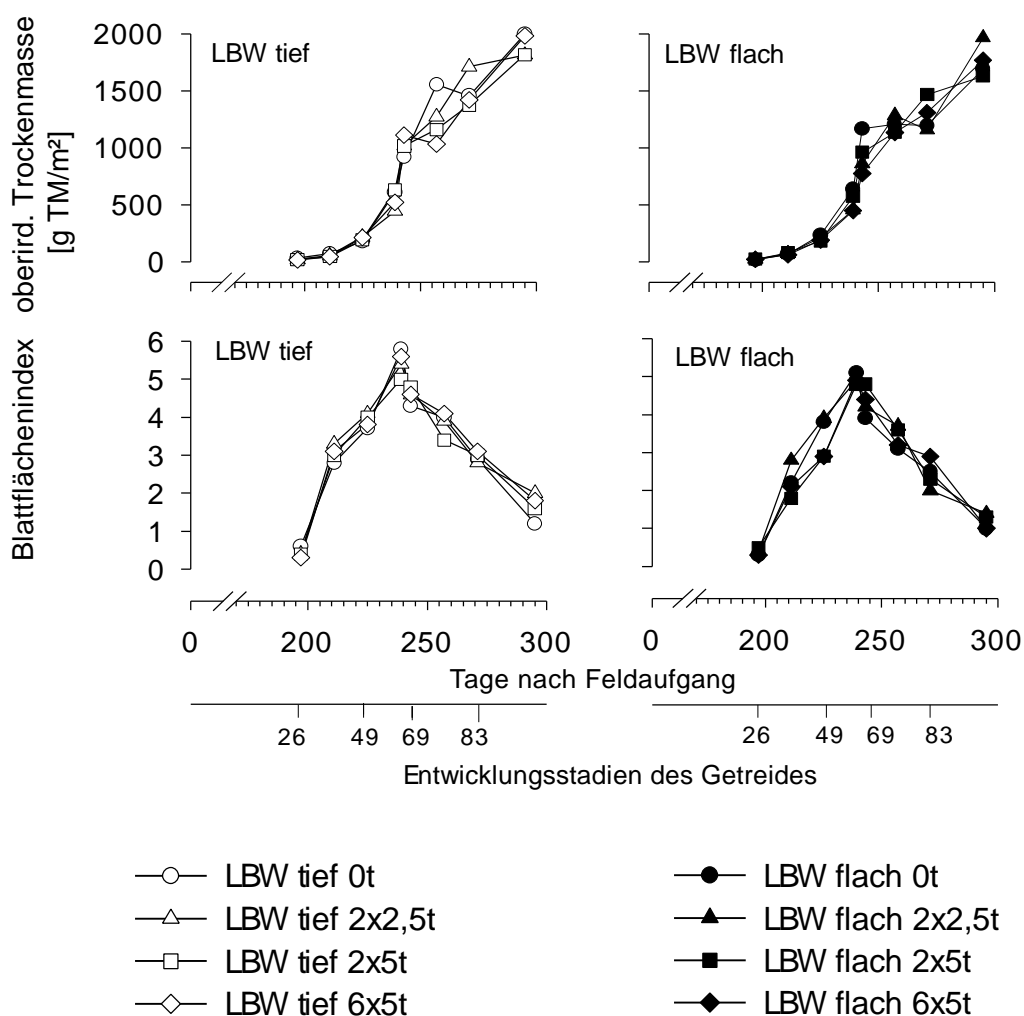


Abb. 35: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Winterweizen über die Zeit auf dem Standort **Großobringen** im Versuchsjahr **1996**.

Tab. 24: Bestandeshöhe des Winterweizens zum Zeitpunkt der Ernte im Versuchsjahr **1996** auf dem Standort **Großobringen**. Gezeigt werden arithmetische Mittelwerte und die Grenzwerte des 95%-Vertrauensintervalls.

Bearbeitungssystem	Bestandeshöhe [cm]			
	Belastungsstufe			
	0t	2x2,5t	2x5t	6x5t
LBW tief	95 (±2,8)	92 (±3,1)	96 (±2,0)	96 (±2,3)
LBW flach	88 (±2,5)	88 (±1,5)	90 (±3,1)	89 (±2,0)

4.2.2.3.3 Versuchsjahr 1997

Im dritten Versuchsjahr zeigte das Trockengewicht und die Blattfläche der Wintergerste auf dem **tief** gepflügten Boden bei **0t**, **2x2,5t** und **6x5t** keine deutlichen Unterschiede (Abb. 36 links). Bei **2x5t** wurde zu Beginn des Schossens ein reduziertes Blattwachstum festgestellt. Auf dieser Variante erreichte der Bestand erst 214 Tage nach Feldaufgang einen BFI über 3. Bei den anderen Belastungsstufen wurde dieser Wert bereits 201 Tage nach Feldaufgang erreicht (Termin des Feldaufgangs siehe Tab. 59). Wahrscheinlich beeinträchtigte die geringe Blattfläche bei **LBW tief 2x5t** die Ausnutzung der eingestrahlten Energie und führte so zu einer verminderten Trockenmasseproduktion.

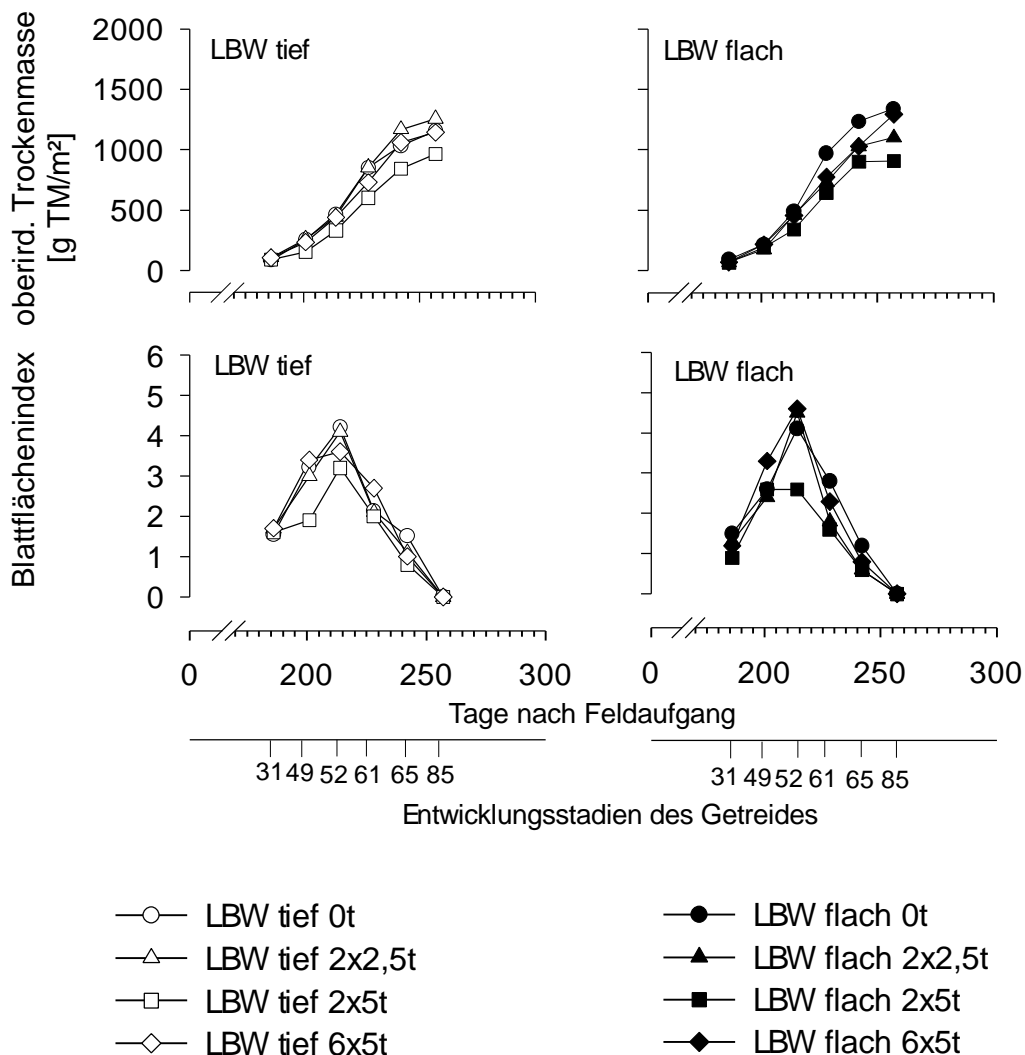


Abb. 36: Entwicklung der oberirdischen Trockenmasse (oben) und des Blattflächenindex (unten) von Wintergerste über die Zeit auf dem Standort **Großobringen** im Versuchsjahr **1997**.

Auf dem **flach** gepflügten Boden (Abb. 36 rechts) zeigte das Trockengewicht und die Blattfläche keine deutlichen Unterschiede bei **0t**, **2x2,5t** und **6x5t**. Bei **2x5t** brach die Zunahme an Blattfläche nach dem Schossen ab. Der BFI blieb bis zum Ährenschieben bei einem Wert von 2,5 konstant. Ab der Blüte nahm die Blattfläche bei allen Belastungsstufen ab. Die stark eingeschränkte Blattflächenentwicklung bei **LBW flach 2x5t** hatte ähnlich wie bei **LBW tief 2x5t** eine deutlich verminderte Trockenmassebildung zur Folge. Ein Einfluß der Spatenpflugtiefe auf das Trockengewicht und die Blattfläche war nicht festzustellen.

Aus Tab. 25 geht hervor, daß im letzten Versuchsjahr die Bestandeshöhe der Wintergerste bei beiden Bearbeitungssystemen und steigender Bodenbelastung verringert wurde. Bei einem Vergleich der Bearbeitungssysteme zeigte sich, daß die Bestandeshöhe auf dem **flach** gepflügten Boden deutlich unter der Bestandeshöhe auf dem **tief** gepflügten Boden lag. Bei **LBW tief 2x5t** lag die Bestandeshöhe bei beiden Bearbeitungssystemen auffällig niedrig und zeigte damit Parallelen zur Entwicklung von Trockenmasse und Blattfläche (siehe oben).

Tab. 25: Bestandeshöhe der Wintergerste zum Zeitpunkt der Ernte im Versuchsjahr **1997** auf dem Standort **Großobringen**. Gezeigt werden arithmetische Mittelwerte und die Grenzwerte des 95%-Vertrauensintervalls.

Bearbeitungssystem	Bestandeshöhe [cm]			
	Belastungsstufe			
	0t	2x2,5t	2x5t	6x5t
LBW tief	80 ($\pm 2,2$)	73 ($\pm 3,3$)	57 ($\pm 3,2$)	61 ($\pm 2,6$)
LBW flach	69 ($\pm 2,4$)	62 ($\pm 4,3$)	57 ($\pm 1,9$)	55 ($\pm 2,4$)

4.2.3 Gaswechsel und Gesamtwasserpotential

Wasser ist von außerordentlich großer Bedeutung für das Leben der Pflanzen. Das über die Wurzeln aufgenommene Bodenwasser gelangt durch den Sproß ins Blatt. Von der Blattoberfläche wird es als Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben. Die Menge des aufgenommenen Bodenwassers und die Menge des durch Transpiration abgegebenen Wassers beeinflussen das Gesamtwasserpotential in der Pflanze. Die Höhe des Gesamtwasserpotentials beeinflusst viele physiologische Prozesse und kann ein Maß für Wasserstreß in der Pflanze darstellen.

Neben der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) ist das Vorhandensein von CO_2 in den Chloroplasten eine Voraussetzung für die photosynthetischen Stoffwechselprozesse einer Pflanze. CO_2 dient als Kohlenstoffquelle zur Biosynthese von Kohlehydraten und damit zur Substanzproduktion. Die CO_2 -Aufnahme in das Blatt geschieht – ebenso wie die Transpiration von Wasserdampf – über die Stomata. Treibender Motor für beide Prozesse der Aufnahme und der Abgabe ist die Diffusion entlang eines Konzentrationsgefälles. Für die Abgabe des Wasserdampfes gibt das Sättigungsdefizit der umgebenden Luft einen Hinweis auf die Größe des Konzentrationsgefälles. Regelmechanismen steuern die Raten des Gaswechsels über die Öffnungsweite der Stomata. Als Maß für den Öffnungszustand der Stomata dient die stomatäre Leitfähigkeit. CO_2 – Assimilation, Transpiration und Gesamtwasserpotential sind eng über die Regelmechanismen der Stomata miteinander verbunden.

Am 23.06.1996 wurden auf dem Standort **Reinshof** Messungen zum Gaswechsel des Winterweizens durchgeführt. Abb. 37 faßt mit der PAR und dem Sättigungsdefizit der Luft Witterungsbedingungen zur Zeit der Messung zusammen. Dargestellt ist in Abb. 38 die CO_2 -Assimilation und die stomatäre Leitfähigkeit des Winterweizens, in Abb.39 das zeitgleich gemessene Gesamtwasserpotential der Pflanzen und in Abb. 40 der Wassergehalt des Bodens zum Termin der Gaswechselfmessung.

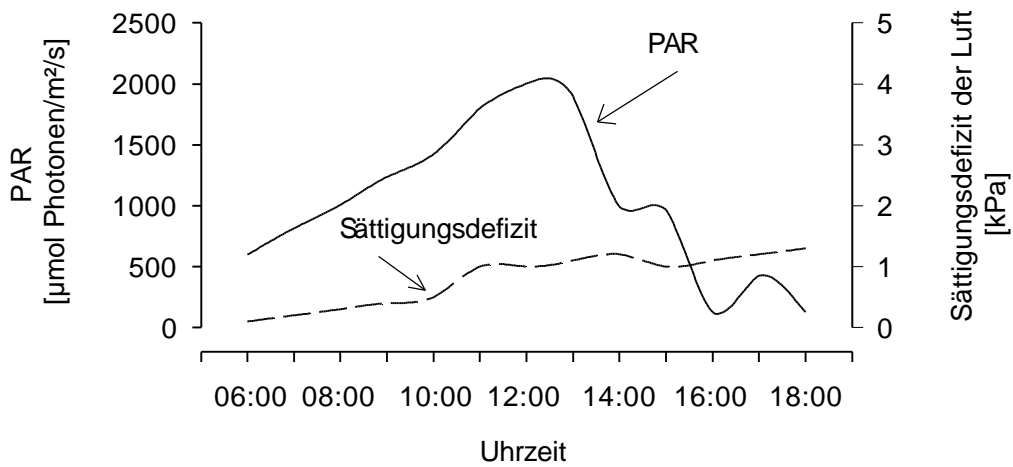


Abb. 37: Gang der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und des Sättigungsdefizites am 23.06.1996 auf dem Standort **Reinshof**.

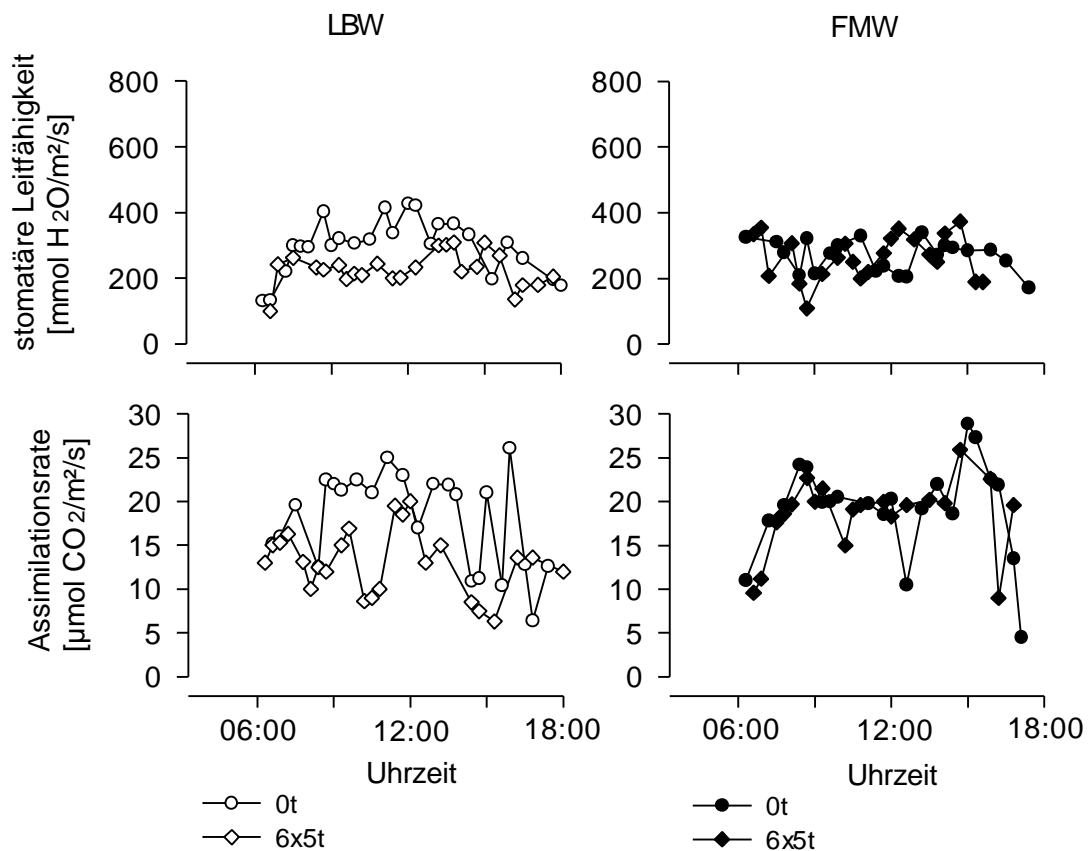


Abb. 38: Stomatäre Leitfähigkeit (oben) und CO₂-Assimilationsrate des Winterweizens (unten) gemessen am Fahnenblatt auf dem Standort **Reinshof** als Funktion der Zeit am 23.06.1996 zum Stadium EC 69.

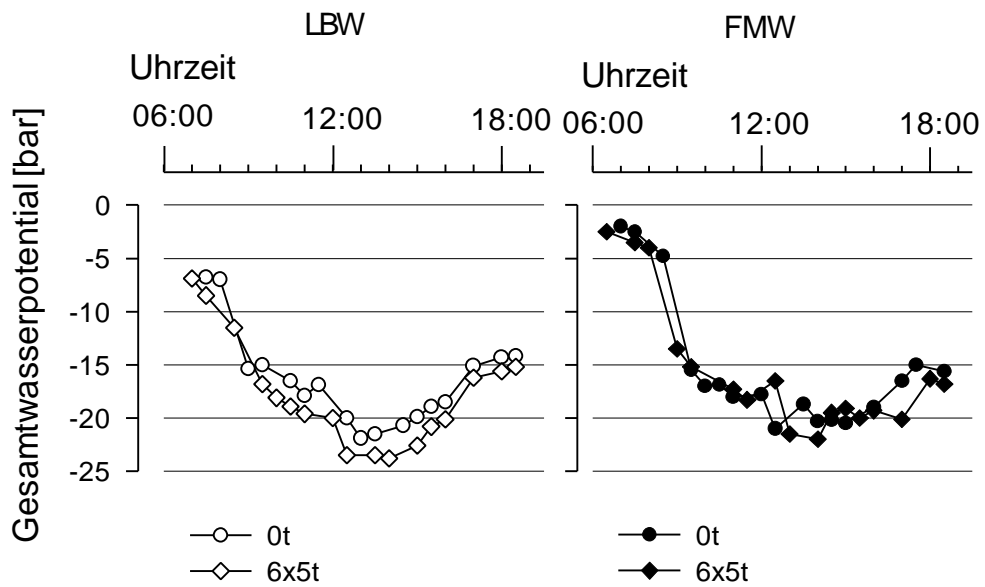


Abb. 39: Gesamtwasserpotential im Winterweizen als Funktion der Zeit am 23.06.1996 auf dem Standort **Reinshof** zum Stadium EC 69.

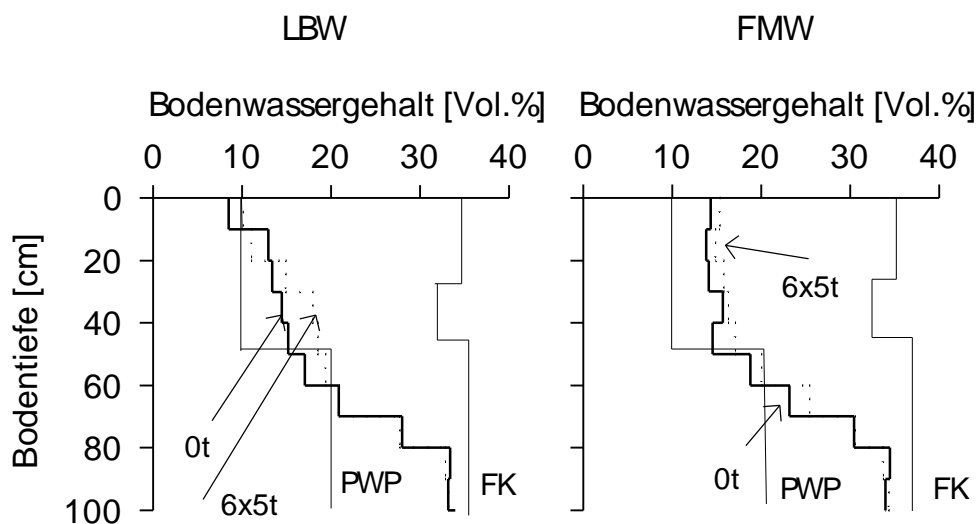


Abb. 40: Bodenwassergehalt als Funktion der Bodentiefe auf dem Standort **Reinshof** am 23.06.1996. Die Feldkapazität (FK) und der Permanente Welkepunkt (PWP) sind nach Angaben von BORNSCHEUER (1984) zusammengestellt.

Wie Abb. 37 zeigt, nahm die PAR am 23.06.1996 von 06:00 Uhr bis ca. 12:00 Uhr stark zu. Höchstwerte wurden zwischen 11:00 und 12:00 Uhr mit ca. 2000 $\mu\text{mol Photonen/m}^2/\text{s}$ erreicht. Von 12:00 bis 18:00 Uhr nahm die PAR bis auf Werte unter 500 $\mu\text{mol Photonen/m}^2/\text{s}$ ab. Die Abnahme der PAR war die Folge einer aufziehenden dichten Bewölkung. Das Sättigungsdefizit der Luft lag um 06:00 Uhr knapp über null. Über den Tagesgang nahm das Sättigungsdefizit der Luft bis auf 1,3 kPa zu. Insgesamt lagen die Werte auf einem sehr niedrigen Niveau. An strahlungsreichen Tagen können Werte bis zu 4 kPa erreicht werden (EHLERS 1996).

Bei **LBW** lag die stomatäre Leitfähigkeit des Weizens bei hoher Bodenbelastung fast über den gesamten Tag unter der Leitfähigkeit des Weizens auf dem Boden ohne Belastung (Abb. 38 links oben). Bei geringer und mittlerer Belastung (nicht dargestellt) lagen die Meßwerte annähernd auf der Höhe der Kontrolle (**LBW 0t**). Offensichtlich war die Öffnungsweite der Stomata bei **0t** über den Tag größer als bei **6x5t**. Eine Ausnahme bildete der Zeitabschnitt von 06:00 bis 07:00 Uhr: Zu Anfang des Tages unterschieden sich die Öffnungsweiten der Stomata nicht. Wie Abb. 38 (links unten) zeigt, war auch die CO_2 -Assimilationsrate bei **0t** im Durchschnitt höher als bei **6x5t**. Die Werte bei **2x2,5t** und **2x5t** (nicht dargestellt) lagen zwischen den Belastungsstufen **0t** und **6x5t**. Auf dem hoch belasteten Boden hatte die geringere Öffnungsweite der Stomata eine Einschränkung der CO_2 -Aufnahme zur Folge.

Der Tagesverlauf des Gesamtwasserpotentials (GWP) des Weizens im Tagesverlauf zeigte auf dem gepflügten Boden bemerkenswerte Unterschiede zwischen den Belastungsstufen **0t** und **6x5t** (Abb. 39 links): Bis ca. 09:00 Uhr fielen die Werte des GWP bei **0t** und **6x5t** von -7 bar auf -15 bar (bitte beachten: Fallende Werte der GWP bedeuten einen Anstieg des Wasserstresses in der Pflanze). Von etwa 09:00 bis 14:00 Uhr nahmen die Werte auf dem hoch belasteten Boden merklich stärker ab als auf dem nicht belasteten Boden - der Wasserstreß des Weizens auf der hoch belasteten Variante war deutlich höher als auf der Kontrolle (**LBW 0t**). Nach 14:00 Uhr stiegen die Werte des GWP bis zum Ende der Messung bei beiden Varianten wieder an, der Wasserstreß nahm ab. Wie auch in der Zeit von 09:00 bis 14:00 Uhr unterlagen die Pflanzen auf dem hoch belasteten Boden von 14:00 bis 18:00 einem auffallend höheren Wasserstreß als die Pflanzen auf dem Boden ohne Belastung. Die Werte des

GWP bei geringer und mittlerer Bodenbelastung (nicht dargestellt) entsprachen im Tagesverlauf in etwa der Kontrolle (**LBW 0t**). Aus Abb.40 geht der zeitgleich erfaßte Bodenwassergehalt als Funktion der Bodentiefe hervor: Auf dem gepflügten Boden unterschritt der Wassergehalt des Bodens bei **6x5t** den PWP in der obersten Bodenschicht (0-10 cm) und in der Bodenschicht 50 – 60 cm geringfügig, pflanzenverfügbares Wasser stand nicht mehr zur Verfügung (Abb. 40 links). Mit zunehmender Bodentiefe nahm bei beiden Belastungsstufen der Bodenwassergehalt zu. Von 20 cm bis 60 cm Bodentiefe lag der Wassergehalt auf dem hoch belasteten Boden um 1-2 Vol. % über dem Gehalt an Bodenwasser auf dem nicht belasteten Boden. Unterhalb von 60 cm Bodentiefe war der Wassergehalt bei **0t** und **6x5t** identisch.

Bei **FMW** zeigte die stomatäre Leitfähigkeit des Winterweizens (Abb. 38 rechts oben) auf dem Boden ohne, mit geringer (nicht dargestellt), mit mittlerer (nicht dargestellt) und schließlich mit hoher Bodenbelastung keine kennzeichnenden Unterschiede. So wie die stomatäre Leitfähigkeit, so stellte sich auch die Assimilationsrate dar (**2x2,5t** und **2x5t** sind nicht dargestellt): Über den Zeitabschnitt von 06:00 bis 18:00 Uhr wich die Assimilationsrate der Pflanzen auf dem hoch belasteten Boden nicht auffallend von der Kontrolle (**FMW 0t**) ab (Abb. 38 rechts unten). Wie Abb.39 rechts zeigt, wies auch das GWP im Tagesgang keine deutlichen Unterschiede zwischen den Belastungsstufen bei **FMW** auf. Die Werte bei **2x2,5t** und **2x5t** (nicht dargestellt) entsprachen in etwa der Kontrolle (**FMW 0t**).

Bei einem Vergleich des GWP bei **LBW** und **FMW** zeigte sich auffallende Unterschiede: Auf dem gepflügten Boden war das Potential zu Beginn der Messung um 06:00 Uhr erheblich niedriger als auf dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden (Abb. 39 rechts). Offenbar konnten sich **FMW** – Pflanzen über Nacht besser erholen als die auf **LBW**. Bei **LBW** stellte sich über Mittag ein stärkerer Wasserstreß ein als bei **FMW**.

Der Bodenwassergehalt bei **FMW** lag bei allen Belastungsstufen (**2x2,5t** und **2x5t** sind nicht dargestellt) von der obersten Bodenschicht bis zu einer Bodentiefe von 50 cm bei ca. 15 Vol. % (Abb. 40 rechts). Von 50 cm bis 80 cm Bodentiefe nahm der Gehalt an Bodenwasser bei allen Belastungsstufen bis auf 30 Vol.% zu. In der obersten Bodenschicht bis ca. 20 cm Bodentiefe lag der

Bodenwassergehalt auf dem flach bearbeiteten Boden deutlich über dem Wassergehalt des gepflügten Bodens.

Abb. 41 zeigt die assimilierte CO_2 -Menge als Funktion der PAR für Winterweizen auf gepflügtem Boden mit den Belastungsstufen **0t** und **6x5t** am 23.06.1996. Die Regressionskurve, die den Verlauf einer Hyperbel hat, zeigt die assimilierte CO_2 -Menge als Funktion vom Lichtfluß und wird fortan als Lichtfluß-Effektkurve bezeichnet (MOHR & SCHOPFER 1985). Ein Vergleich der Lichtfluß-Effektkurven (Abb. 41) zeigt Unterschiede zwischen den Belastungsstufen **0t** und **6x5t** auf dem gepflügten Boden: Ab einem Lichtfluß von über 300 $\mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$ lag die Assimilationsrate der Pflanzen auf dem nicht belasteten Boden stets über der Assimilationsrate auf dem hoch belasteten Boden.

Um die Assimilationsraten aller Belastungsstufen auf dem gepflügten und dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden vergleichen zu können, sind die Lichtfluß-Effektkurven in Abb.42 dargestellt.

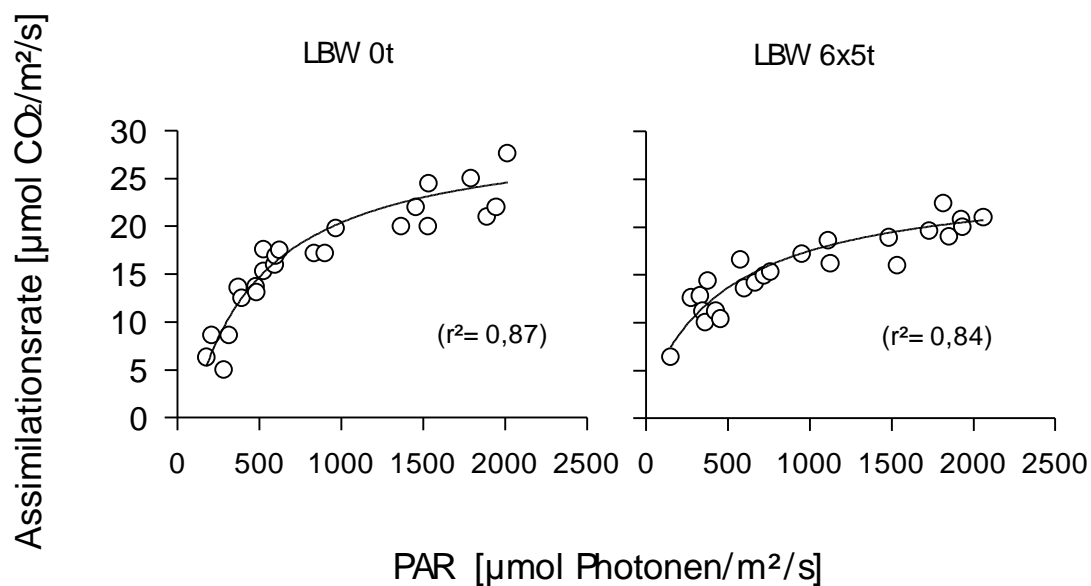


Abb. 41: Die CO_2 -Assimilationsrate von Winterweizen (gemessen am Fahnblatt) als Funktion der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) zum Stadium EC 69 bei Lockerbodenwirtschaft (LBW) auf dem Standort **Reinshof** vom 23.06.1996.

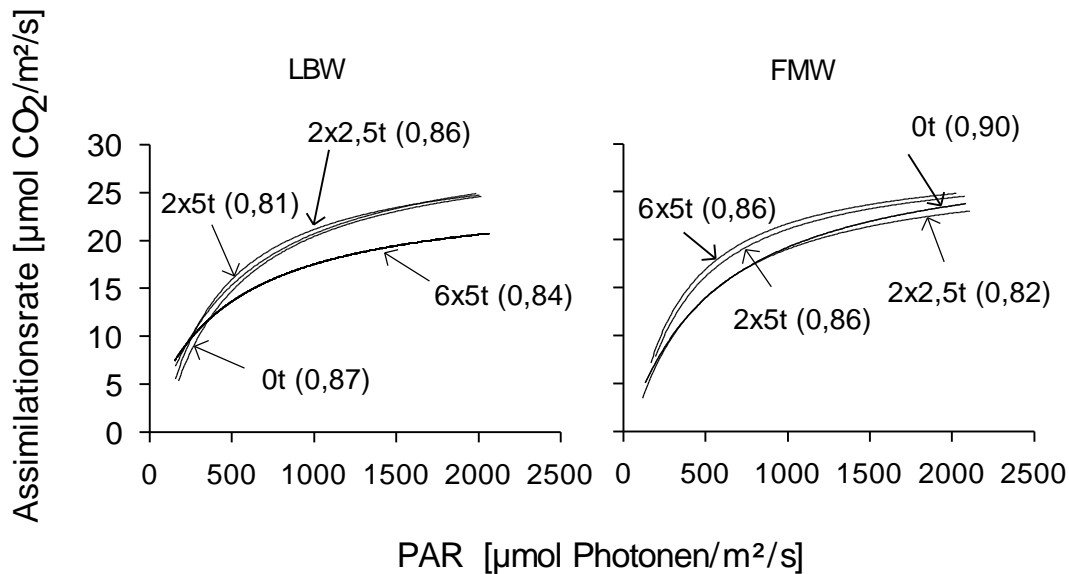


Abb. 42: Lichtfluß-Effektkurven des Winterweizens (gemessen am Fahnenblatt) am 23.06.1996 im Stadium EC 69 auf dem Standort **Reinshof**. Die Zahlen in Klammern zeigen das Bestimmtheitsmaß (r^2) der Regression.

Bei **LBW 0t**, **2x2,5t** und **2x5t** lagen die CO_2 -Assimilationsraten über den gesamten Bereich der eingestrahnten Lichtmenge auf dem gleichen Niveau (Abb. 42 links). Auf dem hoch belasteten Boden war bei geringer Lichtmenge ($< 300 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$) die Assimilationsrate so hoch wie bei der Kontrolle (**LBW 0t**). Mit zunehmender Lichtmenge ($> 300 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$) lagen die Werte der Assimilationsraten bei **6x5t** deutlich unter der Kontrolle (**LBW 0t**). Die Differenz wurde mit zunehmendem Lichtfluß zwischen **6x5t** und **0t** größer: Bei $2000 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$ lag die Assimilationsrate von **6x5t** um 19% unter den Werten bei **0t**. Bei **FMW** (Abb. 42 rechts) zeigte sich ein ganz anderes Bild. Über den ganzen Bereich der eingestrahnten Lichtmenge lagen die Werte bei **0t** und **2x2,5t** auf einer Höhe. Ebenso unterschied sich die Assimilationsrate von **2x5t** und **6x5t** nur unwesentlich. Bemerkenswert ist das Verhältnis von Assimilationsrate und Belastungsstufe: Im Gegensatz zum gepflügten Boden lagen auf dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden die Assimilationsraten auf dem Boden mit mittlerer und hoher Belastung über einen weiten Strahlungsbereich ($350 - 1500 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$) ca. 15% über den Assimilationsraten auf dem nicht oder gering belasteten Boden. Im Vergleich der Bearbeitungssysteme zeigte sich ein annähernd identischer Verlauf der Lichtfluß-Effektkurven von

LBW 0t und **FMW 0t**. Das Bearbeitungssystem hatte ohne zusätzliche Bodenbelastung zum Meßtermin keinen Einfluß auf die Höhe der CO₂-Assimilationsrate der Kulturpflanzen als Funktion der PAR.

Im Jahr **1996** konnten die CO₂/H₂O-Gaswechselfmessungen nur mit sehr geringem Probenumfang durchgeführt werden, da die Eichung des Porometers große Schwierigkeiten machte und ein CO₂ – Regelventil defekt war. Im Jahr **1997**, dem letzten Versuchsjahr, konnten die technischen Mängel eliminiert werden, so daß umfangreichere Messungen möglich waren. Im Rahmen der Gaswechselfmessungen waren Meßphasen bei hohem Wasserstreß in den Pflanzen von besonderem Interesse: Unter Streßbedingungen wurden die größten Unterschiede zwischen den Varianten erwartet. Um den Gaswechsel bei möglichst hohem Wasserstreß in den Pflanzen erfassen zu können, wurden vom **04.06.1997** bis zum **19.06.1997** Messungen am Fahnenblatt der Wintergerste durchgeführt. Im untersuchten Zeitabschnitt fiel kein Niederschlag, die Witterung konnte als sommerlich warm beschrieben werden. Ziel der Untersuchung war es, möglichst lange Tagesgänge bei wolkenfreiem Himmel mit hoher PAR und hohem Sättigungsdefizit zu erfassen. Werte vor und knapp nach Sonnenaufgang sollten Aufschluß geben über die Gaswechselfvorgänge nahe des Lichtkompensationspunktes. Die Witterungsbedingungen im untersuchten Zeitabschnitt ermöglichten es nicht, einen kompletten Tagesgang von früh morgens bis zum späten Nachmittag zu erfassen. Aufkommende Bewölkung führte an den Meßtagen zu unterschiedlichen Tageszeiten zu einem Abbruch der Messungen. Um dennoch einen Tagesgang über einen möglichst langen Zeitabschnitt betrachten zu können, wurden in den Abb. 43-45 die Messungen des **18.06.1997** (von 04:10 bis 08:00) und des **19.06.1997** (von 08:00 bis 15:40) zusammengefaßt. Zu diesen Zeiten wurde die Sonneneinstrahlung bis 09:00 Uhr nicht durch sichtbare Wolkenbildung abgeschirmt (Abb. 43). Zwischen 9:30 und 13:30 Uhr bildete sich eine leichte Wolkendecke, die PAR nahm ab. Von ca. 13:30 Uhr bis 14:30 Uhr war der Himmel wolkenfrei. Danach kam es zu einer schnell zunehmenden dichten Bewölkung, so daß die Messung um etwa 15:30 Uhr abgebrochen werden mußte. Das Sättigungsdefizit der Luft stieg von etwa 0 kPa bis auf ca. 1,3 kPa um 11:00 Uhr an. Von 11:00 bis ca. 12:00 Uhr blieb das Sättigungsdefizit auf diesem Niveau. Um 14:00 Uhr – bei zunehmen-

der PAR – stiegen die Werte auf knapp 2 kPa an. So wie die PAR, so nahm auch das Sättigungsdefizit bei zunehmender Bewölkung nach 14:30 Uhr ab.

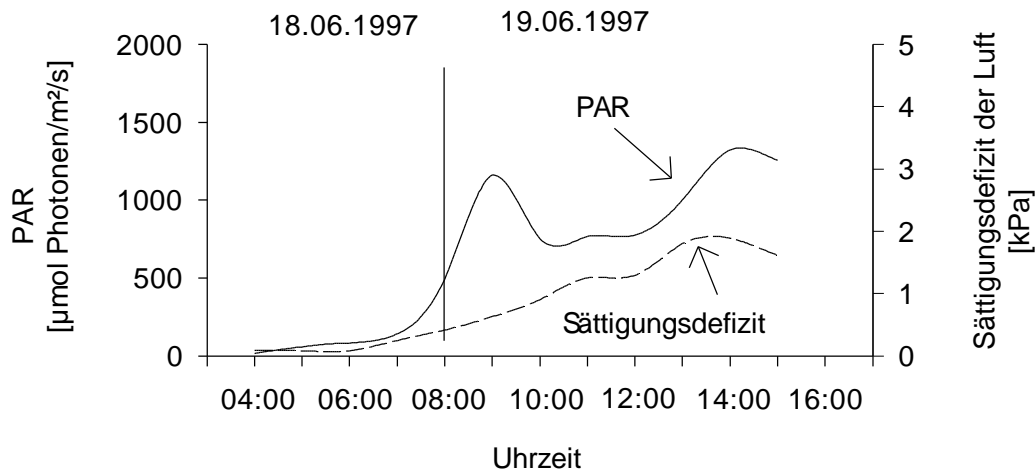


Abb. 43: Gang der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und des Sättigungsdefizites am 18.06.1997 und am 19.06.1997 auf dem Standort **Reinshof**.

Bei **LBW** (Abb. 44 links) bestätigten die Beobachtungen des Tagesganges die Erfahrungen vom Vorjahr mit Winterweizen: Bei hoher Belastung lag die stomatare Leitfähigkeit der Wintergerste, ebenso wie die CO_2 -Assimilationsrate tendenziell unter den Werten bei **0t**. Auf dem hoch belasteten Boden führte ein stärkerer Spaltenschluß der Stomata zu einer Beeinträchtigung der CO_2 -Assimilationsrate. Die Werte der stomatären Leitfähigkeit und der CO_2 -Assimilationsrate auf dem Boden mit geringer und mittlerer Belastung (nicht dargestellt) entsprachen in etwa den Werten der Kontrolle (**LBW 0t**). Wie aus Abb.45 (oben) hervorgeht, war zur selben Zeit bei **LBW 6x5t** der Wasserstreß in den Pflanzen auffallend höher als bei der Kontrolle. Die Pflanzen bei **6x5t** unterlagen in der Regel einem höheren Wasserstreß. Zur Mittagszeit wurden Spitzenwerte des Gesamtwasserpotentials von -25 bar erreicht.

Eine Betrachtung der Ausschöpfung des Bodenwassers vom 04.06 bis zum 19.06.1997 in Abb.46 (links) zeigte einen ungleichen Wasserentzug bei **LBW 0t** und **LBW 6x5t**. In der Bodenschicht von 10-60 cm lag die Menge des aufgenommenen Wassers bei **6x5t** deutlich über dem Entzug bei **0t**. Unterhalb von 60 cm nahmen die Pflanzen bei **6x5t** in der beobachteten Zeit kein Bodenwasser auf. Bei den Pflanzen auf der Kontrolle war ein Wasserentzug bis in eine Bodentiefe von 90 cm festzustellen. Der starke Wasserentzug aus den oberen

Bodenschichten bei **6x5t** führte zu einer kompletten Entleerung des Vorrats an pflanzenverfügbarem Wasser in der Bodenschicht 0-20 cm (nicht dargestellt). Bei **0t** wurde der permanente Welkepunkt (PWP) nur in der Bodenschicht 0-10 cm erreicht. Insgesamt entzogen die Pflanzen vom 04.06. bis zum 19.06.1997 bei **6x5t** 17 % mehr Bodenwasser als die Pflanzen auf der Kontrolle (**LBW 0t**). Bei **FMW** (Abb. 44 rechts) stellte sich eine andere Entwicklung dar: Die stomatare Leitfähigkeit und die CO₂-Assimilationsrate nahm mit steigender Bodenbelastung zu (**2x2,5t** und **2x5t** sind nicht dargestellt). Dies gilt besonders für die Zeit von 09:00 Uhr bis 15:00 Uhr. Eine Betrachtung des Gesamtwasserpotentials (Abb. 45 unten) zeigte bei **FMW** (**2x2,5t** und **2x5t** sind nicht dargestellt) keine Unterschiede zwischen den Belastungsstufen. Anders als bei **LBW** lag bei **FMW** die Bodenwasserausschöpfung in der Bodenschicht 10-30 cm bei **0t** über dem Entzug bei **6x5t** (Abb. 46 rechts). In der Bodenschicht 0-10 cm und unter 30 cm Bodentiefe war die Wasseraufnahme von **0t** und **6x5t** annähernd gleich. Insgesamt lag der Wasserentzug in der beobachteten Zeit bei **0t** 17% über dem Entzug von **6x5t**.

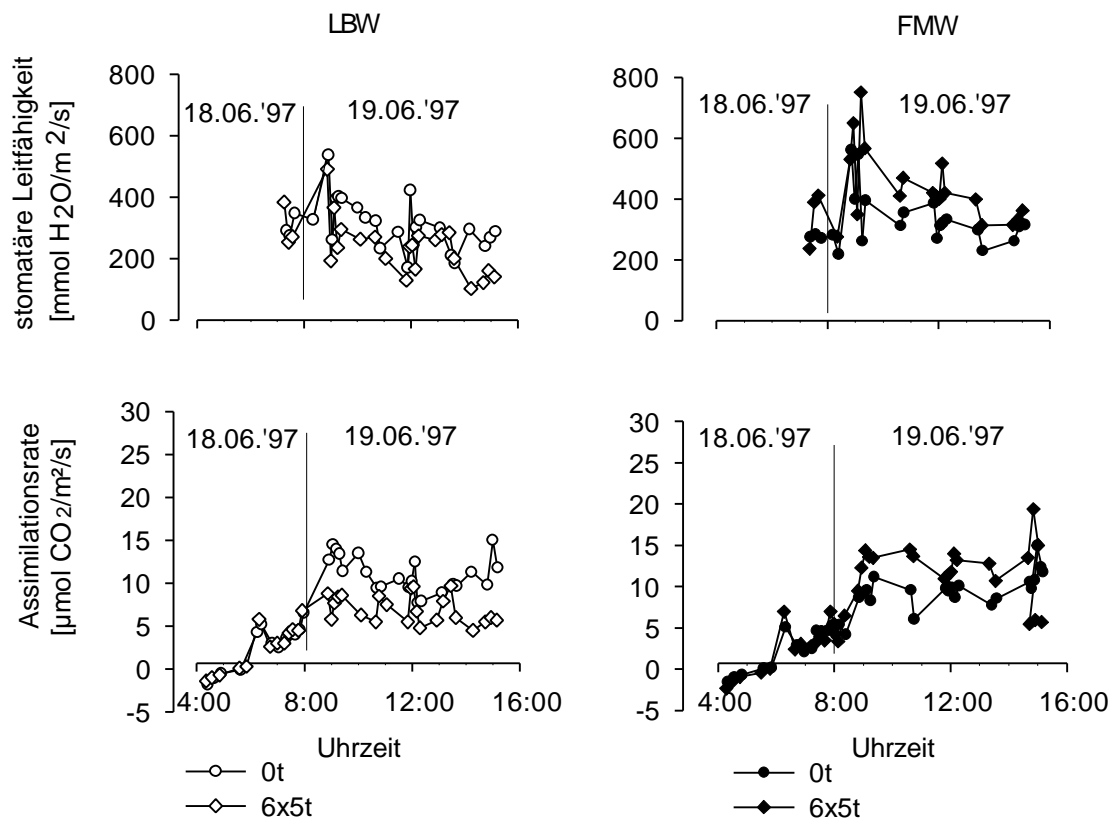


Abb. 44: Stomatäre Leitfähigkeit (oben) und CO_2 -Assimilationsrate des Wintergerste (unten) gemessen am Fahnenblatt auf dem Standort **Reinshof** als Funktion der Zeit am 18. und 19. 06.1997 zum Stadium EC 83.

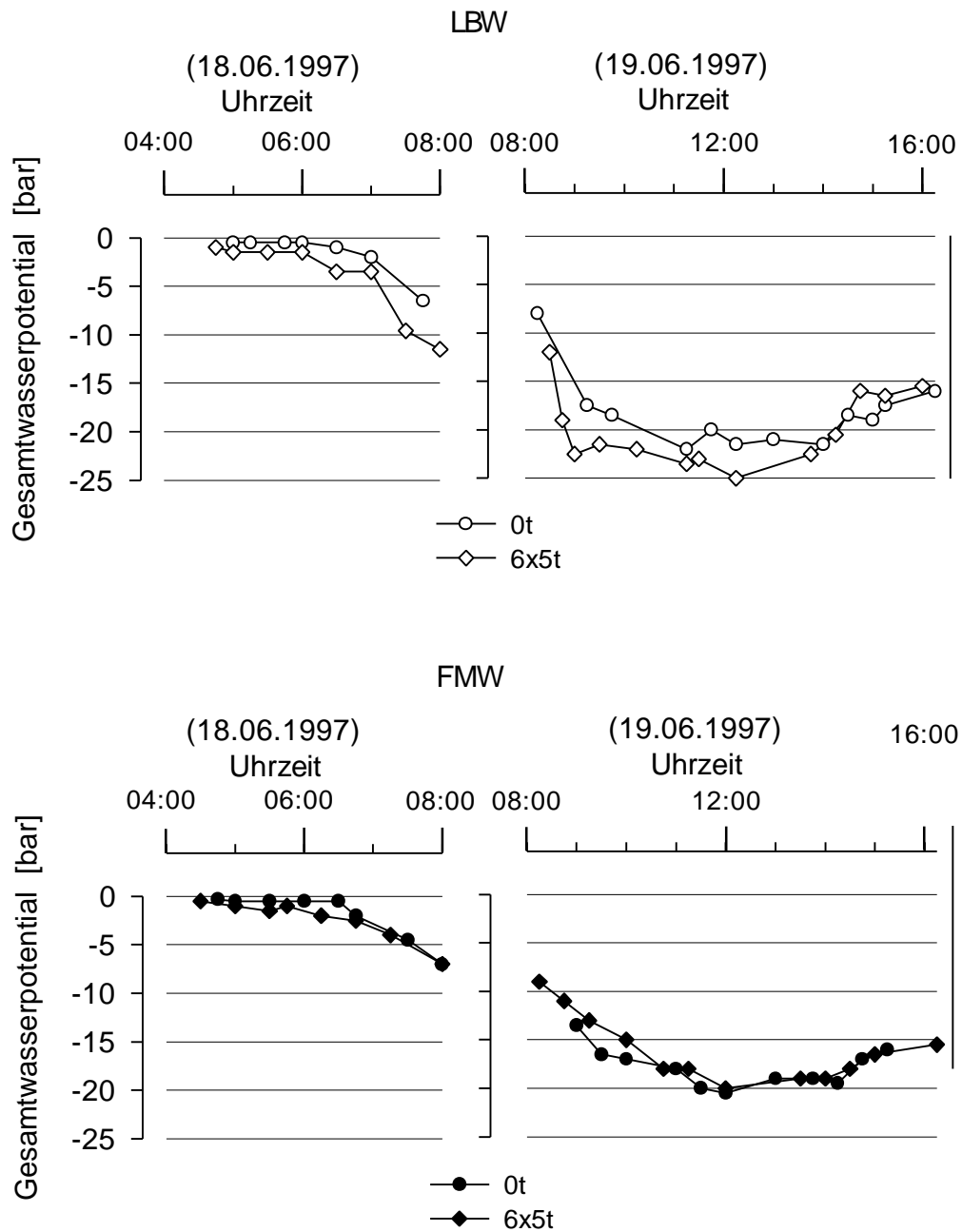


Abb. 45: Gesamtwasserpotential in der Wintergerste als Funktion der Zeit am 18. und 19.06.1996 auf dem Standort **Reinshof** zum Stadium EC 83.

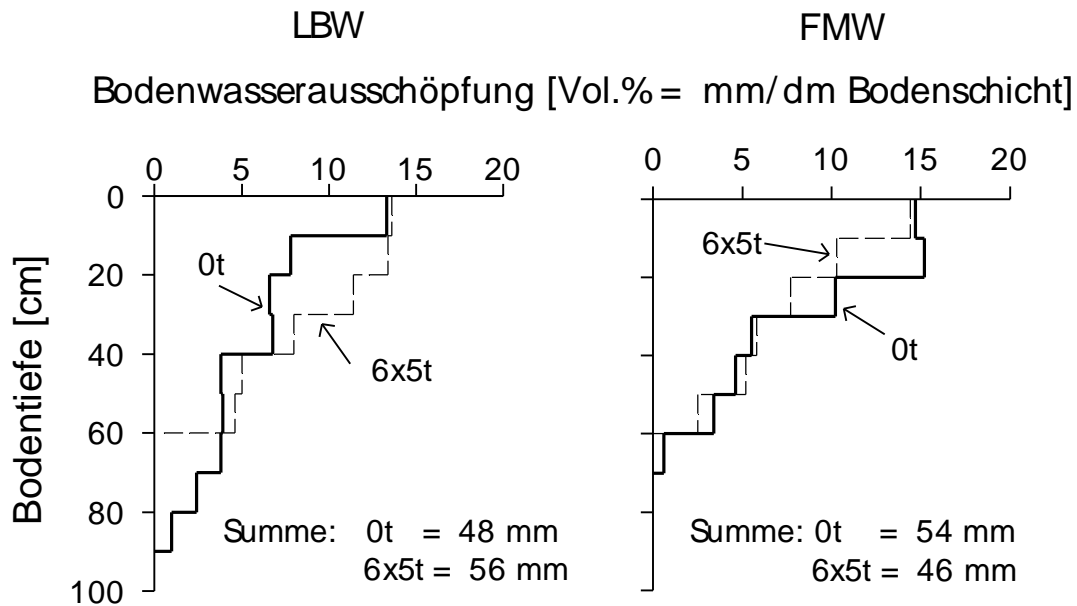


Abb. 46: Bodenwasserausschöpfung vom 04.06.1997 bis zum 19.06.1997 aus einzelnen Bodenschichten auf dem Standort **Reinshof**.

Die Gaswechsellmessungen im Tagesgang vom 04.06.1997 bis zum 17.06.1997 (nicht dargestellt) zeigten auf dem gepflügten Boden bei hoher Bodenbelastung eine tendenziell geringere CO_2 -Assimilation als auf unbelastetem Boden. In diesem Zeitabschnitt lagen die Werte der CO_2 -Assimilation auf dem flach bearbeitet und gemulchten Boden (nicht dargestellt) bemerkenswerter Weise bei hoher Belastung über den Werten der Kontrolle (**FMW 0t**). Wie aus Abb. 44 (rechts) hervorgeht, übertraf die CO_2 -Assimilation auf dem hoch belasteten Boden am 18. und 19.06.1997 die Assimilationsraten der Kontrolle (**FMW 0t**). Die Differenz zwischen den Werten der Belastungsstufen **0t** und **6x5t** nahm jedoch im Zeitabschnitt vom 04.06.1997 bis zum 17.06.1997 ab, und am 17.06.1997 lag die CO_2 -Assimilation bei **0t** und **6x5t** annähernd auf einer Höhe. In Abb. 47 sind die Gaswechsel-Messungen vom 04.06.1997 bis zum 19.06.1997 in Lichtfluß-Effektkurven zusammengefaßt.

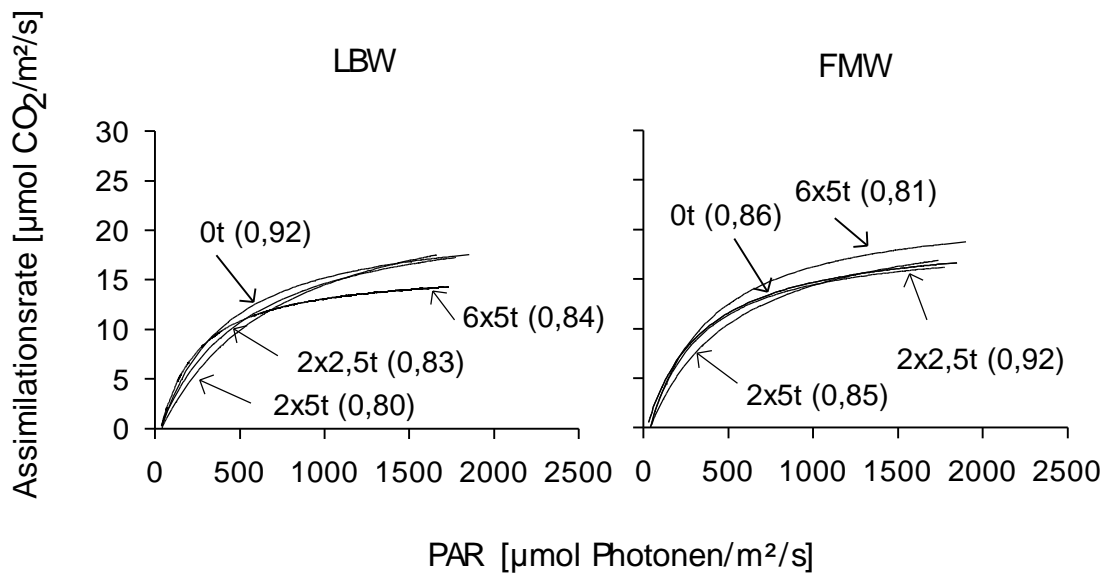


Abb. 47: Lichtfluß-Effektcurven der Wintergerste zum Stadium EC 69 bis 83 im Jahr 1997 auf dem Standort **Reinshof**. Die Zahlen in Klammern zeigen das Bestimmtheitsmaß (r^2) der Regression.

Auf gepflügtem Boden (Abb. 47 links) zeigte sich **1997** dieselbe Tendenz wie **1996**: Bei geringer PAR ($< 700 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$) lag die Assimilationsrate bei allen Belastungsstufen auf gleichem Niveau. Bei einer höheren Strahlungsmenge ($> 700 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$) nahmen die Pflanzen bei **6x5t** deutlich weniger CO_2 pro Einheit Blattfläche und Zeit auf als die Pflanzen bei den geringeren Belastungsstufen. Bei diesen Stufen waren die Assimilationsraten über den gesamten Bereich der Strahlungsmenge annähernd identisch.

Bei **FMW** (Abb.47 rechts) zeigte sich eine bemerkenswerte Umkehrung der Reaktion: Im Bereich stärkerer PAR ($> \text{ca. } 500 \mu\text{mol Photonen}/\text{m}^2/\text{s}$) war die Assimilationsrate bei **6x5t** der Rate bei den anderen Belastungsstufen überlegen. Auf dem maximal belasteten Boden nahmen die Pflanzen bei höherer Lichtmenge ca. 15% mehr CO_2 pro Einheit Blattfläche und Zeit auf als die Pflanzen bei den Belastungsstufen **0t**, **2x2,5t** und **6x5t**.

4.3 Ertragsbildung und Ertrag

Aus den Ertragskomponenten Körner pro Flächeneinheit und Einzelkornmasse (EKM) ergibt sich der pflanzenbauliche Flächenertrag. Die Komponente Körner pro Flächeneinheit setzt sich zusammen aus den Teilkomponenten Ährendichte (Anzahl Ähren pro Flächeneinheit) und Kornbesatz der Ähre (Anzahl Körner pro Ähre).

Die Pflanzendichte beschreibt die Anzahl der Einzelpflanzen pro Flächeneinheit vor dem Stadium des Bestockens. Sie ist das Ergebnis des Entwicklungsverlaufes des Bestandes bis zur Zählung abhängig von der Menge der ausgesäten Körner, der Keimung, dem Feldaufgang und der Entwicklung der bestockungsfähigen Pflanzen.

Im Stadium des Bestockens wird in Abhängigkeit von der Gunst der Umweltbedingungen die maximale Anzahl der Halme pro Einzelpflanze festgelegt. Nicht alle Halme können eine Blütenanlage vollständig bis zum Ende ausbilden. Viele Halme werden während des Schossens zurückgebildet. Die Ährendichte gibt an, wieviel Fruchtstände pro Flächeneinheit nach den Aufbau- und Reduktionsprozessen während der Bestockung, des Schossens und der Blüte zur Kornbildung gelangen konnten.

In ihrer Ausprägung unterliegen alle Ertragskomponenten in Abhängigkeit von Umweltfaktoren erheblichen Schwankungen. Soweit es sich bei den Umweltfaktoren um standortspezifische Klima- und Bodenbedingungen handelt, sind insbesondere das Licht, die Temperatur sowie die Wasser- und Nährstoffversorgung zu nennen.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde dargestellt, inwieweit die Bearbeitungssysteme und die mechanische Bodenbelastung auf die bodenphysikalischen Eigenschaften, das Wurzel- und Sproßwachstum und den Gaswechsel der Kulturpflanzen Einfluß genommen haben.

Im folgenden Kapitel soll erörtert werden, in welchem Ausmaß diese Änderungen der Umweltbedingungen und die dadurch geprägte Entwicklung der Kulturpflanzen die Ertragsbildung und den Ertrag beeinflussen konnten.

4.3.1 Standort **Reinshof**

4.3.1.1 Ertragsbildung

Im ersten Versuchsjahr wurde auf dem Standort **Reinshof** der Kornbesatz der Ähre nicht gezählt. In Tab. 26 werden die Ertragskomponenten und die Pflanzendichte zusammengefaßt.

Tab. 26: Ertragsbildung bei Sommergerste im Jahr **1995** auf dem Standort **Reinshof**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Merkmalen der Bearbeitungssysteme und der Belastungsstufen. Die Daten stammen von Block 1-4.

Belastungsstufe	Pflanzendichte [Pflanzen/m ²]	Ährendichte [Ähren/m ²]	EKM [mg]
LBW			
0t	206 ^a	530 ^a	37,4 ^a
2x2,5t	209 ^a	354 ^b	34,2 ^a
2x5t	213 ^a	265 ^c	36,7 ^a
6x5t	194 ^a	252 ^c	33,4 ^b
FMW			
0t	212 ^a	503 ^a	37,3 ^a
2x2,5t	203 ^a	476 ^a	36,9 ^a
2x5t	209 ^a	435 ^a	36,7 ^a
6x5t	200 ^a	313 ^b	35,5 ^a

Bei **LBW** und **FMW** mit hoher Belastung zeigte sich im Vergleich zu den anderen Varianten ein verzögerter und schwächerer Feldaufgang mit lückigem Bestand (Tab. 26). Die Unterschiede in der Pflanzendichte vor dem Bestocken waren jedoch nicht signifikant. Die Anzahl der Ähren, die sich pro Flächeneinheit ausbildeten, wies auf deutliche Entwicklungsunterschiede in Abhängigkeit von der Belastung hin: Bei **LBW** führte schon die niedrige Bodenbelastung zu einer signifikanten Abnahme der Ährendichte. Durch die Belastung mit **2x5t** und **6x5t** nahm die Ährendichte noch einmal signifikant ab. Bei **FMW** lag die Ährendichte bei der hohen Belastungsstufe signifikant unter den Werten der anderen Belastungsstufen.

Bis auf eine Ausnahme befanden sich die Werte der EKM auf gleichem Niveau. Nur bei hoher Bodenbelastung auf gepflügtem Boden war die EKM signifikant erniedrigt. Im zweiten Versuchsjahr wurde auf dem Standort **Reinshof** zusätzlich der Kornbesatz der Ähre ermittelt. Die Ertragskomponenten und die Pflanzendichte sind in Tab. 27 zusammengefaßt.

Tab. 27: Ertragsbildung bei Winterweizen im Jahr **1996** auf dem Standort **Reinshof**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Merkmalen der Bearbeitungssysteme und der Belastungsstufen. Die Werte stammen von Block 1-4.

Belastungs- stufe	Pflanzen- dichte	Ähren- dichte	Kornbesatz der Ähre	EKM	Kornertrag berechnet
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[Körner/Ähre]	[mg]	[dt TM/ha]
	LBW				
0t	414 ^a	544 ^a	38 ^a	42,4 ^a	87,6 ^a
2x2,5t	408 ^a	537 ^a	37 ^a	43,7 ^a	86,8 ^a
2x5t	420 ^a	510 ^a	37 ^a	43,3 ^a	81,7 ^a
6x5t	418 ^a	530 ^a	33 ^b	41,4 ^a	72,4 ^b
	FMW				
0t	419 ^a	530 ^a	38 ^a	41,3 ^a	83,2 ^a
2x2,5t	416 ^a	571 ^a	35 ^a	40,9 ^a	81,7 ^a
2x5t	403 ^a	516 ^a	37 ^a	41,9 ^a	80,0 ^a
6x5t	412 ^a	496 ^a	35 ^a	41,9 ^a	72,7 ^b

Die Pflanzen- und Ährendichte zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Beim Kornbesatz der Ähren fällt der Wert bei **LBW** mit hoher Belastung auf, der signifikant niedriger liegt als bei allen anderen Varianten. Die hohe Bodenbelastung führte auf dem gepflügten Boden nicht nur zu einer Reduktion des Kornbesatzes der Ähre, sondern in der Tendenz auch zu einer geringeren Einzelkornmasse. Die EKM bei **LBW** und **FMW** wiesen darauf hin, daß auf dem gepflügten Boden die Kornfüllungsphase schwerere Körner hervorgebracht hat als auf dem flach bearbeitet und gemulchten Boden.

Wie schon in den beiden ersten Versuchsjahren konnte bei der Pflanzendichte im dritten Jahr kein Unterschied zwischen den Varianten nachgewiesen werden

(Tab. 28). Die Meßwerte deuten jedoch an, daß sich bei **FMW** geringfügig mehr Gerstpflanzen pro Flächeneinheit ausbilden konnten als auf dem gepflügten Boden. Innerhalb des Faktors **LBW** bildeten sich bei hoher Bodenbelastung signifikant weniger Ähren pro Flächeneinheit als bei den anderen drei Stufen. Auf dem **flach** bearbeiteten Boden fielen besonders die Varianten mit geringer und hoher Belastung auf: Bei geringer Bodenbelastung entwickelten sich erheblich weniger Ähren pro Flächeneinheit als bei der Kontrollparzelle **LBW 0t**. Bei hoher Bodenbelastung wurde dagegen die höchste Ährendichte ermittelt. Im Mittel über die Bearbeitungssysteme scheinen sich auf dem gepflügten Boden geringfügig mehr Ähren pro Flächeneinheit ausgebildet zu haben. Bei der Betrachtung des Kornbesatzes der Ähre stellte sich ein weiterer Effekt des Bearbeitungssystems heraus: Bei **LBW** lagen die Werte signifikant höher als bei **FMW**. Innerhalb der Bearbeitungssysteme konnte eine Wirkung der Bodenbelastung auf den Kornbesatz nicht nachgewiesen werden. Die EKM lag bei allen Varianten auf dem gleichen Niveau. Bei **LBW 6x5t** lag der berechnete Kornertrag unter dem Ertrag der anderen Stufen.

Tab. 28: Ertragsbildung bei Wintergerste im Jahr **1997** auf dem Standort **Reinshof**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Merkmalen der Bearbeitungssysteme und der Belastungsstufen. Die Werte stammen von Block 1, 3 und 4.

Belastungs- stufe	Pflanzen-	Ähren-	Kornbesatz	EKM	Kornertrag berechnet
	dichte	dichte	der Ähre		
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[Körner/Ähre]	[mg]	[dt TM/ha]
LBW					
0t	261 ^a	432 ^a	36 ^a	41,5 ^a	64,5 ^a
2x2,5t	247 ^a	419 ^a	38 ^a	42,2 ^a	67,2 ^a
2x5t	259 ^a	417 ^a	37 ^a	41,8 ^a	64,5 ^a
6x5t	247 ^a	357 ^b	39 ^a	41,9 ^a	58,3 ^a
FMW					
0t	279 ^a	364 ^b	33 ^b	41,3 ^a	49,6 ^b
2x2,5t	283 ^a	266 ^c	27 ^b	40,8 ^a	29,3 ^b
2x5t	265 ^a	340 ^b	28 ^b	40,6 ^a	38,6 ^b
6x5t	264 ^a	496 ^a	31 ^b	41,1 ^a	63,2 ^a

4.3.1.2 Ertrag

Auf beiden Bearbeitungssystemen konnte im ersten Versuchsjahr **1995** eine Abhängigkeit des Ertrags von der Belastungsstufe gefunden werden (Abb. 48 oben). Bei **LBW** lag der Kornertrag der Sommergerste der Kontrollparzelle (**LBW 0t**) signifikant über den Erträgen bei geringer, mittlerer und hoher Bodenbelastung. In der Tendenz zeigte sich eine deutliche Abnahme des Kornertrages mit steigender Bodenbelastung. Bei **FMW** dagegen stieg der Kornertrag von der ersten bis zur dritten Belastungsstufe an (Abb. 48 oben rechts). Diese Unterschiede waren nicht signifikant, wohl aber die Reduktion des Kornertrages durch die hohe Bodenbelastung.

Wie Tab. 29 für die Sommergerste zeigt, änderte sich der Ernteindex - als Maß für die Assimilatverteilung in der Pflanze - bei steigender mechanischer Bodenbelastung erheblich. Bei **LBW** wurden in der Kornfüllungsphase mit zunehmender Bodenbelastung weniger Assimilate in das Korn im Vergleich zu anderen Organen eingelagert. Bei **FMW** fällt besonders die Variante mit mittlerer Bodenbelastung auf: Hier zeigte sich nicht nur der tendenziell höchste Kornertrag, sondern auch der höchste Ernteindex. Im Vergleich zu den anderen Varianten wurden erheblich mehr Assimilate in das Korn eingelagert als in das Stroh.

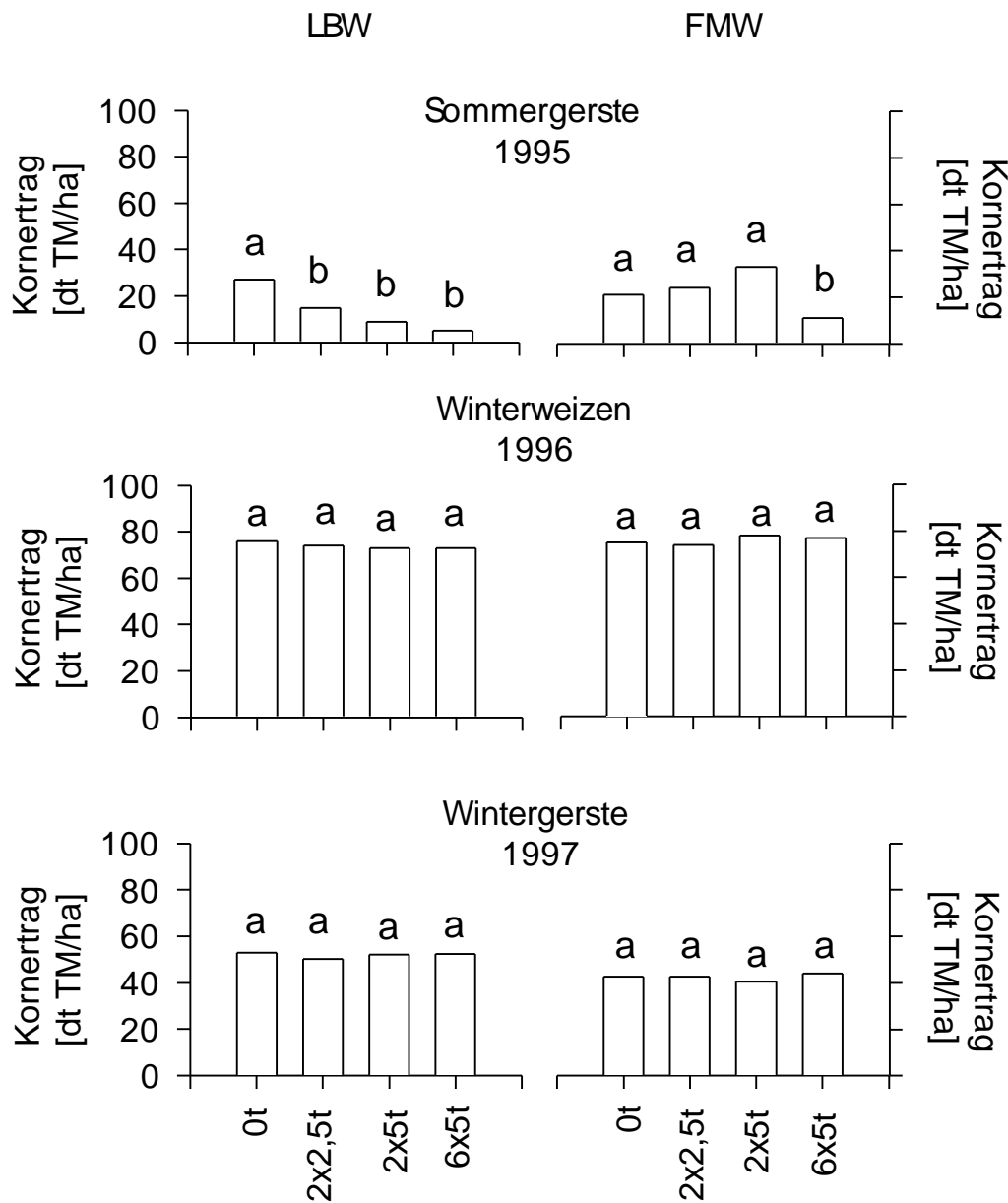


Abb. 48: Kornertrag in den drei Versuchsjahren auf dem Standort **Reinshof**. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Merkmalen der Bearbeitungssysteme und der Belastungsstufen. Die Werte stammen für die Jahre **1995** und **1996** von Block 1-4 und für **1997** von Block 1, 3 und 4.

Tab. 29: Ernteindex bei Sommergerste (SG) **1995** , Winterweizen (WW) **1996** und Wintergerste (WG) **1997** auf dem Standort **Reinshof**.

Kulturpflanze/ Jahr	Bearbeitungs- system	Ernteindex			
		Belastungsstufe			
		0t	2x2,5t	2x5t	6x5t
SG/1995	LBW	0,41	0,33	0,32	0,28
	FMW	0,36	0,38	0,45	0,31
WW/1996	LBW	0,58	0,57	0,58	0,58
	FMW	0,57	0,56	0,56	0,57
WG/1997	LBW	0,53	0,54	0,55	0,52
	FMW	0,48	0,46	0,46	0,46

Im zweiten Versuchsjahr konnte bei Winterweizen keine Beeinflussung des gemessenen Kornertrags durch das Bearbeitungssystem oder durch die Belastungsstufen nachgewiesen werden (Abb. 48 mitte). Wie aus Tab. 29 hervorgeht, verliefen in der Kornfüllungsphase die Translokationsprozesse bei allen Varianten nach ähnlichem Muster.

So wie im zweiten Versuchsjahr, so zeigte sich auch **1997** beim Kornertrag der Wintergerste keine signifikante Differenz zwischen den Varianten. Tendenziell lag der Kornertrag bei **FMW** um ca. 20% unter dem Kornertrag bei **LBW**. Der Ernteindex für die Wintergerste in Tab. 29 deutet an, daß bei **FMW** weniger Assimilate in das Korn im Vergleich zu anderen Organen eingelagert wurden als bei **LBW**.

4.3.2 Standort **Rellehausen**

4.3.2.1 Ertragsbildung

Wie Tab. 30 zeigt, deutet die Anzahl der Pflanzen (Sommergerste) pro Flächeneinheit darauf hin, daß die hohe Bodenbelastung auf dem gepflügten Boden - verglichen mit den anderen Belastungsstufen - zu einer etwas geringeren Pflanzendichte führte. Auf dem **flach** bearbeiteten Boden zeigte die Pflanzendichte keine grundlegende Abhängigkeit von der Höhe der Bodenbelastung.

Tab. 30: Ertragsbildung bei Sommergerste im Jahr **1995** auf dem Standort **Reliehausen**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der Meßwiederholungen auf den Parzellen.

Belastungsstufe	Pflanzendichte	Ährendichte	EKM
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[mg]
	LBW		
0t	202	432	44,2
2x2,5t	204	440	45,5
2x5t	205	445	44,2
6x5t	190	400	42,5
	FMW		
0t	204	422	43,3
2x2,5t	183	480	42,4
2x5t	204	433	43,0
6x5t	197	414	44,0

Im weiteren Verlauf der Vegetation bildeten sich sowohl bei **LBW** als auch bei **FMW** auf dem hoch belasteten Boden weniger Ähren pro Flächeneinheit aus als bei den anderen Belastungsstufe. Die Meßwerte für EKM deuten an, daß die Kornfüllungsphase auf dem gepflügten Boden durch die hohe mechanische Bodenbelastung negativ beeinflußt wurde. Bei **FMW** scheint die Bodenbelastung keinen Einfluß auf die EKM gehabt zu haben. Auffällig ist die Variante **FMW 2x2,5t**. Trotz der geringeren Bodenbelastung lag die EKM unter dem Wert bei **FMW 6x5t**.

Im Versuchsjahr **1996** wurde bei **LBW** eine Zunahme der Pflanzendichte mit steigender Bodenbelastung beobachtet (Tab. 31).

Tab. 31: Ertragsbildung bei Winterweizen im Jahr **1996** auf dem Standort **Rellehausen**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der Meßwiederholungen auf den Parzellen.

Belastungsstufe	Pflanzendichte	Ährendichte	EKM
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[mg]
	LBW		
0t	204	370	37,2
2x2,5t	221	411	36,0
2x5t	238	292	32,2
6x5t	238	382	31,0
	FMW		
0t	280	409	41,2
2x2,5t	263	515	41,6
2x5t	255	408	37,2
6x5t	255	447	40,7

Die Pflanzendichte auf gepflügtem Boden lag bei hoher Belastung gegenüber der Kontrolle (**LBW 0t**) um 17% höher (Tab. 31). Auf dem **flach** bearbeiteten Boden stellte sich die Pflanzendichte anders dar: Mit steigender Bodenbelastung nahm die Anzahl Pflanzen pro Flächeneinheit ab. Die hohe Bodenbelastung führte zu einer Reduktion der Pflanzendichte um ca. 10%. Insgesamt lag die Pflanzendichte höher als bei **LBW** (Tab. 31).

Auf dem gepflügten Boden hatte die Belastung kaum einen Einfluß auf die Ährendichte, wohl aber auf die EKM. Mit steigender Bodenbelastung nahm die EKM erheblich ab. Bei **FMW** deutete sich eine reduzierende Auswirkung der Belastung auf die Ährendichte und die EKM nicht an (Tab. 31).

Bei einem Vergleich der Bearbeitungssysteme - gemittelt über die Belastungsstufen - zeigte sich eine bemerkenswerte Entwicklung: Die Ausprägung des Bestandes schien von der Pflanzendichte bis hin zur EKM auf dem **flach** bearbeiteten Boden wesentlich günstiger verlaufen zu sein als auf dem gepflügten Boden.

Im dritten Versuchsjahr wurde auf Grund des hohen Arbeits- und Zeitaufwandes auf die Erfassung der Ertragsbildung an diesem Standort verzichtet.

4.3.2.2 Ertrag

Im ersten Versuchsjahr konnte bei **LBW** eine tendenzielle Abnahme des Kornertrages der Sommergerste bei steigender Bodenbelastung festgestellt werden (Abb. 49 oben links). Die Differenz zwischen **LBW 0t** und **LBW 6x5t** betrug rund 55 %. Bei **FMW** (Abb. 49 oben rechts) lag der Kornertrag der Stufen **0t** und **2x2,5t** auf gleichem Niveau. Durch die mechanische Bodenbelastung wurde der Kornertrag bei mittlerer Belastung um ca. 40 % und bei hoher Belastung um ca. 12 % reduziert.

So wie der Kornertrag auf dem gepflügten Boden, so wies auch der Ernteindex (Tab. 32) bei **LBW** mit steigender Bodenbelastung fallende Werte auf. Bei **FMW** spiegelte sich der auffallend geringe Kornertrag der Stufe **2x5t** im Ernteindex wider: Im Vergleich zu den anderen Belastungsstufen wurden weniger Assimilate im Korn als in andere Organe eingelagert. Im zweiten Versuchsjahr zeigte der Kornertrag des Winterweizens bei **LBW** von 0t nach 2x2,5t einen geringen Anstieg. Bei mittlerer und hoher Belastung fielen die Kornerträge unter das Niveau der unbelasteten Parzelle. Bei **FMW** lagen die Erträge der Belastungsstufen **0t**, **2x2,5t** und **2x5t** auf einer Höhe. Dagegen war auf dem hoch belasteten Boden der Kornertrag verglichen mit der Kontrolle (**0t**) um 13% geringer. Gemittelt über die Belastungsstufen erwies sich der **flach** bearbeitet und gemulchte Boden als erheblich ertragreicher: Der mittlere Kornertrag bei **FMW** lag um 56 % höher als bei **LBW** (Abb.49 mitte).

Der Ernteindex **1996** deutete an, daß bei beiden Bearbeitungssystemen mit steigender Bodenbelastung weniger Assimilate in das Korn als in andere Pflanzenteile eingelagert wurden (Tab. 32).

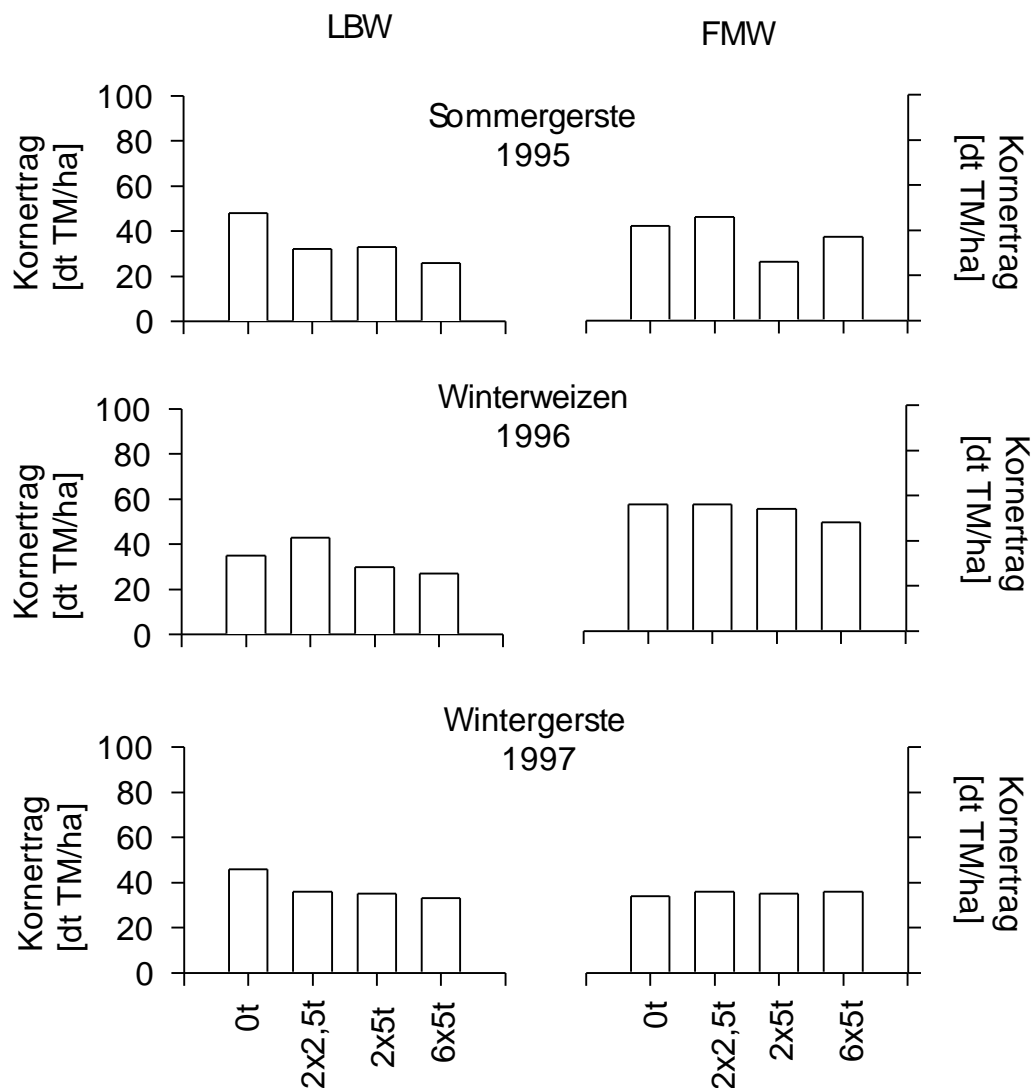


Abb. 49: Kornertrag in den drei Versuchsjahren auf dem Standort **Reliehau-**
sen. Dargestellt sind die Meßergebnisse von Mischproben.

Im dritten Versuchsjahr lag der Ertrag der Wintergerste bei **LBW 0t** um ca. 25% über dem Kornertrag der anderen sieben Varianten (Abb. 49 unten links). Wie Tab.32 zeigt, lagen die Ernteindizes bei **FMW** bemerkenswert unter denen von **LBW**. Bei gleichem Kornertrag bildeten die Pflanzen bei **FMW** beträchtlich mehr Stroh.

Tab. 32: Ernteindex bei Sommergerste (SG) **1995**, Winterweizen (WW) **1996** und Wintergerste (WG) **1997** auf dem Standort **Rellehausen**.

Kulturpflanze/ Jahr	Bearbeitungs- system	Ernteindex			
		Belastungsstufe			
		0t	2x2,5t	2x5t	6x5t
SG/1995	LBW	0,57	0,54	0,52	0,52
	FMW	0,56	0,55	0,47	0,54
WW/1996	LBW	0,41	0,41	0,36	0,36
	FMW	0,44	0,44	0,41	0,42
WG/1997	LBW	0,46	0,41	0,40	0,47
	FMW	0,33	0,35	0,37	0,35

4.3.3 Standort **Großobringen**

4.3.3.1 Ertragsbildung

Auf dem Standort **Großobringen** lag im ersten Versuchsjahr die Pflanzendichte der Sommergerste vor dem Bestocken bei **LBW tief** mit geringer und mittlerer Belastung, sowie bei **LBW flach** mit den ersten drei Belastungsstufen auf gleichem Niveau (Tab. 33). Die Pflanzendichte bei **LBW tief** mit keiner und hoher Bodenbelastung lag deutlich unter dem Wert der anderen Varianten. **LBW flach 6x5t** nahm eine mittlere Stellung ein. Bei der Ährendichte war auf dem **tief** gepflügten Boden mit steigender Bodenbelastung eine merkliche Reduktion zu erkennen. So wie bei **LBW tief**, so wurde auch bei **LBW flach** die Ährendichte mit steigender Belastung reduziert. Bei **flach** bearbeitetem Boden stellte sich die Reduktion des Kennwertes bei geringer Bodenbelastung stärker dar als bei hoher Belastung.

Bei **LBW tief** mit keiner und geringer Belastung führte die Entwicklung der Getreidepflanzen zu einer geringfügig höheren EKM als bei mittlerer und hoher Belastung. Auf dem **flach** bearbeiteten Boden lag die EKM bei hoher Bodenbelastung unter der EKM der anderen Varianten dieses Bearbeitungssystems.

Tab. 33: Ertragsbildung der Sommergerste im Jahr **1995** auf dem Standort **Großobringen**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der Meßwiederholungen auf den Parzellen.

Belastungsstufe	Pflanzendichte	Ährendichte	EKM
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[mg]
	LBW tief		
0t	397	473	38,5
2x2,5t	465	455	39,0
2x5t	453	449	37,8
6x5t	398	433	37,4
	LBW flach		
0t	452	481	36,4
2x2,5t	434	428	39,3
2x5t	432	451	38,6
6x5t	412	441	32,8

Die Ertragsbildung des zweiten Versuchsjahres faßt Tab. 34 zusammen. Auf dem **tief** gepflügten Boden nahm die Pflanzendichte von **0t** nach **2x2,5t** um 20 % zu. Bei mittlerer und hoher Bodenbelastung bildeten sich 9 % mehr Pflanzen pro Flächeneinheit als bei der Kontrolle (**LBW tief 0t**). Auf dem **flach** gepflügten Boden fiel die Pflanzendichte im Vergleich zur Kontrolle (**LBW flach 0t**) bei geringer und mittlere Bodenbelastung um rund 17 % ab. Bei hoher Belastung lag die Pflanzendichte 17,5 % über der Pflanzendichte auf dem Boden ohne Belastung.

Bei beiden Bearbeitungssystemen deuteten die Meßwerte darauf hin, daß sich bei hoher Bodenbelastung eine höhere Ährendichte ausbilden konnte als bei den geringeren Belastungsstufen. Auf dem **flach** bearbeiteten Boden mit mittlerer Belastung schienen die Bedingungen für eine hohe Ährendichte günstiger gewesen zu sein als bei einer hohen Belastung. Bei **LBW tief** führte das Wachstum der Pflanze bei hoher Bodenbelastung nicht nur zu einer höheren Ährendichte, sondern auch zu einem höheren Kornbesatz der Ähren. Bei flacher Bodenbearbeitung lag die Anzahl Körner pro Ähre bei geringer und hoher Bodenbelastung deutlich unter den Werte der Kontrollparzelle (**LBW flach 0t**).

Bemerkenswert ist die Entwicklung bei mittlerer Belastung: Bei dieser Variante entwickelten sich pro Ähre ebensoviel Körner wie auf dem Boden mit keiner Belastung.

Die EKM bei tiefer Bodenbearbeitung deutete eine geringfügige Abnahme des Korngewichts mit steigender Bodenbelastung an. Bei **LBW flach** lagen die Werte aller Belastungsstufen auf einem Niveau. Allein die mittlere Belastungsstufe wies eine merklich höhere EKM auf.

Tab. 34: Ertragsbildung bei Winterweizen im Jahr **1996** auf dem Standort **Großbringen**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der Meßwiederholungen auf den Parzellen.

Belastungs- stufe	Pflanzen- dichte	Ähren- dichte	Kornbesatz der Ähre	EKM	Kornertrag berechnet
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[Körner/Ähre]	[mg]	[dt TM/ha]
	LBW tief				
0t	280	472	36	39,2	66,6
2x2,5t	336	447	37	35,2	58,2
2x5t	304	472	36	38,5	65,4
6x5t	304	516	40	38,2	78,8
	LBW flach				
0t	320	343	44	37,4	56,4
2x2,5t	264	374	39	37,5	54,7
2x5t	272	427	44	39,1	73,5
6x5t	376	407	38	37,0	57,2

Die Pflanzendichte der Wintergerste im dritten Versuchsjahr (Tab. 35) lag auf dem tief bearbeiteten Boden mit geringer und mittlerer Belastung erheblich höher als bei keiner und hoher Belastung. Bei flacher Bodenbearbeitung war eine merkliche Abnahme der Pflanzendichte mit steigender Bodenbelastung festzustellen. Sowohl bei **LBW tief** als auch bei **LBW flach** deutete sich mit steigender Belastung eine Reduktion der Ährendichte an. Auf **LBW tief** bei der Anzahl Körner pro Ähre kehrte sich diese Tendenz um: Die hohe Belastungsstufe wies einen deutlich höheren Wert auf als die anderen Varianten. Auf dem **flach** be-

arbeiteten Boden bildeten sich bei keiner und geringer Belastung beträchtlich mehr Körner pro Ähre als bei mittlerer und hoher Bodenbelastung.

Verglichen mit **2x5t** und **6x5t** konnte bei **LBW tief 0t** und **2x2,5t** eine geringfügig höhere EKM festgestellt werden. Bei **LBW flach** lag das Korngewicht bei **0t** und **6x5t** auf einem tieferen Niveau als bei den Stufen **2x2,5t** und **2x5t**.

Tab. 35: Ertragsbildung bei Wintergerste im Jahr **1997** auf dem Standort **Großobringen**. EKM bezeichnet die Einzelkornmasse. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der Meßwiederholungen auf den Parzellen.

Belastungs- stufe	Pflanzen- dichte	Ähren- dichte	Kornbesatz der Ähre	EKM	Kornertrag berechnet
	[Pflanzen/m ²]	[Ähren/m ²]	[Körner/Ähre]	[mg]	[dt TM/ha]
LBW tief					
0t	397	473	34	38,5	61,9
2x2,5t	465	455	31	39,0	55,0
2x5t	453	449	32	37,8	54,3
6x5t	398	433	37	37,4	59,9
LBW flach					
0t	452	481	39	36,4	68,3
2x2,5t	434	428	38	39,3	64,0
2x5t	432	451	29	38,6	50,5
6x5t	412	441	32	32,8	46,3

4.3.3.2 Ertrag

Im Jahr **1995** zeigte sich bei beiden Bearbeitungssystemen eine kennzeichnende Tendenz: mit steigender Bodenbelastung fiel der Kornertrag der Sommergerste stark ab (Abb. 50 mitte). Das Ausmaß der Reduktion und das Niveau des Ertrages bei den einzelnen Belastungsstufen stellte sich bei tiefer und flacher Bodenbearbeitung gleich dar. Wie der Ernteindex **1995** in Tab. 36 andeutet, verlief die Einlagerung von Assimilaten in das Korn bei allen Varianten ähnlich. Auffällig ist die Variante **LBW flach 6x5t**. Hier wurde ein deutlich geringerer Index ermittelt.

Im zweiten Versuchsjahr mit Winterweizen deutete sich bei **LBW tief** und **LBW flach** eine geringe Zunahme des Kornertrages mit steigender Bodenbelastung an (Abb. 50 oben). Bei einem Vergleich der Faktoren stellte sich bei **LBW tief** der Kornertrag als geringfügig höher dar als der Ertrag bei **LBW flach**. Innerhalb der Faktoren konnte bei tiefer Bodenbearbeitung eine Abnahme des Ernteindexes mit steigender Bodenbelastung festgestellt werden (Tab. 36). Bei flacher Bearbeitung lag der Ernteindex auf einem Niveau. So wie die Erträge, so liegen auch die Ernteindizes bei **LBW tief** etwas höher als bei **LBW flach**.

Mit steigender Bodenbelastung nahm im dritten Versuchsjahr bei beiden Systemen der Kornertrag der Wintergerste von **0t** nach **6x5t** um ca. 15 % ab (Abb. 50 unten). Wie Tab. 36 zeigt, lagen die Ernteindizes aller Varianten auf einem Niveau.

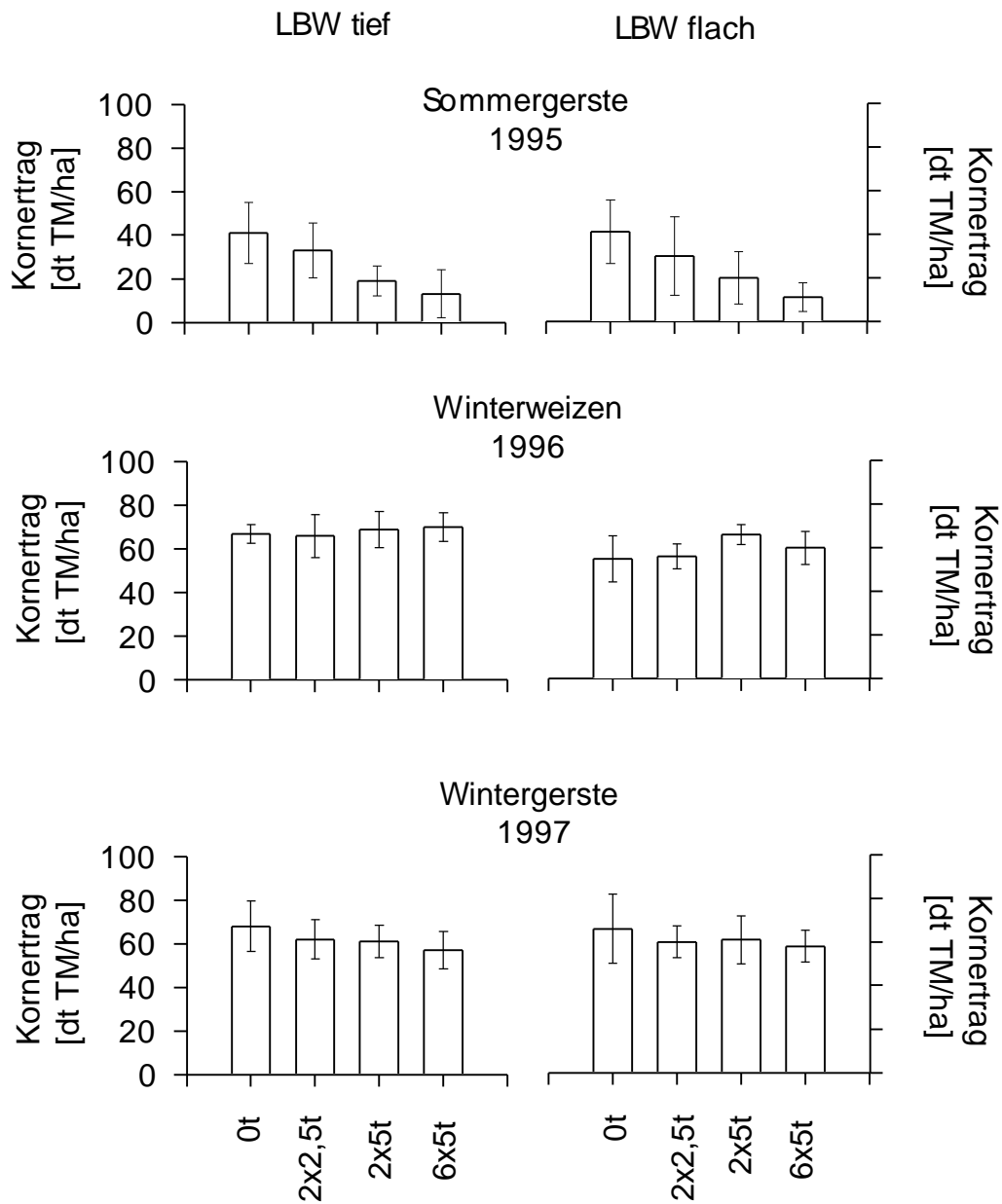


Abb. 50: Kornertrag der drei Versuchsjahre auf dem Standort **Großbringen**. Senkrechte Striche kennzeichnen den 95% Vertrauensbereich.

Tab. 36: Ernteindex bei Sommergerste (SG) **1995**, Winterweizen (WW) **1996** und Wintergerste (WG) **1997** auf dem Standort **Großbringen**.

Kulturpflanze/ Jahr	Bearbei- tungs- system	Ernteindex			
		Belastungsstufe			
		0t	2x2,5t	2x5t	6x5t
SG/1995	LBW	0,59	0,56	0,56	0,59
	FMW	0,59	0,56	0,59	0,52
WW/1996	LBW	0,48	0,46	0,45	0,45
	FMW	0,42	0,43	0,44	0,43
WG/1997	LBW	0,57	0,57	0,59	0,59
	FMW	0,57	0,59	0,60	0,57

5 Diskussion

Die in den letzten Jahrzehnten stark angestiegene mechanische Belastung der Ackerböden durch zunehmend hohe Achslasten hat die Gefahr einer Unterbodenschädigung ansteigen lassen. Dies gilt vor allem für Böden mit Lockerbodenwirtschaft (**LBW**) bei hohem Wassergehalt. Bodenbearbeitungssysteme wie die Festboden- Mulchwirtschaft (**FMW**), bei der zugunsten einer flachen Lockerung auf eine tief-wendende Bearbeitung verzichtet wird, können sich – im Vergleich zu gepflügten Böden - durch eine geringere Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung und ein höheres Regenerationsvermögen nach einer starken Belastung auszeichnen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Entwicklung von Böden mit **FMW** und **LBW** nach einer einmaligen mechanische Belastung über drei Jahre untersucht. Das Wachstum und der Ertrag von Sommergerste, Winterweizen und Wintergerste dienten als Indikator für belastungsabhängige Gefügeveränderungen durch die Belastung und über die Zeit.

In der Diskussion wird zunächst auf die Auswirkung des Bearbeitungssystems und der mechanischen Bodenbelastung auf bodenphysikalische Eigenschaften und auf die Bestandesentwicklung eingegangen. Abschließend werden aus den Erkenntnissen mögliche Konsequenzen für die pflanzenbauliche Praxis abgeleitet. In Übereinstimmung mit SOMMER et al. (1981) werden die Auswirkungen der mechanischen Belastung im ersten Versuchsjahr als Direktwirkung und in den Folgejahren als Nachwirkung bezeichnet.

5.1 Auswirkungen des Bearbeitungssystems und der mechanischen Bodenbelastung auf bodenphysikalische Eigenschaften

5.1.1 Eindringwiderstand

Der Widerstand, den ein Boden einer eindringenden Metallsonde entgegenbringt, beruht auf seiner mechanischen Festigkeit, auf der Verschiebbarkeit der Bodenteilchen. EHLERS et al. (1983a) konnten auf einer Parabraunerde aus Löß mit ca. 15 % Tonanteil nachweisen, daß zunehmende Bodenfestigkeit – gemessen als EDW – reduzierend auf das Wurzelwachstum wirkte. Für diesen Zusammenhang war der Bodenwassergehalt mit seiner Wirkung auf die Scherprozesse im Boden von großer Bedeutung. Der EDW soll in der vorliegenden

Arbeit dazu dienen, Durchwurzelungswiderstände im Boden qualitativ zu erfassen.

Durch den Wendepflug werden im Bearbeitungshorizont kompakte, große Gefügeeinheiten aufgebrochen und als kleinere Gefügeelemente in lockerer Packung abgelegt. Der damit einhergehende starke Anstieg des Grobporenanteils führt zu einer Abnahme der Bodenfestigkeit und damit zu einem geringeren Widerstand des Bodens gegenüber der Verformung durch eine Metallsonde (COOTE & RAMSEY 1983). Die Wirkung des Wendepfluges führte bei der Variante **LBW 0t** im Bearbeitungshorizont (0-25 cm Bodentiefe) auf den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen** zu einem EDW von ca. 1,3 MPa (Abb. 7, 8 links). Auf einer Pseudogley Parabraunerde stellte FENNER (1995) im Bearbeitungshorizont des Wendepfluges bei einer Bodenfeuchte nahe der Feldkapazität (FK) einen EDW von ca. 0,6 MPa fest. Bei TEIWES (1988) wies der Bearbeitungshorizont einer Parabraunerde bei Pflugwirtschaft nahe der FK einen EDW von ca. 1,0 MPa auf. Unterhalb des Bearbeitungshorizontes, bei fehlender mechanischer Lockerung, war der EDW des Bodens bei **LBW** auf beiden Standorten deutlich höher als im Bearbeitungshorizont.

Auf dem Standort **Reinshof** wurden bei der Variante **LBW 0t** unterhalb des Bearbeitungshorizontes in der Krumbasis - über die Versuchsjahre - Maximalwerte des EDW von ca. 2,5 - 3,0 MPa gemessen. Auf dem Standort **Rellehausen** lagen die Maximalwerte dagegen höher bei 3,0 - 4,0 MPa. TEIWES (1988) und FENNER (1995) berichten von EDW in der Krumbasis gepflügter Böden zwischen 3,0 und 6,0 MPa. Unterhalb der Verdichtungs- oder Verformungszone in der Krumbasis nahm der EDW auf beiden Standorten bei der Variante **LBW 0t**, gemittelt über die Versuchsjahre, geringfügig ab. Dies entspricht den Erkenntnissen von TEIWES (1988) und FENNER (1995) auf Böden unter Pflug.

Die hohe Bodenbelastung führte im ersten Versuchsjahr auf dem gepflügten Boden des Standortes **Reinshof** zu einem drastischen Anstieg des EDW in Ober- und Unterboden. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den Untersuchungen von DANNOWSKI (1995): Auf einer Parabraunerde aus Geschiebemergel und Geschiebelehm mit ca. 7% Tonanteil führte eine mechanische Bodenbelastung mit 100 kPa Kontaktflächendruck zu einer Zunahme des EDW von ca. 2,0 auf 4,0 MPa in der Pflugsohle. Auch STEWART & VYN (1994) berichteten von einem Anstieg des EDW in der Bodenschicht 12-35 cm bei einer Belastung

mit 6t Radlast auf gepflügtem Boden. Ihre Untersuchungen fanden auf einer Tschernosem-Parabraunerde mit einem Tonanteil von ca. 24% statt. Am Beispiel des Standortes **Reinshof** zeigt Abb. 51 die Beziehung von Lagerungsdichte und EDW in der Krumbasis: In der Tendenz nahm bei **LBW** und **FMW** in den drei Versuchsjahren mit zunehmender Bodenbelastung die Lagerungsdichte und der EDW zu. Die steigende mechanische Belastung führte zu einer zunehmenden Erhöhung der Festigkeit und damit des Widerstandes des Bodens gegen eine Verformung.

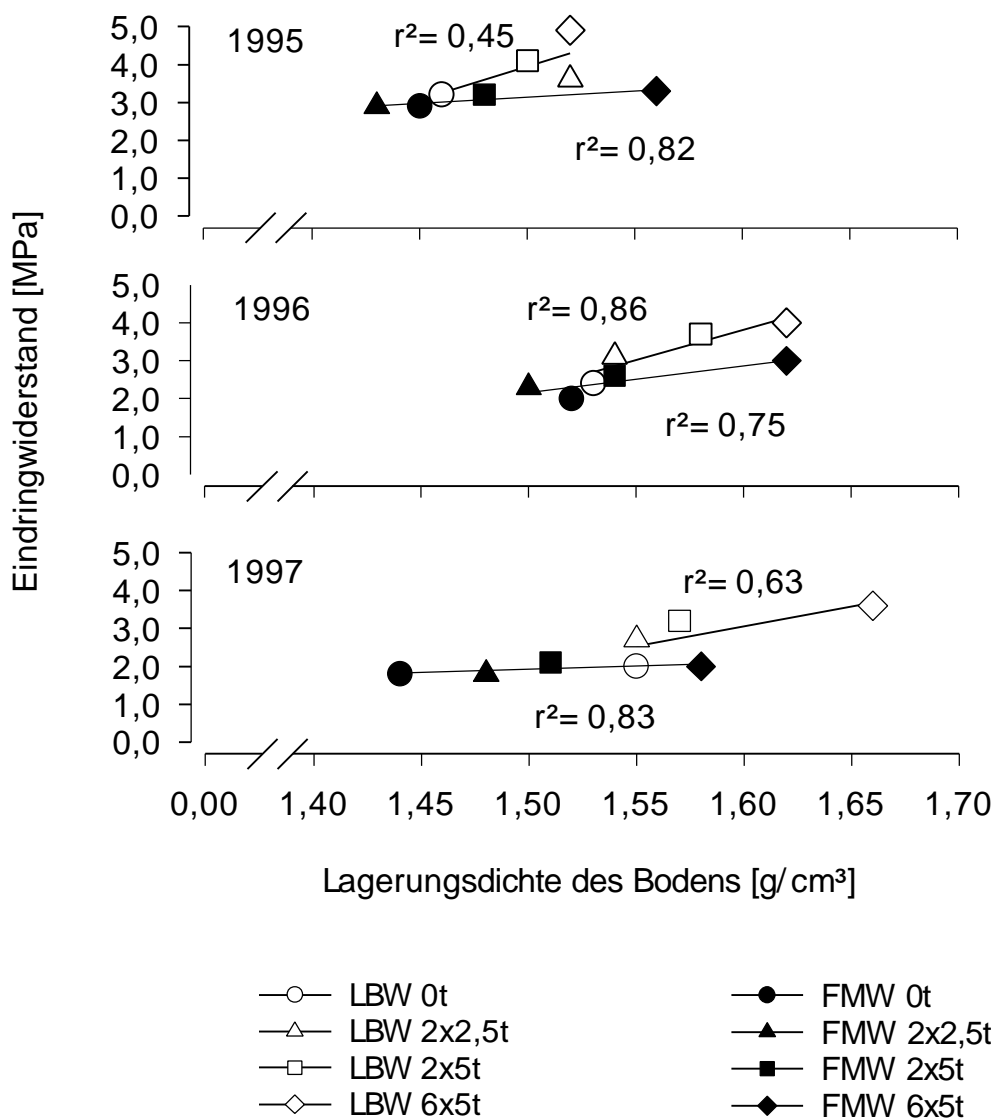


Abb. 51: Beziehung zwischen der Lagerungsdichte des Bodens und dem Eindringwiderstand (EDW) in der Bodentiefe 30-35 cm auf den Standort **Reinshof**. Die Daten zur Lagerungsdichte wurden nach Angaben der TLL, Jena zusammengestellt.

Der Verlauf der EDW-Tiefenfunktionen bei **LBW** zeigt auf den Standorten **Reinshof** (Abb. 7 links) und **Reliehausen** (Abb. 8 links) die „Dauerhaftigkeit“ der Erhöhung des mechanischen Widerstandes in der Krumbasis: Nach der mechanischen Bodenbelastung konnte kaum eine Abnahme des EDW in der Krumbasis um 30 cm Bodentiefe festgestellt werden. Der durch die Nachwirkung der mechanischen Belastung langfristig erhöhte mechanische Widerstand in der Krumbasis gepflügter Böden entspricht den Erkenntnissen von SCHJØNNING & RASMUSSEN (1994), ETANA & HÅKANSSON (1994) UND ARVIDSSON & HÅKANSSON (1996).

Auf dem Boden mit **FMW** ohne zusätzliche Belastung zeigte der EDW auf dem Standort **Reinshof** unterhalb des Bearbeitungshorizontes, gemittelt über die Versuchsjahre, eine kontinuierliche Zunahme bei steigender Bodentiefe. In **Reliehausen** nahm der EDW bei FMW 0t unterhalb des Bearbeitungshorizontes bei zunehmender Bodentiefe geringfügig ab. Die gleichmäßige Veränderung von physikalischen Bodeneigenschaften ohne scharfe Brüche über das Bodenprofil scheint für reduziert bearbeitete Böden typisch zu sein (WENDROTH 1990, FENNER 1995, STOCKFISCH 1997). Durch die hohe Bodenbelastung nahm der EDW des Boden mit **FMW** beider Standorte nur in der Bodenschicht bis ca. 30 cm Bodentiefe zu. Unterhalb von 30 cm Bodentiefe änderte sich der EDW auch bei hoher Belastung kaum. Dieser Befund deutet darauf hin, daß bei **FMW** die hohe mechanische Belastung nur in den oberen Bodenschichten wirksam war. Verglichen mit dem gepflügten Boden war die „Tiefenwirksamkeit“ der mechanischen Belastung - gemessen am EDW – bei **FMW** wesentlich geringer. Die Beobachtung einer größeren Unempfindlichkeit von reduziert bearbeiteten Böden gegenüber mechanischer Belastung verglichen mit gepflügten Böden bestätigt die Erkenntnisse von BAEUMER & PAPE (1972) sowie die Befunde von HILL & MEZA-MONTALVO (1990), EHLERS & CLAUPEIN (1994) und GRUBER (1994). Untersuchungen von WIERMANN (1998) auf dem Standort **Reinshof** zeigten, daß der Boden mit **FMW** im Vergleich zum gepflügten Boden unterhalb des Bearbeitungshorizontes eine mechanisch stabilere Aggregatstruktur hatte und deshalb ein höheres Kompensationsvermögen gegenüber mechanischer Belastung aufwies.

Die EDW- Tiefenfunktionen des Standortes **Reinshof** zeigen, daß der mechanische Widerstand des Bodens unter 40 cm Bodentiefe auf dem Boden mit **LBW** und **FMW** bei allen Belastungsstufen (**2x2,5t** und **2x5t** sind nicht dargestellt) von **1995** bis **1997** kontinuierlich abgenommen hatte. Auffällig ist, daß die Reduktion des EDW über die Versuchsjahre bei beiden Bearbeitungssystemen und bei allen Belastungsstufen stattfand. Im folgenden sollen mögliche Gründe hierfür erörtert werden: Die Messungen des EDW wurden **1995** mit einem Penetrographen mit mechanischer Druckaufnahme durchgeführt. Möglicherweise wurde ein Teil der inneren Reibung des Gerätes erfaßt und führte **1995** zu einer Überschätzung des EDW bei allen Varianten. Trifft diese Vermutung zu, kann die Reduktion des EDW bei allen Varianten von **1995** nach **1996** ganz oder teilweise auf diesen systematischen Meßfehler zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse von EHLERS et al. (1983a) und VOORHEES (1983) belegen die große Bedeutung des Bodenwassergehaltes bei der Ausprägung des mechanischen Widerstandes eines Bodens: Die Autoren zeigten auf, daß bei gleichbleibender Lagerungsdichte und einer Zunahme des Bodenwassergehaltes ein Absinken des EDW festzustellen ist. Dies kann nicht der Grund für die Reduktion des EDW von **1995** nach **1996** sein, da die Probenahmen in beiden Jahren bei annähernd gleichem Wassergehalt der Böden stattfanden. Möglicherweise führte aber der geringfügig höhere Bodenwassergehalt zur Probenahme **1997** - verglichen mit **1996** - zu einer Reduktion des EDW in der Bodenschicht unter 40 cm.

Eine weitere Ursache für die Reduktion des mechanischen Widerstandes eines Bodens kann die Veränderung der Porengeometrie durch Frosteinwirkung sein: Gefrierendes Bodenwasser bildet Eislinsen und führt zu Frostsprengung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1984). Wie Abb. 52 zeigt, wurde weder im Winter **1995/96** noch im darauffolgenden Winter **1996/97** Bodenfrost in 50 cm Bodentiefe aufgezeichnet. Eine Reduktion des EDW unterhalb von 50 cm Bodentiefe durch Frosteinwirkung kann daher ausgeschlossen werden. Eine mögliche Frostwirkung in 20 cm Bodentiefe (Abb. 52 oben) wird bei **LBW** und **FMW** im Bearbeitungshorizont durch die Bodenbearbeitung überlagert.

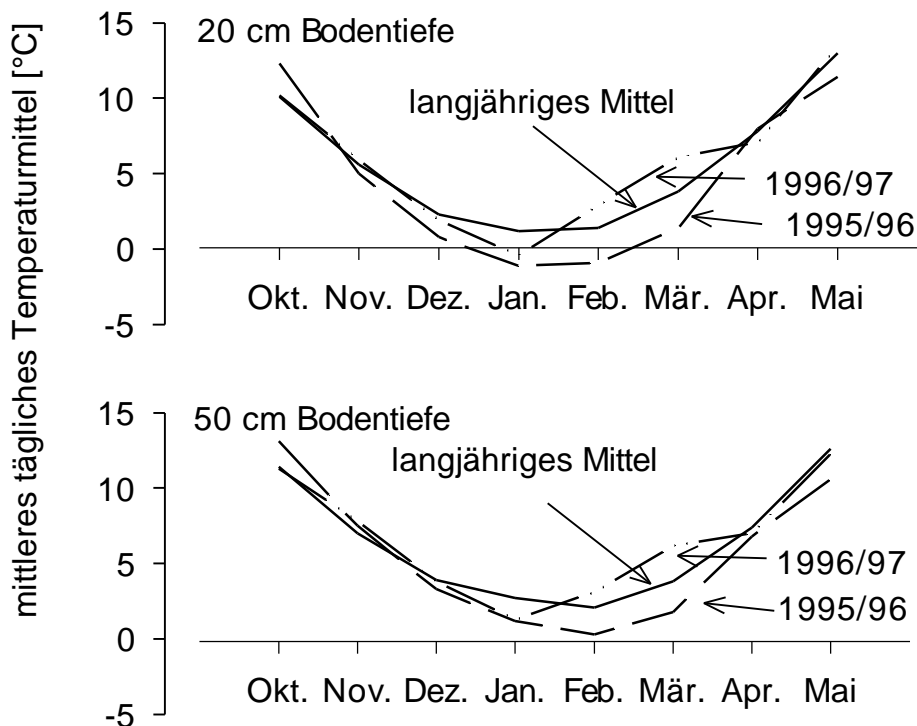


Abb. 52: Bodentemperatur in zwei Bodentiefen, gemessen an der Wetterstation Göttingen. Die Daten wurden zusammengestellt nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes.

So wie in **Reinshof** (Abb. 7), so scheint auch in **Rellehausen** (Abb. 8) der EDW bei allen Varianten von **1996** nach **1997** abzunehmen. Möglicherweise ist auch auf dem Standort **Rellehausen** der geringere EDW **1997** mit einem höheren Wassergehalt des Bodens zur Probenahme zu erklären.

Wie schon bei den Arbeiten von VOORHEES (1983) und STEWART & VYN (1994) stellte sich der EDW des Bodens als ein empfindlicher Indikator für die Wirkung einer mechanischen Bodenbelastung dar. Der EDW erfaßt die mechanische Festigkeit, den mechanischen Widerstand des Bodens. Aus der Literatur (TAYLOR et al. 1966, COCKROFT et al. 1969, EHLERS et. al. 1983a und DANNOWSKI 1995) ist die enge Beziehung von Bodenfestigkeit und Wurzelwachstum bekannt. Setzt man - vereinfachend - die Bodenfestigkeit gemessen als EDW des Bodens mit dem Widerstand gleich, den eine Pflanzenwurzel erfährt, so zeigte sich **1995** auf dem gepflügten Boden des Standortes **Reinshof** mit hoher Belastung ein über das gesamte Profil stark erhöhter Durchwurzelungswiderstand. Das entspricht den Erkenntnissen von DANNOWSKI (1995). Die Pflugarbeit **1996** und **1997** reduzierte den EDW in der Krume zwar erheblich. Im

Unterboden, vor allem aber in der Krumenbasis, blieb der hohe Durchwurzelungswiderstand jedoch über die Versuchsjahre erhalten. Auf beiden Standorten wurde bei **FMW** eine Erhöhung des EDW – hervorgerufen durch mechanische Belastung – nur in der obersten Bodenschicht (0-30 cm Bodentiefe) gemessen. Auf dem Standort **Großobringen** zeigte der EDW als Funktion der Tiefe keine kennzeichnenden Unterschiede zwischen den Varianten und den Versuchsjahren (Abb. 9). Verglichen mit den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen** zeichnet sich der Boden in **Großobringen** durch seinen hohen Tongehalt aus (Tab.7). WERNER (1996) weist darauf hin, daß die Tonpartikel des Bodens zur Probenahme (bei Frühjahrssättigung) möglicherweise vollständig von einer Wasserhülle umgeben waren. Der Boden war von der Metallsonde ohne deutlichen Reibungswiderstand zu durchdringen. Die Werte des EDW lagen über die gesamte Meßtiefe fast ausnahmslos zwischen 1,0 und 2,0 MPa (Abb. 9). Sowohl bei tiefer als auch bei flacher Bodenbearbeitung nahm die Lagerungsdichte des Bodens im ersten Versuchsjahr mit steigender Belastung zu (Tab. 47-49, Anhang). Dies deutete auf eine belastungsabhängige Gefügeveränderung hin, die nicht mit der Messung des EDW bei Frühjahrssättigung des Bodens erfaßt werden konnte.

5.1.2 Transportfunktionen

Ein leistungsfähiger Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre ist für die Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzel (HILLEL 1980) sowie für den Abtransport wachstumshemmender Stoffwechselprodukten (BERGMANN 1954) und toxisch wirkender Gase von großer Bedeutung (BAEHR 1987, THORSTENSON & POLLOCK 1989). Die Gasdiffusion im Boden findet fast ausschließlich im luftgefüllten Porenraum statt, da sich die wassergefüllten Poren durch einen wesentlich höheren Diffusionswiderstand auszeichnen. Kommt es infolge mechanischer Belastung zu einer Reduktion des luftführenden Porenraumes, kann der Gasaustausch zwischen Rhizosphäre und Atmosphäre und das Wurzelwachstum gehemmt werden. Die Porenraumgestaltung bedingt nicht nur die Gasdiffusion, sondern auch die Leitfähigkeit des Bodens für Wasser im ungesättigten Zustand. Vor allem die Grobporen und die Porenkontinuität spielen bei der Wasserleitung eine bedeutende Rolle (EHLERS & TEIWES 1987, TEIWES 1988). Wird das Volumen der groben Poren oder die Porenkontinuität reduziert, kann

eine drastische Reduktion der ungesättigten Wasserleitfähigkeit und damit eine Einschränkung der Wasserversorgung der Pflanzenwurzel die Folge sein (TEIWES 1988, FENNER 1995).

Auf den drei Standorten **Reinshof**, **Rellehausen** und **Großobringen** wurde auf den gepflügten Böden mit zunehmender mechanischer Bodenbelastung der Diffusionskoeffizient in der Bodenschicht 28-34 cm in der Krumenbasis deutlich eingeschränkt (Abb. 10-12 oben). Die Einschränkung der Diffusionskoeffizienten bei einer Wasserspannung von pF 2,0 ist – wie Abb. 53 am Beispiel **Reinshof** zeigt – eng korreliert mit der Zunahme des EDW des Bodens. Aus Abb. 51 (oben) geht hervor, daß die Zunahme des EDW mit der Zunahme der Lagerungsdichte verbunden war. Dies führt zu dem Schluß, daß die mechanische Belastung in der Bodenschicht 28-34 cm den Boden verfestigte und den Anteil grober Poren einschränkte (Tab. 41, Anhang). Die mit steigender Belastung zunehmende Porenverengung in der Krumenbasis führte zu einer Senkung der Diffusionskoeffizienten in dieser Bodenschicht. Die Befunde stehen in Einklang mit den Ergebnisse von CURRIE (1960), MCAFEE et al. (1989) und XU et al. (1992). In ihren Untersuchungen führte die mechanische Belastung von Böden unter Pflug ebenfalls zur Erhöhung der Lagerungsdichte, der Abnahme des Grobporenvolumens und zu einer Reduktion der Diffusionskoeffizienten.

Wie bei den Böden mit **LBW** zeigten sich auch bei den Böden mit **FMW** im ersten Versuchsjahr Gemeinsamkeiten der Standorte (Abb. 10,11 unten): Sowohl auf dem Standort **Reinshof**, als auch auf dem Standort **Rellehausen** konnte in der Tendenz bei steigender Bodenbelastung eine Zunahme der Lagerungsdichte bei gleichzeitiger Abnahme der Diffusionskoeffizienten bei pF 2,0 gemessen werden. Abb. 54 verdeutlicht die Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten bei pF 2,0 von der Belastungsstufe und dem Bearbeitungssystem: In **Reinshof** und **Rellehausen** lagen die Diffusionskoeffizienten auf dem flach bearbeiteten und gemulchten Boden bei steigender Belastung deutlich höher als auf dem gepflügten Boden. Dies läßt den Schluß zu, daß die Böden mit **FMW** auf beiden Standorten – unter dem Aspekt der Gasdiffusion – widerstandsfähiger gegen die mechanische Belastung waren als die Böden mit **LBW**.

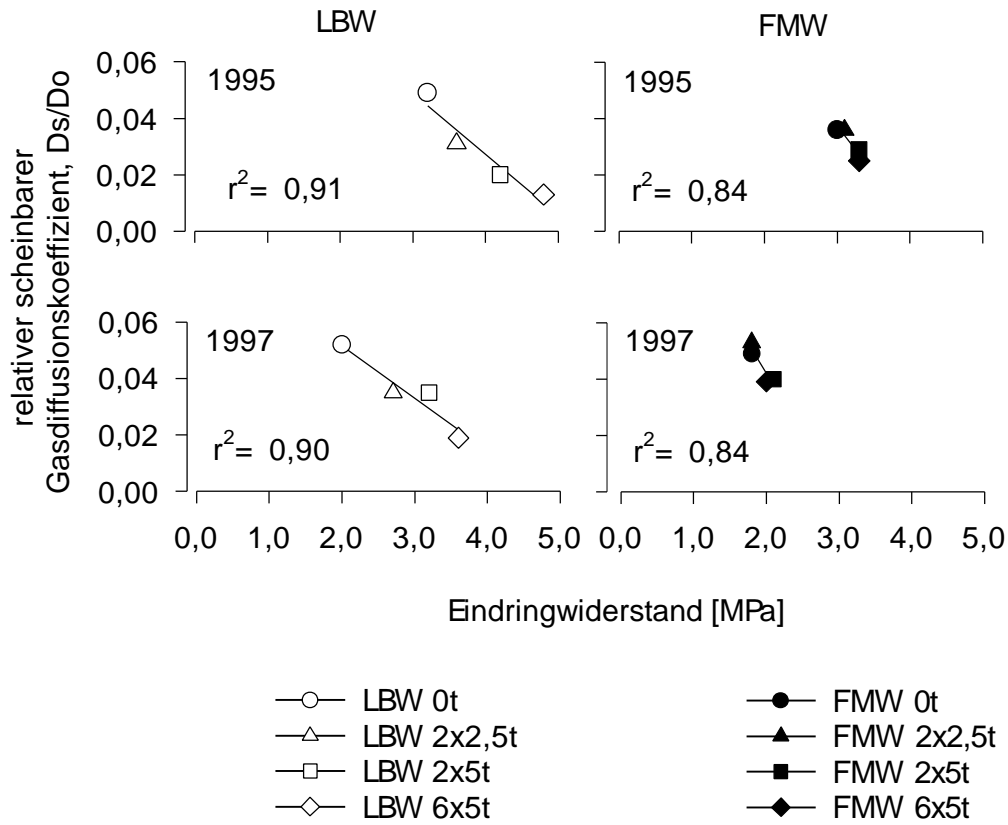


Abb. 53: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient bei einer Wasserspannung von pF 2,0 als Funktion des Eindringwiderstandes des Bodens in der Tiefe 28-34 cm auf dem Standort **Reinshof** in den Versuchsjahren **1995** und **1997**.

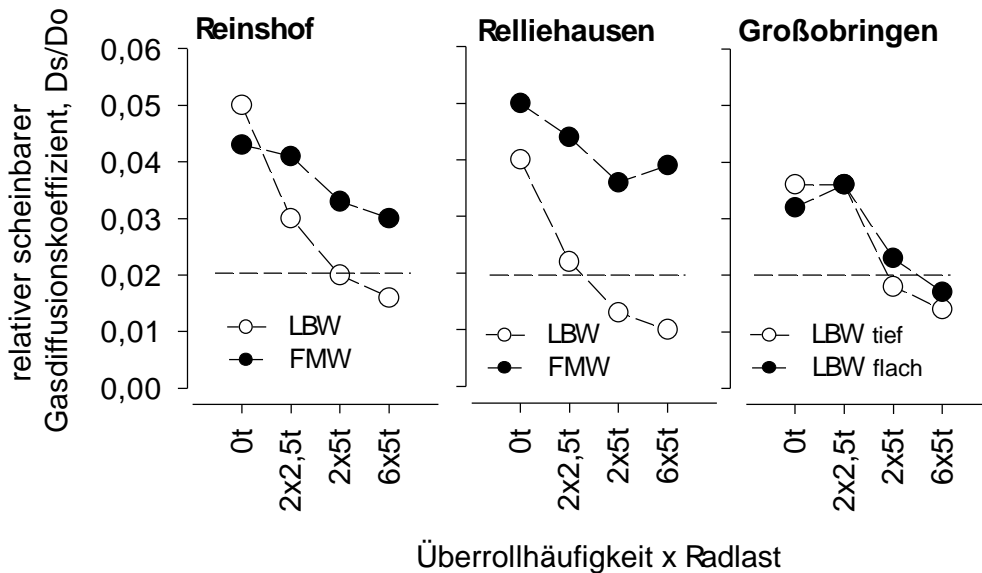


Abb. 54: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient bei einer Wasserspannung von pF 2,0 in der Bodentiefe 28-34 cm in Abhängigkeit von der Belastungsstufe im Versuchsjahr **1995**. Die gestrichelte, horizontale Hilfslinie markiert Ds/Do 0,02. Die Werte für Ds/Do wurden arithmetisch gemittelt.

Bei der Betrachtung der Diffusionskoeffizienten zeigten sich standorttypische Unterschiede:

Der Standort **Rellehausen** zeichnete sich besonders durch seine hohe Vorbelastung aus. Der hohe Gehalt des Bodens an grobem Schluff und feinem Sand in Verbindung mit dem geringen Tongehalt (Tab. 6) führte zusammen mit hoher mechanischer Belastung durch regelmäßigen Zuckerrübenanbau in Verbindung mit hohen Niederschlagsmengen zu einem Kohärentgefüge mit geringer Gefügestabilität (FENNER 1995). Im Vergleich dazu zeichnete sich der Boden in **Reinshof** durch eine hohe Gefügestabilität aus (WERNER 1998). Abb. 54 zeigt, daß der ohnehin schon niedrige Diffusionskoeffizient bei **LBW 0t** in **Rellehausen** mit steigender Bodenbelastung erheblich tiefer sinkt als auf gepflügtem Boden in **Reinshof**.

Auf dem Standort **Großobringen** wurden zwei unterschiedliche Bearbeitungstiefen des Systems **LBW** verglichen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Einschränkung der Diffusionskoeffizienten bei zunehmender mechanischer Belastung annähernd unabhängig von der Bearbeitungstiefe war (Abb. 54 rechts). Diese Befunde lassen in Übereinstimmung mit WIERMANN (1998) den Schluß zu, daß die reduzierte Bearbeitungstiefe bei wendender Bodenbearbeitung auf dem Standort **Großobringen** nicht zur Ausprägung eines „tragfähigeren“ Porensystems in der Bodenschicht 28-34 cm geführt hat.

Auf dem Standort **Reinshof** deutete sich bei gepflügtem Boden mit geringer, mittlerer und hoher Belastung eine Zunahme der Diffusionskoeffizienten bei pF 2,0 in 28-34 cm Bodentiefe von **1995** nach **1997** an (Abb. 55). Ebenso nahmen die Diffusionskoeffizienten bei **FMW** (alle Belastungsstufen) von **1995** nach **1997** zu (Abb. 55). Im Gegensatz zu **LBW** erreichten die Diffusionskoeffizienten bei **FMW** mit geringer, mittlerer und hoher Belastung das Niveau des unbelasteten Bodens. Diese Befunde deuten darauf hin, daß sich der Boden mit **FMW** im Vergleich zu **LBW** durch ein höheres Regenerationsvermögen auszeichnete. Der Grund für den Anstieg der Diffusionsrate kann bei beiden Systemen eine Zunahme des Diffusionsquerschnittes im wasserfreien Porenraum sein. Eine mechanische Lockerung kann nicht die Ursache sein, da bei beiden Bearbeitungssystemen die Untersuchungstiefe unterhalb des Bearbeitungshorizontes

lag. WERNER (1998) schließt eine Auflockerung der verdichteten und verformten Bodenmatrix aus, weist aber auf folgenden Zusammenhang hin: Je stabiler ein Porensystem vor einer mechanischen Belastung ist, um so mehr Bioporen können den Deformationsprozess als isolierte Porenblase überstehen. Nach der Belastung können diese Porenräume durch Wurzelwachstum oder Wurmgänge wieder verbunden werden und ein System mit hoher Kontinuität ausbilden. Es ist denkbar, daß die Belastung isolierte Porenräume verursachte, die von **1995** bis **1997** wieder in ein neu entstandenes Porensystem aus Bioporen eingegliedert werden konnten. Möglicherweise hat auf dem Standort **Reinshof** allein die Aktivität der grabenden Makrofauna und das Wachstum der Pflanzenwurzeln eine Gefüge- und Porenraumveränderung des belasteten Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm ausgelöst. Vor diesem Hintergrund erscheint das hohe Regenerationsvermögen bei **FMW** eng mit der intensiven Biodurchporung bei diesem Bearbeitungssystem verknüpft zu sein.

Wie Abb. 52 zeigt, war eine Neuorientierung von Bodenpartikeln in der Bodentiefe 28-34 cm durch Frosteinwirkung nicht oder nur in sehr geringem Umfang zu erwarten. Ein Einfluß des Wassers auf Gefüge und Porenraumgestaltung durch Quellung und Schrumpfung des Bodens kann auf Grund der geringe Änderung des Bodenwassergehaltes in der Bodentiefe unter 30 cm über den Versuchszeitraum wahrscheinlich ausgeschlossen werden. (Die Bodenwassergehalte sind nicht dargestellt.)

Wie aus den Abb. 14-16 hervorgeht, beeinträchtigte die hohe mechanische Belastung in **Reinshof** und **Reiliehhausen** bei **LBW** sowie in **Großobringen** bei **LBW tief** und **LBW flach** die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Meßbereich der Wasserspannung von 10 – ca. 50 hPa. Dies zeigt eine Einschränkung des groben Porenvolumens mit einem Äquivalentporendurchmesser von 60 bis 300 µm. Abb. 56 zeigt am Beispiel von **Reinshof** den eingeschränkten Beitrag der Poren mit einem Äquivalentdurchmesser von 60 bis 300 µm an der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bei hoher Belastung.

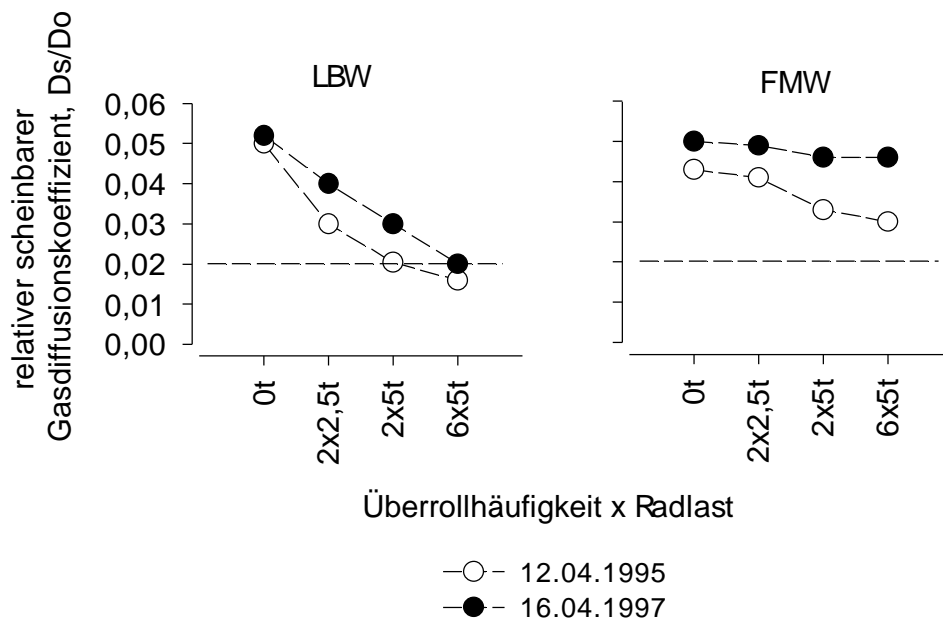


Abb. 55: Relativer scheinbarer Gasdiffusionskoeffizient bei einer Wasserspannung von pF 2,0 in der Bodentiefe 28-34 cm in Abhängigkeit von der Belastungsstufe in den Versuchsjahren **1995** und **1997** auf dem Standort **Reinshof**. Die gestrichelte, horizontale Hilfslinie markiert Ds/Do 0,02. Die Werte für Ds/Do wurden arithmetisch gemittelt.

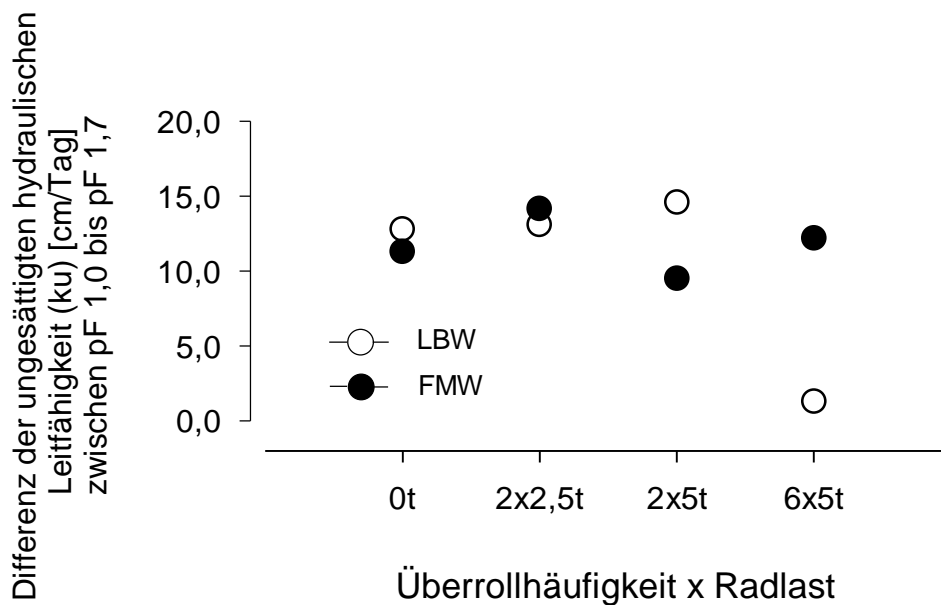


Abb. 56: Beitrag der Poren von 60 bis 300 μ m Äquivalentdurchmesser an der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsstufe auf dem Standort **Reinshof** in der Bodentiefe 28-34 cm am 12.04.1995. Dargestellt werden geometrische Mittelwerte.

Sowohl in **Reinshof** als auch in **Rellehausen** wurde bei **FMW** keine Beeinträchtigung der ungesättigten hydraulischen Wasserleitfähigkeit gemessen (Abb. 14, 15 unten). Dies zeigt, in Übereinstimmung mit den Untersuchungen der Diffusionskoeffizienten, eine geringere Empfindlichkeit der Böden mit **FMW** gegen mechanische Belastung.

➔ Auf den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen** wurde durch die steigende mechanische Belastung im ersten Versuchsjahr bei **LBW** und **FMW** die Lagerungsdichte des Bodens in der Bodenschicht 28-34 cm erhöht und der Porenraum eingeschränkt. Dies führte vor allem bei **LBW** zu einem Anstieg des Eindringwiderstandes und zu einer Abnahme der Diffusionskoeffizienten sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Bei **FMW** sanken die Diffusionskoeffizienten bei steigender Belastung in der Bodenschicht 28-34 cm deutlich weniger als bei **LBW**. Beeinträchtigungen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurde bei **FMW** nicht festgestellt. Bezogen auf die Transportfunktionen für Luft und Wasser stellte sich der Boden mit **FMW** als weniger empfindlich gegenüber mechanischer Belastung dar als der Boden mit **LBW**.

Die belastungsbedingte Erhöhung des mechanischen Widerstandes und die Beeinträchtigung des Gasaustausches wurden in **Reinshof** bei **LBW** auch im dritten Versuchsjahr gemessen.

In **Großobringen** reagierte der Boden bei **LBW** mit tiefer Bearbeitung so, wie der Boden mit flacher Bearbeitung: Bei zunehmender Belastung stieg die Lagerungsdichte, der Porenraum wurde verengt und die Transportfunktionen eingeschränkt.

5.2 Auswirkungen der Bearbeitungssysteme und der mechanischen Bodenbelastung auf die Bestandesentwicklung

5.2.1 Wurzelsystem

Als Direktwirkung führte die mechanische Belastung auf den drei Standorten in der Tendenz zu einem Anstieg der Lagerungsdichte in der Bodentiefe 30-36 cm. (Tab. 41,44, 47, Anhang). Dies gilt in besonderem Maße für die Böden mit

LBW. CZERATZKI (1972) wies darauf hin, daß bei einer Zunahme der Bodendichte das Wurzelwachstum durch die Erhöhung des mechanischen Widerstandes und die gleichzeitige Beeinträchtigung des Gasaustausches eingeschränkt wird. In Übereinstimmung mit diesen Befunden zeigt Abb. 53 einen Zusammenhang von EDW und Diffusionskoeffizienten: In **Reinshof 1995** fielen - vor allem bei **LBW** - in der Krumbasis die Diffusionskoeffizienten mit steigenden EDW stark ab. Aus Abb. 57 geht am Beispiel **Reinshof 1995** hervor, daß die Wurzelsysteme bei **LBW** vermutlich sowohl von steigenden EDW, als auch von eingeschränktem Gasaustausch bei steigender Bodenbelastung beeinträchtigt wurden.

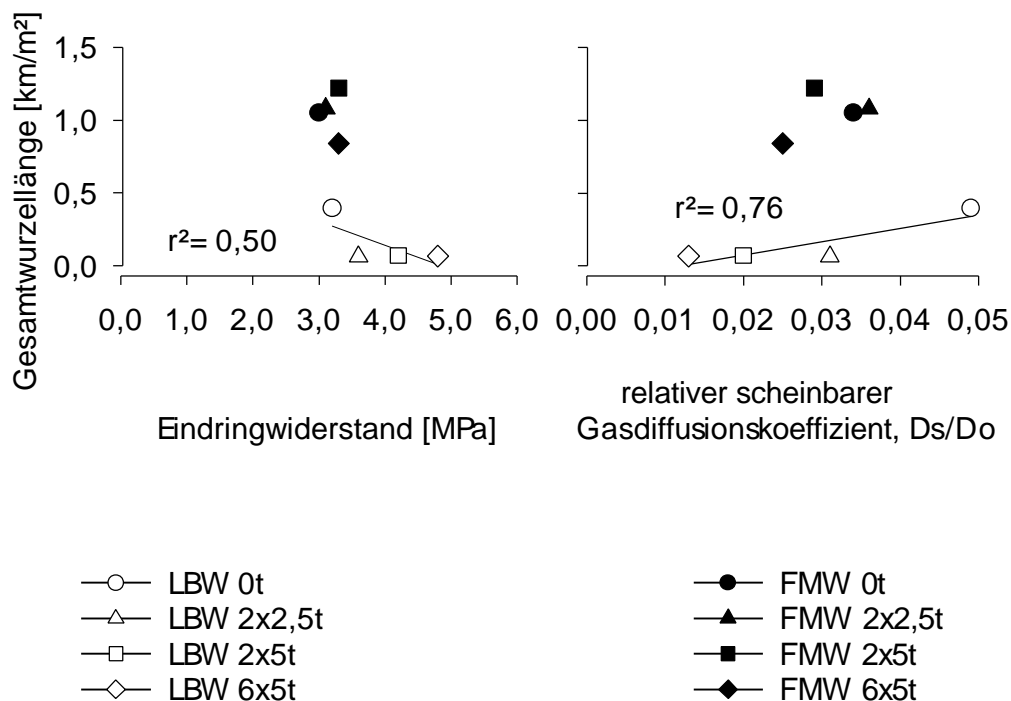


Abb. 57: Gesamtwurzellänge (GWL) unterhalb 35 cm Bodentiefe am 03.07.1995 als Funktion des Eindringwiderstandes in der Tiefe 30-35 cm am 04.04.1995 und des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten bei pF 2,0 in der Tiefe 28-34 cm am 12.04.1995 auf dem Standort **Reinshof**.

Die Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß **1995** auf dem Boden mit **LBW** die Krumbasis als Bodenschicht mit hohem EDW und eingeschränktem Gasaustausch vor allem bei den Belastungstufen gering, mittel und hoch als Durchwurzelungsbarriere wirksam wurde (Abb. 19, 21 links). Die mit zunehmender Bodenbelastung stark abnehmende Unterbodendurchwurzelung ist

wahrscheinlich sowohl auf die gemeinsame Wirkung von hohen mechanischen Bodenwiderständen und beeinträchtigtem Gasaustausch als auch auf die im Vergleich zu den FMW – Stufen geringere Oberbodendurchwurzelung (Abb. 19, 21) zurückzuführen: Die mit steigender Belastung stark reduzierte Oberbodendurchwurzelung bedingte wahrscheinlich eine geringe Durchwurzelung des Unterbodens.

Beeinträchtigungen des Wurzelwachstums, verursacht durch eine hohe Lagerungsdichte oder einen hohen mechanischen Widerstand des Bodens, wurden bereits mehrfach beobachtet: In Laborversuchen konnten RUSSEL & GOSS (1974) und Goss (1977) nachweisen, daß das Wurzellängenwachstum von Getreide in einem Substrat aus Glaskugeln bei optimaler Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen schon bei einer geringen Zunahme des mechanischen Widerstandes deutlich eingeschränkt wurde. Die Befunde legen den Schluß nahe, daß selbst bei optimaler Versorgung der Wurzel allein eine Zunahme des mechanischen Widerstandes als wachstumshemmender Faktor wirksam werden kann. ATWELL (1990) stellte bei Winterweizen in verdichtetem Boden ein verlangsamtes Wurzelwachstum fest, was zu einer unzureichenden Erschließung des Bodenprofils führte. In den Untersuchungen von LEHFELDT (1988) stellte sich bei Sommer- und Wintergerste eine negative Korrelation zwischen der Wurzellängendichte (WLD) und dem Grad der Bodenverdichtung dar.

Auf gepflügtem Boden ist beim Übergang vom Bearbeitungshorizont zum unbearbeiteten Unterboden auf Grund von Pflugsohlenverdichtungen in der Krumbasis häufig mit einer Behinderung des Wurzelwachstums zu rechnen (BARRACLOUGH & WEIR 1988, EHLERS et al. 1980/81, EHLERS 1983, EHLERS et al. 1986, ATWELL 1990, OUSSIBLE et al. 1992). Trifft eine Pflanzenwurzel auf eine Bodenschicht mit einer höheren Lagerungsdichte, einem reduzierten Grobporanteil und eingeschränkten Transportfunktionen, so wird sie in ihrem Wachstum behindert: Ist der Durchmesser der Poren zu gering, um ein Durchwachsen zu ermöglichen, muß die Wurzel durch ein verstärktes Dickenwachstum Bodenpartikel verdrängen (MATERECHERA et al. 1991, MATERECHERA et al. 1992). Bei einem solchen Wachstum mit starker Zunahme des Wurzelquerschnittes kann das Längenwachstum eingeschränkt sein (BARLEY 1962, SCHUURMAN 1965, TAYLOR & RATLIFF 1969, WILSON et al. 1977, ATWELL 1990). Ist der mechanische Widerstand des Bodens höher als der Druck, den die Wur-

zelspitze aufbringen kann, ist ein Eindringen nicht möglich, die Wurzel kann abgelenkt werden (PIETOLA 1991). Pflanzenwurzeln sind nicht in der Lage, ihren einmal erreichten Durchmesser zu reduzieren, um in eine kleinere Pore hineinzuwachsen zu können (WIERSUM 1957).

Anders stellten sich die Direktwirkung der mechanischen Belastung in **Reinshof** und **Reliehausen** bei **FMW** dar: Durch die Belastung stieg die Lagerungsdichte des Bodens in der Bodentiefe 28-34 cm bei den Stufen gering und mittel nur geringfügig an, deutlich stärker dagegen bei hoher Belastung (Tab. 41,44, Anhang, Abb. 51 oben). In **Reinshof** wurde im Vergleich zu **LBW** bei **FMW** der EDW in 28-34 cm Bodentiefe durch die Belastung kaum erhöht (Abb. 7, Abb. 51 oben). Der geringere EDW und der durch die Belastung deutlich weniger eingeschränkte Gasaustausch in der Bodenschicht 28-34 cm führte **1995** bei **FMW** im Vergleich zu **LBW** zu einer deutlich stärkeren Unterbodendurchwurzelung (Abb. 19). Am Beispiel **Reinshof** weist die Beziehung des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten zur Luftkapazität bei steigender Bodenbelastung (Abb. 58) auf eine mögliche Ursache hin.

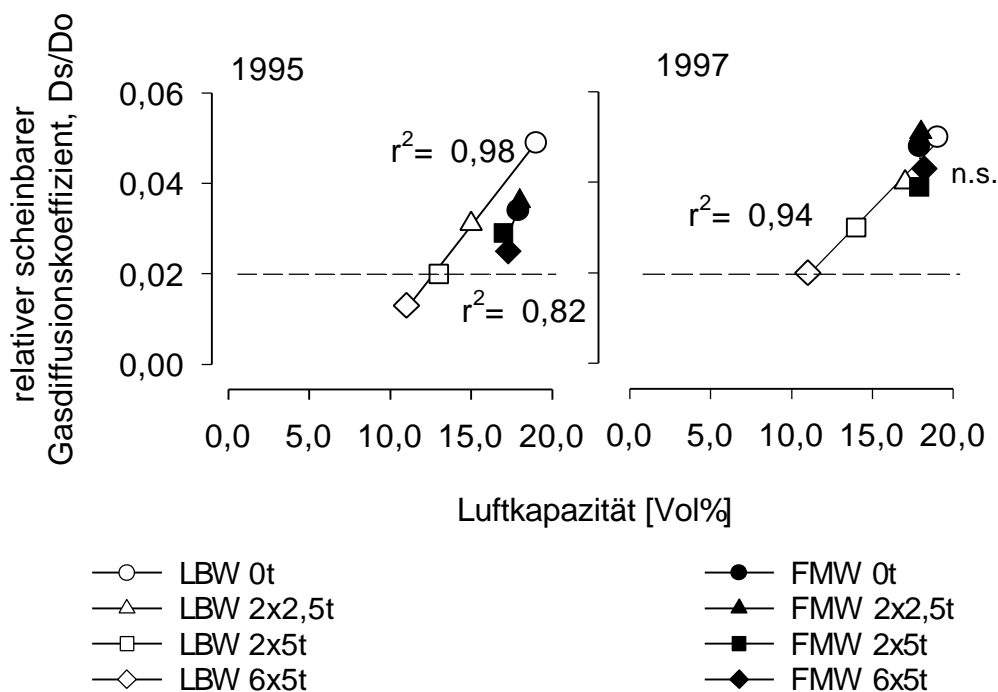


Abb. 58: Beziehung des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten bei pF 2,0 zur Luftkapazität (pF 2,0) bei steigender Bodenbelastung in der Bodenschicht 28-34 cm auf dem Standort **Reinshof** am 12.04.1995 und am 16.04.1997. Die gestrichelte Hilfslinie markiert Ds/Do 0,02.

Bei **LBW** führte die geringe, mittlere und hohe Bodenbelastung in der Bodenschicht 28-34 cm zu einem deutlichen Verlust an groben Poren, verbunden mit einer starken Absenkung des Diffusionskoeffizienten. Im Gegensatz dazu wurde bei **FMW** in derselben Bodenschicht nur bei hoher Belastung der Porenraum deutlich eingeengt und die Diffusionskoeffizienten gesenkt. Offensichtlich konnten bei **FMW** - im Gegensatz zu **LBW** - Boden und Porensystem der geringen und mittleren Belastung standhalten, ohne erheblich in ihrer Funktion für das Wurzelwachstum beeinträchtigt zu werden (Abb. 57 rechts). Eine im Vergleich zu gepflügten Böden höhere Unempfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung bei reduziert bearbeiteten Böden steht in Einklang mit den Ergebnissen von DEXTER (1988), BAUMGARTL (1991), DIEZ (1991), EHLERS et al. (1994) und GRUBER (1994). Aufgrund anhaltender Bodenruhe unterhalb des flachen Bearbeitungshorizontes verbunden mit einer hohen biologischen Aktivität konnte sich bei **FMW** in **Rellehausen**, vor allem aber in **Reinshof** ein stabiles Porensystem aus Wurmgingen und Kanälen abgestorbener Pflanzenwurzeln der Vorfrüchte bilden. Ein solches vornehmlich vertikal orientiertes Porensystem kann sich durch eine hohe Resistenz gegenüber einer vertikal auftreffenden Belastung auszeichnen (HARTGE & BOHNE 1983, BLACKWELL et al. 1990). Es ist daher denkbar, daß bei **FMW** die geringe Belastungsstufe zu einer Stauchung, nicht aber zu einem drastischen Verlust von Bioporen geführt hat. Die mittlere und hohe Belastung führte bei **FMW** zu einem Verlust an Porenvolumen und zu einer Senkung der Diffusionskoeffizienten (Abb. 54).

Die durch die mechanische Belastung hervorgerufene Erhöhung der Lagerungsdichte, verbunden mit einer Zunahme des EDW und einer Beeinträchtigung des Gasaustausches schränkte in der Krumbasis der gepflügten Böden die Wurzelsysteme der Sommergerste im Stadium EC 45 erheblich ein (Abb. 19 links). Abb. 59 zeigt am Beispiel **Reinshof 1995** und **1997**, wie die Pflanzenwurzeln im Verlauf der Vegetation beeinträchtigt wurden. Im ersten Versuchsjahr wurde bei **LBW** von EC 45 bis EC 85 bei den Belastungsstufen gering, mittel und hoch bei geringer Unterbodendurchwurzelung kaum eine weitere Zunahme der Unterbodendurchwurzelung gemessen. Allein auf unbelastetem Boden nahm die Unterbodendurchwurzelung mit der Zeit zu (Abb. 59 und Tab. 50,

51, Anhang). Dies legt den Schluß nahe, daß die erhebliche Beeinträchtigung der Porensysteme in ihrer Funktion für das Wurzelwachstum bei geringer, mittlerer und hoher Belastung auf dem gepflügten Boden über die Vegetation wirksam blieb. Ganz anders als bei **LBW** stellte sich die Wurzelndynamik in Abhängigkeit von der Belastungsstufe bei **FMW** (Abb. 59 links) dar: Bis EC 45 erreichte die Unterbodendurchwurzelung bei keiner, geringer und mittlerer und hoher Belastung ein wesentlich höheres Niveau als bei **LBW**. Von EC 45 bis EC 85 nahm die Unterbodendurchwurzelung deutlich ab. Eine Ausnahme bildete die hohe Belastung. Bei dieser Stufe nahm die Unterbodendurchwurzelung von EC 45 nach EC 85 zu (Abb. 59 links). Die im Vergleich zu **LBW** wesentlich höhere Unterbodendurchwurzelung bei **FMW** kann möglicherweise auf das ausgeprägt anisotrope Bioporensystem bei **FMW**, geschaffen von Pflanzenwurzeln und Regenwürmern, zurückgeführt werden.

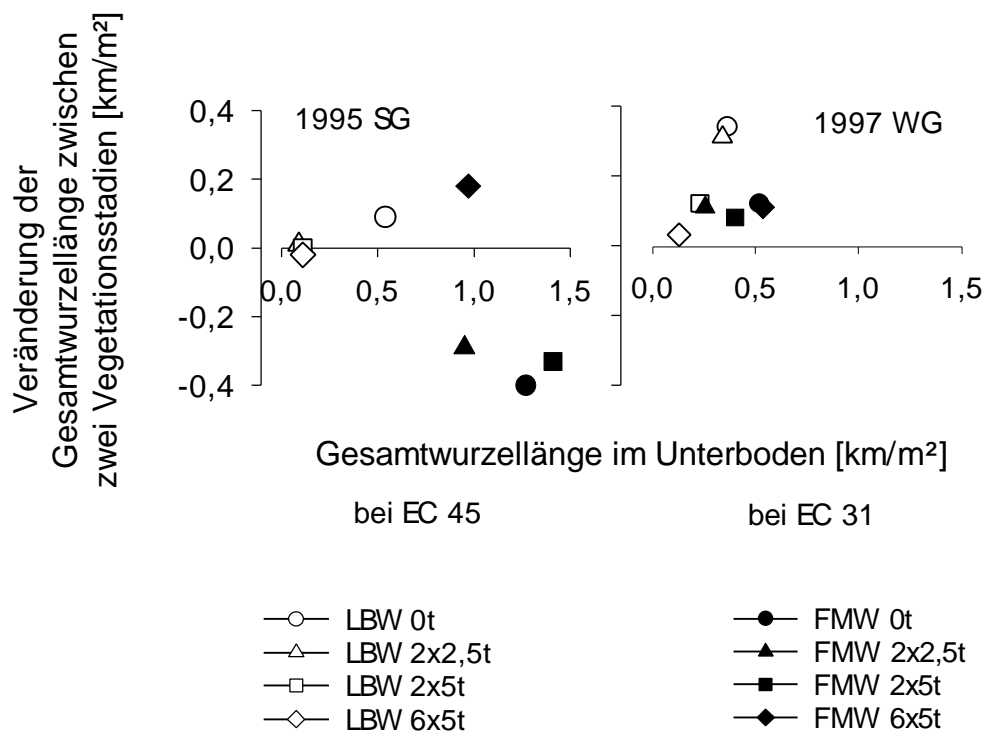


Abb. 59: Veränderung der Gesamtwurzellänge im Unterboden auf dem Standort **Reinshof**. Die Differenz der Gesamtwurzellänge ist für **1995** für den Abschnitt EC 45 bis EC 85, und **1997** für den Abschnitt EC 31 bis EC 45 dargestellt. Die Werte der Gesamtwurzellänge sind aus den Tab. 50, 51 und 55, 56, Anhang zu entnehmen. SG bezeichnet Sommergerste, WG Wintergerste.

Im dritten Versuchsjahr zeigte sich auf dem gepflügten Boden bei mittlerer und hoher Belastung eine von EC 31 bis EC 45 anhaltende Beeinträchtigung der Unterbodendurchwurzelung (Abb. 59 rechts). Dies zeigt die deutliche Nachwirkung der Belastung im dritten Versuchsjahr. Bei **FMW** nahm die Unterbodendurchwurzelung von EC 31 bis EC 45 bei allen Belastungsstufen in gleichem Maße zu (Abb. 59 rechts), eine belastungsabhängige Beeinträchtigung wurde nicht gemessen.

Im Herbst **1995** brach die Pflugarbeit bei **LBW** den mechanisch belasteten Boden auf und lockerte den Oberboden für die Aussaat des Winterweizens (Tab. 57, Anhang). Die Wurzelsysteme des Winterweizens auf dem Standort **Reinshof** zeigten mit steigender Belastung eine Reduktion der GWL im Oberboden (Abb. 19 mitte). Dies legt den Schluß nahe, daß der belastete Boden - vor allem bei mittlerer und hoher Belastung - durch den Pflugeinsatz nicht optimal gelockert werden konnte.

Die trotz des hohen mechanischen Widerstandes (Abb. 7 links) auch bei hoher Belastung uneingeschränkte Durchwurzelung des Unterbodens zu EC 50 (Abb. 19 oben mitte) weist auf eine hohe Anpassungsfähigkeit des Winterweizens an Verdichtungserscheinungen im Unterboden hin. Auch bei einer Betrachtung der Unterbodendurchwurzelung über die Vegetation zeigten sich beim Winterweizen kaum belastungsabhängige Beeinträchtigungen (Tab. 52-54, Anhang). Allein die maximale Durchwurzelungstiefe nahm bei steigender Bodenbelastung ab (Abb. 19). Dies steht in Einklang mit den Befunden von BARRACLOUGH & WEIR (1988). Die Autoren zeigten, daß Winterweizen auf einem Boden mit starker Pflugsohlenverdichtung im Vergleich zu Winterweizen ohne Pflugsohlenverdichtung dieselbe GWL, aber eine geringere maximale Durchwurzelungstiefe aufwies. In **Reinshof** wurde bei **FMW 1996** wie schon **1995** nur bei hoher Belastung eine deutliche Zunahme der Lagerungsdichte verbunden mit dem Anstieg des mechanischen Bodenwiderstandes in der Bodenschicht 28-34 cm gemessen (Abb. 7 rechts, Tab. 42, Abb. 51). Diese Gefügeveränderung zeigte **1996** keine Auswirkungen auf das Wachstum der Weizenwurzeln (Abb. 19 unten mitte). Die im Vergleich zu Gerste größere Unempfindlichkeit des Winterweizens gegenüber Bodenverdichtungen ist aus der Literatur bekannt (SOMMER et al. 1995). Einen Hinweis auf den Prozess, der es der Weizenwurzel ermöglichte, den dicht gelagerten Boden zu durchdringen, gibt MERTEN (1998). Die Auto-

rin wies nach, daß bei **LBW** unterhalb des Bearbeitungshorizontes in der Krumenbasis der mittlere Wurzelquerschnitt von Winterweizen mit steigender Belastung zunahm (Abb. 20 links). Dieser Befund steht in Einklang mit den Erkenntnissen von MATERECHERA et al. (1992). Die Autoren stellten dar, daß die Zunahme des Wurzeldurchmessers einen signifikanten Einfluß auf die Fähigkeit der Wurzeln hatte, dicht gelagerten Boden zu durchdringen. Als mögliche Ursache geben sie einen positiven Zusammenhang von Wurzeldurchmesser und Wurzeldruck an. Möglicherweise waren die Wurzeln des Winterweizens als Folge der Zunahme des Wurzelquerschnittes in der Lage, einen ausreichenden Druck zu erzeugen, um selbst bei hoher Bodenbelastung Bodenpartikel zu verdrängen und in den Unterboden vorzudringen.

Die Nachwirkung der mechanischen Belastung auf die Lagerungsdichte und den EDW des Bodens war in **Reinshof** und **Rellehausen** auch **1997** sowohl bei **LBW** als auch bei **FMW** nachzuweisen. Am Beispiel **Reinshof** zeigt Abb. 60, daß die Erhöhung des mechanischen Widerstandes des Bodens und die Beeinträchtigung des Gashaushaltes in der Krumenbasis des Bodens mit **LBW** auch noch bei der Wintergerste **1997** eine beträchtliche Durchwurzelungsbarriere darstellten. Es soll betont werden, daß die Durchwurzelung des Unterbodens in **Reinshof** bei **LBW** im dritten Versuchsjahr durch die hohe Bodenbelastung im Vergleich zu keiner Belastung um annähernd 80% reduziert wurde (Abb. 19 rechts).

Wie ein Vergleich der Direktwirkung (Abb. 57) mit der Nachwirkung im letzten Versuchsjahr (Abb. 60) zeigte, hat die Einschränkung des Wurzelwachstums durch den hohen EDW und die Beeinträchtigung des Gashaushaltes bei **LBW** mit geringer und mittlerer und bei **FMW** mit hoher Belastung über die Zeit abgenommen.

Die Prozesse, die eine Veränderung des Porensystems und des Bodengefüges und damit ihrer Funktion für das Wurzelwachstum von **1995** bis **1997** verursacht haben könnten, wurden in Kap. 5.2.1 diskutiert.

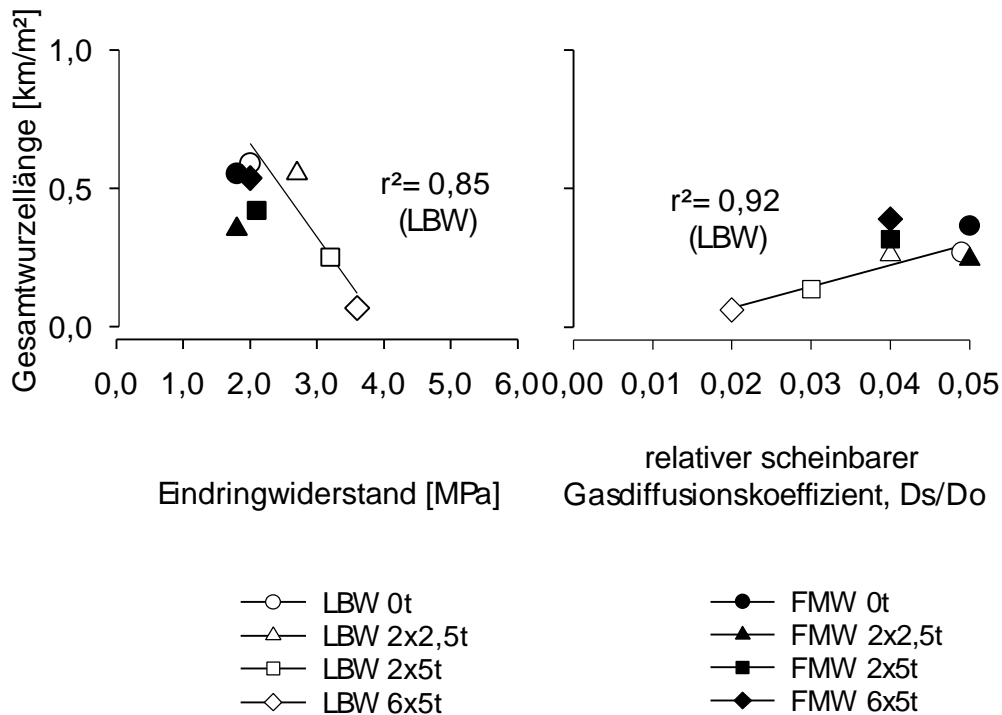


Abb. 60: Gesamtwurzellänge unterhalb 35 cm Bodentiefe am 02.06.1997 als Funktion des Eindringwiderstandes in der Tiefe 30-35 cm am 19.03.1997 und des relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten bei pF 2,0 in der Tiefe 28-34 cm am 16.04.1997 auf dem Standort **Reinshof**.

Auf dem Standort **Großobringen** stellt sich die Direktwirkung der mechanischen Belastung ganz anders dar als auf den anderen Standorten (Abb. 22): Die bei steigender Bodenbelastung auftretende Einschränkung der Durchwurzelung des Unterbodens wurde bei beiden Bearbeitungstiefen von **LBW** durch eine stärkere Oberbodendurchwurzelung ausgeglichen, so daß bei allen Varianten die GWL in etwa auf gleicher Höhe lag. Im Gegensatz zu den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen** war in **Großobringen** eine hemmende Direktwirkung der mechanischen Belastung auf das Wurzelwachstum im Oberboden nicht zu erkennen. Im Vergleich **Reinshof** und **Rellehausen** fand die Beprobung des Standortes **Großobringen** im ersten Versuchsjahr zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt in der Vegetation statt. Es ist denkbar, daß das Wurzelwachstum im Oberboden bei steigender Bodenbelastung zu Beginn der Vegetation gehemmt war, dies aber durch verstärktes Wachstum im Laufe der Vegetation kompensiert wurde. Im Gegensatz dazu nahm bei **LBW** sowohl in **Reinshof** als auch in **Rellehausen** die Oberbodendurchwurzelung nur bei ho-

her Bodenbelastung im Verlauf der Vegetation deutlich zu. Dagegen nahm auf nicht belastetem Boden die Oberbodendurchwurzelung im Verlauf der Zeit ab. BARRACLOUGH & WEIR (1988) stellten bei Winterweizen zu Beginn der Vegetation im Frühjahr ein eingeschränktes Wurzelwachstum oberhalb einer verdichteten Bodenschicht fest. Im weiteren Verlauf der Vegetation bis EC 50 beobachteten die Autoren ein ausgleichendes Wachstum im Oberboden.

Auf eine weitere mögliche Ursache für die intensive Durchwurzelung des Oberbodens auf dem Standort **Großobringen** trotz mechanischer Belastung weist HORN (1998) hin: Auf Grund des hohen Tongehaltes des Bodens (Tab. 7) könnten sich schon direkt nach der Belastung bei einsetzender Trocknung und Schrumpfung des Oberbodens im frühen Sommer **1995** Risse im Boden gebildet haben, die der Sommergerste ein Durchwurzeln des Oberbodens ermöglichen.

Bei der Betrachtung des Standortes **Großobringen** ist zu bedenken, daß zur Pflugarbeit ein Spatenpflug eingesetzt wurden. Diese Art der Grundbodenbearbeitung erzeugt zwar – wie der Streichblechpflug – einen sprunghaften Übergang von lockerem gewendeten Boden im Bearbeitungshorizont zu ungelockertem Boden unterhalb des Bearbeitungshorizontes. Ein Befahren der Pflugsohle und damit ein zusätzliches Verdichten und Verschmieren tritt jedoch nicht auf, da der Spatenpflug auf der Bodenoberfläche abgestützt wird (ESTLER 1996). Dennoch führte auch auf dem Standort **Großobringen** die steigende mechanische Belastung **1995** in der Bodenschicht 28-36 cm zu einem Anstieg der Lagerungsdichte (Tab. 47, Anhang) und zu einer Absenkung der Diffusionskoeffizienten des Bodens (Abb. 12), verbunden mit einer Einschränkung der Durchwurzelung des Unterbodens (Abb. 22 links).

In **Großobringen** wurde **1996** – etwas deutlicher als in **Reinshof** (Abb. 19 mitte oben) – auf gepflügtem Boden mit tiefer Bearbeitung eine Reduktion der Oberbodendurchwurzelung bei steigender Belastung gemessen (Abb. 22 mitte). Vermutlich führte der Pflugeinsatz im Herbst **1995** auf beiden Standorten nicht zu einem Aufbruch dichter Aggregate des mittel und hoch belasteten Bodens, die so wenig durchwurzelbar blieben. Im Gegensatz zu **Reinshof** nahm in **Großobringen** beim Winterweizen auch die Unterbodendurchwurzelung mit steigender Belastung ab. Möglicherweise war die geringere Unterbodendurchwurzelung eine Folge der ebenfalls geringen Oberbodendurchwurzelung.

Ein weiterer Grund für die Einschränkung der Unterbodendurchwurzelung in **Großbringen** mag fehlende Regenwurmaktivität sein. Die grabende Tätigkeit von Regenwürmern kann eine förderliche Wirkung auf das Wurzelwachstum haben: Regenwurmgänge dienen den Pflanzenwurzeln als Leitbahnen und können ein Weg durch verdichtete Bodenschichten sein (ELLIS & BARNES 1980, EHLERS et al. 1983, DEXTER 1986, GOSS et al. 1988, MARTINO & SHAYKEWICH 1994). LANGMAACK (1997) stellte auf dem Standort **Großbringen** eine außerordentlich geringe Regenwurmabundanz fest. Dies deutet darauf hin, daß der Winterweizen in **Großbringen** Bioporen zur Durchwurzelung nur in sehr geringem Umfang nutzen konnte.

Nach dem zweiten Pflugeinsatz im Herbst **1996** war in **Großbringen** bei beiden Bearbeitungstiefen von **LBW** eine Behinderung des Wurzelwachstums der Wintergerste im Unterboden zu erkennen. Dies zeigt, daß – so wie in **Reinshof** – auf dem Standort **Großbringen** die hemmende Wirkung der mechanischen Bodenbelastung auf das Wurzelwachstum bis ins dritte Versuchsjahr andauerte (Abb. 22).

➡ Auf den Standorten **Reinshof**, **Reliehausen** und **Großbringen** spiegelten die Wurzelsysteme die Direktwirkung der mechanischen Belastung auf Bodengefüge und Porenraumgestaltung deutlich wider: Steigende Eindringwiderstände verbunden mit einem beeinträchtigten Gashaushalt schränkten die Unterbodendurchwurzelung und die maximale Durchwurzelungstiefe mit steigender Belastung erheblich ein. Dies gilt besonders für die Böden mit **LBW**. Die durchwurzelungshemmende Wirkung der Pflugsohlenverdichtung in der Krumbasis wurde durch die zunehmende mechanische Belastung stark erhöht. Auf Grund der im Vergleich zu **LBW** höheren Unempfindlichkeit des Bodens mit **FMW** gegenüber mechanischer Belastung wurden bei **FMW** die Funktionen des Bodengefüges und des Porensystems nur bei hoher Belastung eingeschränkt: die Wurzelsysteme wiesen nur bei hoher Belastung eine Beeinträchtigung der Unterbodendurchwurzelung auf.

Auf den Standorten **Reinshof** und **Großbringen** wurde die durchwurzelungshemmende Wirkung der mechanischen Belastung auf den gepflügten Böden bis ins dritte Versuchsjahr nachgewiesen.

5.2.2 Oberirdisches Sproßwachstum

Das oberirdische Wachstum einer Getreidepflanze ist von der Entwicklung des Wurzelsystems nicht unabhängig. Wurzel und Sproß stehen in einem funktionellen Zusammenhang (DAVIDSON 1969, GREGORY 1994, PASSIOURA 1994, EHLERS 1996). Einschränkungen der Wurzel in ihrer spezifischen Funktion, Wasser- und Nährstoffe an den Sproß weiterzuleiten, können das Wachstum der oberirdischen Organe behindern. Ein beeinträchtigt wachsender Sproß mit geringer Blattfläche und eingeschränktem Stoffwechsel kann die Wurzeln möglicherweise nur unzureichend mit Assimilaten versorgen. Dies wiederum kann das Wurzelwachstum einschränken.

Im ersten Versuchsjahr zeichnete das oberirdische Sproßwachstum auf den Standorten **Reinshof** (Abb. 23, 24), **Reliehausen** (Abb. 31) und **Großobringen** (Tab. 23) die Direktwirkung der Belastung auf die Wurzelsysteme der Sommergerste deutlich nach. Bei **LBW** mit geringer, mittlerer und hoher Belastung wurde in **Reinshof** und **Reliehausen** bei stark reduzierter Durchwurzelung deutlich weniger Trockenmasse gebildet als bei keiner Belastung und nicht beeinträchtigter Durchwurzelung (Abb. 23, 31 links, Beispiel **Reinshof** Abb. 61). Bei **FMW** war in **Reinshof** die Durchwurzelung und die Sproßmasse nur bei hoher Belastung reduziert (Abb. 61). Hier zeigen sich deutliche Parallelen zur Beziehung von EDW, Diffusionskoeffizienten und GWL (Abb. 57).

Aus der Literatur ist bekannt, daß zwischen Wurzel- und Sproßausbildung eine Beziehung bestehen kann. SCHUURMANN (1965) und ATWELL (1990) stellten fest, daß die Pflanzenhöhe bei Getreide auf verdichtetem Boden geringer ausfiel als auf unverdichtetem Boden. In Klimakammern stellten HOFFMANN & JUNGK (1995) bei Zuckerrüben eine Beeinträchtigung des Wurzelwachstums bei verdichtetem Boden fest. Mit steigender Reduktion der Wurzellänge nahm die Sproßmasse ab. Dieser Zusammenhang wurde von HOFFMANN (1993) auch bei Getreide nachgewiesen. In Laborversuchen konnten YOUNG et al. (1997) erkennen, daß bei gleichbleibender Versorgung der Pflanzenwurzel mit Wasser und Nährstoffen allein eine Zunahme des mechanischen Bodenwiderstandes Wurzelwachstum und Blattlängenwachstum bei Weizen und Gerste deutlich reduzierte.

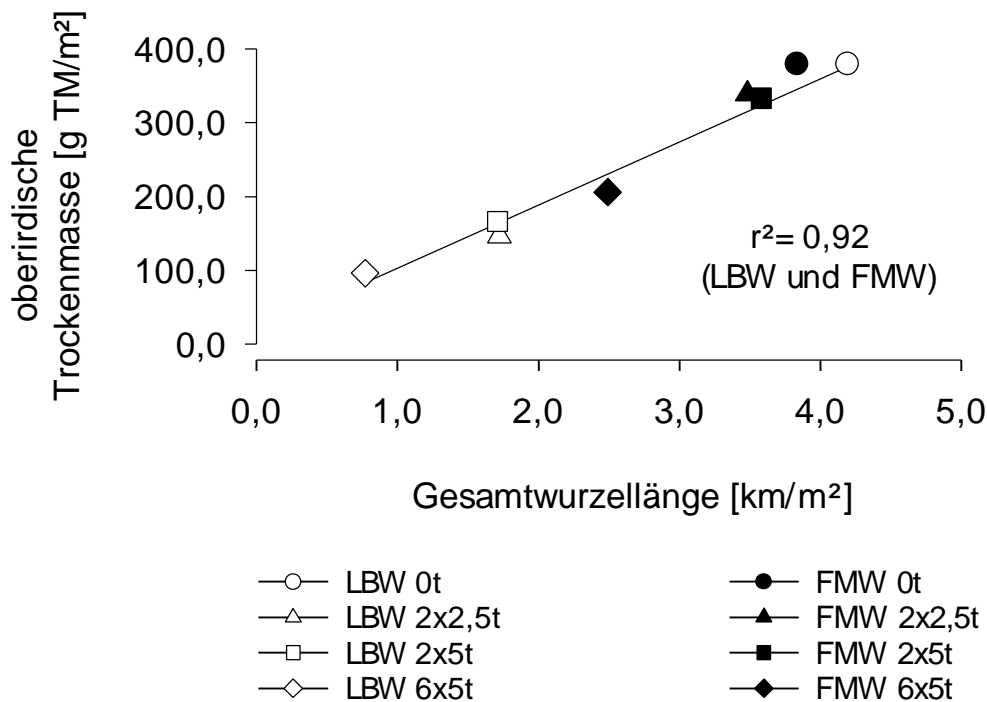


Abb. 61: Beziehung zwischen der Gesamtwurzellänge am 03.07.1995 (EC 45) und der oberirdischen Trockenmasse der Sommergerste am 23.06.1995 (EC37) auf dem Standort **Reinshof**.

Eine besondere Bedeutung kommt der Frage zu, auf welche Weise ein beeinträchtigtetes Wurzelwachstum das Sproßwachstum beeinflusst. Möglicherweise kann eine eingeschränkte Nährstoff- und Wasserversorgung des Sprosses auf Grund der Reduktion des durchwurzelten Bodenraumes das oberirdische - aber auf Grund ihres funktionalen Zusammenhanges auch das unterirdische - Wachstum beeinträchtigen. GEISLER & RITZ (1981) dokumentierten an Sommerweizen in Wasserkultur eine Reduktion des Sproßwachstums bei vermindertem Nährstoffangebot im durchwurzelten Medium. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit können jedoch keine Aussagen über die belastungsabhängige Nährstoffversorgung der Pflanzen gemacht werden. Die Bodenwassergehalte auf dem Standort **Reinshof** waren am 13.06.1995 bei beiden Bearbeitungssystemen und allen Belastungsstufen in der Bodenschicht von 10-100 cm Bodentiefe in etwa gleich hoch (ca. 31 Vol. %). Die Bodenwassergehalte sind nicht dargestellt. Die Feldkapazität des Bodens lag in etwa bei 33 Vol.%. Dies legt die Vermutung nahe, das im Frühsommer 1995 in **Reinshof** ein Wassermangel im Boden nicht vorlag. Da die Permeabilität der Pflanzenwurzel für Wasser bei

eingeschränkter Sauerstoffversorgung gesenkt werden kann (EHLERS 1996), ist es denkbar, daß der erheblich eingeschränkte Gashaushalt bei **LBW** mit geringer, mittlerer und hoher Belastung und bei **FMW** mit hoher Belastung die Wasseraufnahme behindert haben könnte.

Im zweiten Versuchsjahr waren die Unterschiede in der Trockenmasse und im Blattflächenindex des Winterweizens zwischen den Belastungsstufen bei **LBW** und **FMW** auf den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen** sehr gering. Für den Standort **Reinshof** überrascht diese Entwicklung nicht, da sich die Wurzelsysteme des Winterweizens trotz der Bodenbelastung annähernd uneingeschränkt entwickelten (Abb. 19 mitte oben). Bei **FMW** zeigt sich bei keiner Belastungsstufe eine Einschränkung des Wurzelsystems und auch keine Reduktion des Sproßwachstums.

Wie aus Abb. 19 (rechts oben) hervorgeht, war auf dem Standort **Reinshof** im dritten Versuchsjahr bei **LBW** das Wurzelsystem der Wintergerste im Unterboden bei hoher Bodenbelastung in der GWL und der maximalen Durchwurzelungstiefe deutlich reduziert. Dieser Mangel an Wurzelmasse und die im Vergleich zum unbelasteten Boden drastische Reduktion des durchwurzelten Bodens um ca. 80 % spiegelte sich bei der Trockenmasse und dem BFI über die Vegetation wider (Abb. 28 links). Vor allem nach der Blüte lagen die Werte bei hoher Belastung deutlich unter denen der anderen Belastungsstufen. Möglicherweise zeigte sich hier ein Effekt der stark eingeschränkten Durchwurzelungstiefe bei hoher Belastung: Bei der Bereitstellung von Wasser und Nährstoffen konnten die Pflanzen nicht auf tiefere Bodenschichten zurückgreifen. Diese Mangelsituation könnte auch der Grund für das frühere Absterben der grünen Blattfläche bei dieser Variante sein, welches sich in der geringeren Blattflächendauer (BFD) zwischen EC 69 und EC 87 ausdrückte (Abb. 29). Unterstützt wird diese Vermutung durch Untersuchungen von HSIAO (1993) und RAVICHANDRAN & MUNGSE (1995). Die Autoren weisen darauf hin, daß die BFD von Weizen bei Wassermangel reduziert war. Bei **FMW** war - wie schon im zweiten Versuchsjahr bei Winterweizen - keine Beeinträchtigungen des Wurzelsystems (Abb. 19 rechts unten) oder des Sproßwachstums der Wintergerste (Abb. 28 rechts) zu erkennen.

An dieser Stelle soll dem Zusammenwirken von Wurzel- und Sproßwachstum am Beispiel der Wintergerste auf dem Standort **Reinshof** besondere Aufmerksamkeit zukommen: Auf gepflügtem Boden wurde zum Zeitpunkt des Schossens bei hoher Bodenbelastung eine deutlich geringere GWL im Unterboden gemessen als auf dem Boden ohne Belastung (Abb. 19 rechts oben). Die GWL lag bei beiden Belastungsstufen im Oberboden auf einer Höhe (Abb. 19 rechts oben). Dies legt den Schluß nahe, daß das Wurzelsystem im Unterboden durch den hohen EDW und den beeinträchtigten Gashaushalt in der Krumbasis (Abb. 60) beeinträchtigt wurde. Zur selben Zeit nahm die Bestandeshöhe auf dem Boden ohne Belastung schneller zu als auf dem Boden mit hoher Belastung (Abb. 30 links). Das eingeschränkte Wurzelsystem fiel mit einem beeinträchtigten Längenwachstum des Sprosses zusammen. Bei allen Belastungsstufen lag der Bodenwassergehalt in Ober- und Unterboden (nicht dargestellt) im Bereich der Feldkapazität. Im Frühjahr war bei allen Varianten eine N-Düngung mit 70 kg N/ha auf den bei LBW im Herbst gepflügten Boden ausgebracht worden (Tab. 57, Anhang). Es ist anzunehmen, daß die Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Stickstoff im stark durchwurzelten Oberboden nicht eingeschränkt war. Dennoch trat eine Reduktion des Sproßlängenwachstums bei hoher Belastung ein.

Möglicherweise ist die Reduktion des Sproßlängenwachstums bei der Wintergerste - so wie bei der Sommergerste **1995** - auf einen Informationsaustausch zwischen Wurzel und Sproß zurückzuführen: Es ist denkbar, daß Wurzelspitzen, die in verdichtetem Boden auf hohen mechanischen Durchwurzelungswiderstand und einen eingeschränkten Gashaushalt stoßen, über hormonelle Steuerungsmechanismen das gesamte Wachstumsgeschehen der Pflanze beeinflussen können. Das gilt auch, wenn ein Teil des Wurzelsystems seine Funktion uneingeschränkt erfüllt. MASLE et al. (1990) und HOFFMANN (1993) dokumentierten ein beeinträchtigtes Sproßwachstum bei verdichtetem Boden schon kurz nach dem Auflaufen. Pflanzen in diesem Stadium haben zwar schon ein aktives Wurzelsystem. Dennoch findet die Ernährung hauptsächlich aus dem Endosperm statt (GEISLER 1983). Unter diesen Umständen kann eine Reduktion des Sproßwachstums nicht auf begrenzte Versorgung der Wurzel mit Wasser und Nährstoffen zurückgeführt werden. TARDIEU (1988) zeigte auf, daß das Wurzelwachstum von Mais bei beträchtlichen Spurverdichtungen nicht nur

im verdichteten Boden unter der Spur, sondern auch im nicht verdichteten Boden neben der Spur beeinträchtigt war. MASLE & PASSIOURA (1987) beobachteten bei Weizen auf einem verdichteten schluffigen Lehm in Klimakammern sowohl eine Beeinträchtigung des Wurzelwachstums als auch des Sproßwachstums. Weiterhin stellten AGUIRREZABAL et al. (1993) bei Mais neben der Beeinträchtigung der Wurzeln in verdichtetem Boden eine Reduktion des Wachstums sproßbürtiger Wurzeln außerhalb des verdichteten Bodens fest. TARDIEU (1994) beobachtete den beschränkenden Effekt einer Bodenverdichtung auf das Wurzel- und Sproßwachstum und nahm eine hormonelle Interaktion von Wurzel und Sproß als eine Ursache an. Aus der Literatur geht hervor, daß die Wirkung wachstumshemmender Bodenbedingungen auf den Hormonhaushalt der Pflanzen wahrscheinlich ist, aber noch nicht komplett aufgeklärt werden konnte (KAYS et al. 1974, TORREY 1976, CAMPBELL & MOREAU 1979, CARMÍ & HEUER 1981, LACHNO et al. 1982, MASLE & PASSIOURA 1987, DAVIES & ZANG 1991, TARDIEU 1994, COLEMAN & SCHNEIDER 1996, MULLHOLLAND et al. 1996, MUNNS & CRAMER 1996, ZHANG & TARDIEU 1996).

In **Großbringen** führte die Direktwirkung der Belastung **1995** auf gepflügtem Boden - so, wie es sich auch in **Reinshof 1995** andeutete (Abb. 24 links) - zu einer Reduktion der Bestandeshöhe auf gepflügtem Boden (Tab. 23). Dies zeigte eine deutliche Parallele zur belastungsabhängigen Reduktion der Diffusionskoeffizienten (Abb. 12) und der Unterbodendurchwurzelung (Abb. 22 links): Unabhängig von der Bearbeitungstiefe nahm die Bestandeshöhe bei **LBW** mit steigender Belastung ab. Die Beeinträchtigung der Wurzelsysteme fiel wie in **Reinshof** mit einer Reduktion des oberirdischen Sproßwachstums zusammen. Im Gegensatz zur Direktwirkung hatte die Bearbeitungstiefe in den Versuchsjahren **1996** und **1997** in **Großbringen** – unabhängig von der Belastungsstufe - einen Einfluß auf die Bestandeshöhe: Tendenziell lag die Bestandeshöhe bei tiefer Bodenbearbeitung höher als bei flacher Bearbeitung (Tab. 24, 25). Bei **LBW tief** wurde der Boden um ca. 12 cm tiefer gelockert als bei **LBW flach**. Dadurch stand den Pflanzen im Vergleich zu **LBW flach** zu Beginn ihrer Entwicklung ein größeres Bodenvolumen mit günstiger Lockerung zu Verfügung. Möglicherweise führte dies in **Großbringen** zu Wachstumsbedingungen zur Zeit des Schossens, welche eine größere Wachstumshöhe zur Folge hatten.

- ➔ In **Reinshof** und **Reliehausen** wurde **1995** bei stark reduzierter Durchwurzelung eine verminderte Bildung von oberirdischer Sproßmasse gemessen. So wie bei der Sommergerste **1995** wurde dieser Zusammenhang in **Reinshof** auf gepflügtem Boden auch bei der Wintergerste im Jahr **1997** nachgewiesen. Möglicherweise war eine eingeschränkte Versorgung von Wurzel und Sproß durch die stark begrenzte Profilerschließung eine Ursache. Zusätzlich ist eine beeinträchtigte Wasseraufnahme der Wurzel, verursacht durch den eingeschränkten Gashaushalt denkbar.

5.2.3 CO₂/H₂O Gaswechsel

Sowohl beim Winterweizen als auch bei der Wintergerste zeigten die Messungen des Gesamtwasserpotentials und des CO₂/H₂O Gaswechsel der Fahnblätter auf gepflügtem Boden einen Zusammenhang: Tendenziell lag bei beiden Feldfrüchten die Assimilationsrate (Abb. 38, 44 links) und das Gesamtwasserpotential (Abb. 39, 45 links) über den Tag bei hoher Bodenbelastung niedriger als auf nicht belastetem Boden. CO₂- Assimilationsrate und stomatäre Leitfähigkeit sind über den Öffnungszustand der Stomata eng miteinander verknüpft und zeichnen sich durch eine positive Korrelation aus (LARCHER 1984, BETHENOD et al. 1996). Der Öffnungszustand der Stomata ist stark abhängig vom Gesamtwasserpotential (GWP) in der Pflanze. Fällt das GWP unter einen Schwellenwert, verengen sich die Stomata. Bei weiter abfallendem GWP kommt es zu einem Spaltenschluß (LARCHER 1984). Ein niedriges GWP kann ursächlich mit einem in seiner Größe oder in seiner Funktion beeinträchtigten Wurzelsystem zusammenhängen: Verliert die Pflanze mehr Wasser durch Transpiration als sie durch das eingeschränkte Wurzelsystem aufnehmen kann, fällt das GWP. Auf dem Standort **Reinshof** unterschied sich bei **LBW 1996** die Unterbodendurchwurzelung des Winterweizens bei keiner und hoher Belastung kaum (Abb. 19 mitte oben). Das bei hoher Belastung niedrigere GWP (Abb. 39 links) ist daher **1996** nicht mit einer eingeschränkten Wasseraufnahme durch ein reduziertes Wurzelsystems im Unterboden zu erklären. Der prozentuale Anteil wassergefüllter Poren am Gesamtporenvolumen in der Bodentiefe 30-100 cm war am 16.06.**1996** bei **LBW 6x5t** (61,9%) deutlich höher als bei **LBW**

0t (51,0%). Ebenso war bei hoher Belastung die Luftkapazität des Bodens in der Bodenschicht 30-50 cm deutlich geringer als bei keiner Belastung (Tab. 42, Anhang). Diese Befunde legen den Schluß nahe, daß der Gashaushalt und damit die Sauerstoffversorgung der Wurzeln am 16.06.1996 bei hoher Belastung eingeschränkt war. Möglicherweise führte dies zu einer Beeinträchtigung der Wurzeln in ihrer Funktion, Wasser aufzunehmen und damit - unter den Transpirationsbedingungen vom 23.06.1996 - zu einem im Vergleich zur Kontrolle (**LBW 0t**) stärker gefallenem GWP.

Im Gegensatz zu **LBW** (Abb. 39 links) fiel das GWP bei **FMW** (Abb. 39 rechts) am 23.06.1996 über den Tagesgang weniger tief ab und zeigte kaum Unterschiede zwischen keiner und hoher Belastung. Das höhere GWP bei **FMW** führte jedoch nicht zu einer höheren CO₂-Assimilation. Da bei annähernd gleicher GWL der Unterbodendurchwurzelung das GWP bei **FMW** weniger tief abfiel als bei **LBW**, liegt die Vermutung nahe, daß das Wurzelsystem im Unterboden bei **FMW** im Vergleich zu **LBW** nicht oder weniger in seiner Funktion Wasser aufzunehmen eingeschränkt war.

Wie beim Winterweizen, so war auch bei der Wintergerste bei **LBW** und hoher Bodenbelastung die stomatäre Leitfähigkeit, die Assimilationsrate der Fahnblätter und das Gesamtwasserpotential über den Tag tendenziell niedriger als auf dem Boden ohne Belastung (Abb. 44 links). Im Gegensatz zum Weizen war bei der Gerste die Reduktion des Wurzelsystems im Unterboden bei hoher Belastung wesentlich deutlicher (Abb. 19). Abb. 62 zeigt die Beziehung von Gesamtwurzellänge im Unterboden und stomatärer Leitfähigkeit. Zum Zeitpunkt der Gaswechsellmessungen war der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt bei hoher Belastung in den ersten 30 cm Bodentiefe annähernd ausgeschöpft: Ohne Bodenbelastung lagen die Werte nahe des PWP (Bodenwassergehalte sind nicht dargestellt). Unterhalb von 30 cm Bodentiefe war der Wassergehalt des Bodens bei beiden Belastungsstufen auf gleicher Höhe. Pflanzenverfügbares Wasser stand zur Verfügung. Bei hoher Bodenbelastung konnten die Pflanzen aus dem Oberboden kein Wasser mehr aufnehmen, da der Vorrat erschöpft war. Unterhalb von ca. 50 cm Bodentiefe konnten die Pflanzen wahrscheinlich ebenfalls kein Wasser aufnehmen, da in dieser Tiefe keine Wurzeln vorhanden waren (Abb. 19 rechts oben). Diese Beeinträchtigung der Wasseraufnahme der

Wintergerste bei hoher Bodenbelastung kann als Ursache für das niedrige GWP und den eingeschränkten Gaswechsel angesehen werden.

Bei der Wintergerste **1997** zeigte sich auf dem Boden mit **FMW** und den Belastungsstufen **0t** und **6x5t** eine unerwarteter Zusammenhang: Bei annähernd gleicher Ausprägung des Wurzelsystems (Abb. 19 rechts unten) lag die stomatare Leitfähigkeit und die CO₂-Assimilationsrate (Abb. 44 rechts) der Fahnenblätter, sowie das GWP der Pflanzen (Abb. 45 unten) bei hoher Belastung in der Tendenz höher als auf unbelastetem Boden. Der Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Messung des GWP unterschied sich nicht zwischen den Belastungsstufen (nicht dargestellt). Eine begründete Erklärung für dieses Phänomen ist nicht gefunden worden.

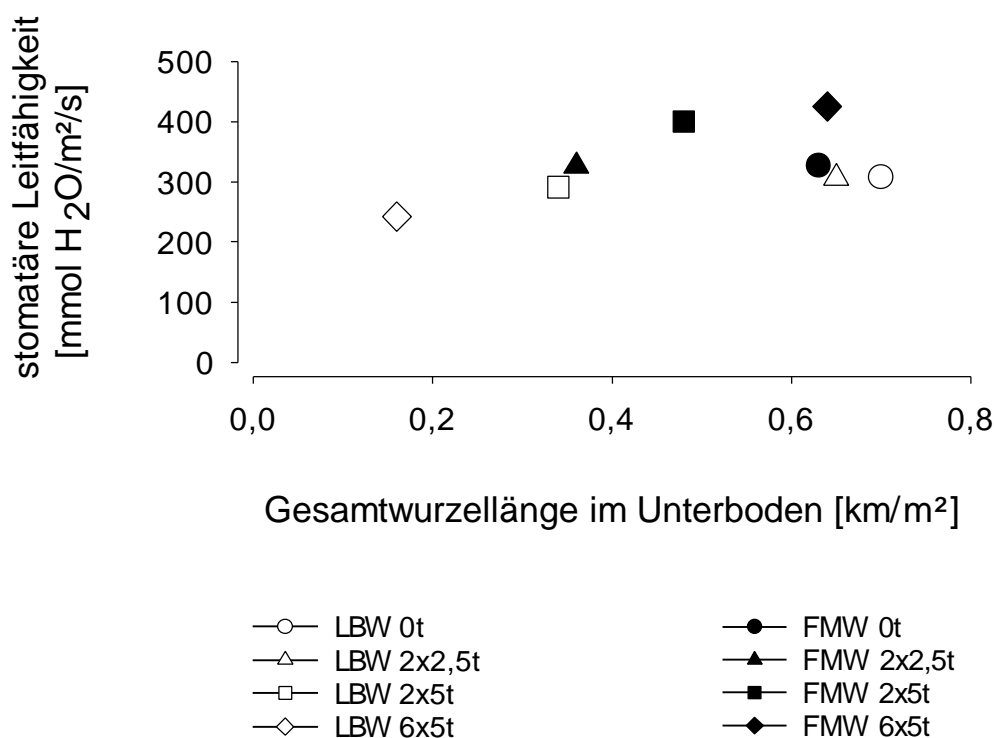


Abb. 62: Beziehung zwischen der Gesamtwurzellänge im Unterboden am 02.06.1997 und der mittleren stomatären Leitfähigkeit am 18. und 19.06.1997 auf dem Standort **Reinshof** für Wintergerste.

BETHENOD et al. (1996) wiesen darauf hin, daß alle Prozesse, welche die CO₂-Assimilation und den Öffnungszustand der Stomata betreffen, über Regelkreise eng miteinander verknüpft sind. Innerhalb dieser Regelkreise spielt die chemische Signalübermittlung eine bedeutende Rolle. DÖRFFLING (1981) berichtete

von einem Stomataschluß beim Anstieg der Abscisinsäurekonzentration im Blatt und beschrieb eine Zunahme der Abscisinsäurekonzentration bei zunehmendem Wassermangel im Boden. MASLE & PASSIOURA (1987) dokumentierten die beeinträchtigenden Einflüsse einer Bodenverdichtung auf die stomatäre Leitfähigkeit bei Weizen. Die Autoren vermuteten, daß das Sproßwachstum und der Gaswechsel bei verdichtetem Boden hauptsächlich durch hormonale Signale aus der Wurzel beeinflusst wurden. DAVIES & ZHANG (1991) und TARDIEU (1994) betonten, daß ein hoher mechanischer Widerstand des Bodens über eine chemische Signalübermittlung aus der Wurzel eine Begrenzung der stomatären Leitfähigkeit hervorrufen kann. Es ist deshalb anzunehmen, daß auch im vorliegenden Fall bei der Regelung des Gaswechsels der Fahnenblätter und des GWP unter Streßbedingungen Hormone eine zentrale Rolle spielten.

Im Vergleich der Lichtfluß-Effektkurven (Abb. 42, 47) stellte sich heraus, daß auf gepflügtem Boden sowohl beim Winterweizen als auch bei der Wintergerste bei gleicher Strahlungsmenge auf dem hoch belasteten Boden deutlich weniger CO₂ assimiliert werden konnte als bei keiner, geringer und mittlerer Belastung. In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis stellten BETHENOD et al. (1996) bei Mais auf einem verdichteten tonigen Lehm eine eingeschränkte CO₂-Assimilation über einen weiten Bereich der eingestrahlten Lichtmenge fest. Als Ursachen sind die eingeschränkte stomatäre Leitfähigkeit bei Wasser- und Nährstoffmangel, sowie hormonelle Interaktionen zwischen Sproß und Wurzelsystem wahrscheinlich.

Diese Befunde zeigen, daß die mechanische Bodenbelastung auf gepflügtem Boden noch zwei Jahre nach dem Lasteintrag über den Einfluß auf die Wurzelsysteme hemmend auf den Gaswechsel der Wintergerste wirken konnte (Abb. 62).

Die Gaswechsellmessungen erfassen zeitlich einen nur sehr geringen Ausschnitt der Vegetation und deuten einen Zusammenhang von Bodenverdichtung und Gaswechsel nur an. Um umfassendere Aussagen über den Effekt eines beeinträchtigten Wurzelwachstums auf die CO₂-Assimilation machen zu können, sollten längere Zeitabschnitte bei einem hohen Sättigungsdefizit der umgebenden Luft und annähernd erschöpftem Bodenwasservorrat durchgeführt werden. Da die beschriebenen Bedingungen bei Feldversuchen stark von der

längerfristigen Witterung abhängen, sind Laborversuche möglicherweise geeigneter als Untersuchungen im Feld, da die Wachstumsbedingungen besser kontrollierbar sind. Andererseits sind Bodenverdichtungen unter Laborbedingungen nur schwer zu simulieren.

Bei der Betrachtung der CO₂-Assimilationsraten und der Lichtfluß-Effektkurven muß berücksichtigt werden, daß in der vorliegenden Arbeit nur das Fahnenblatt der Getreidepflanzen Gegenstand der Untersuchungen war. THORNE (1965) wies darauf hin, daß die grüne Fläche der Ähre bei unbegranntem Weizen ca. 40% der Fläche der Fahnenblättes erreichen kann. Bei begrannter Gerste kann die grüne Fläche der Ähre im Verhältnis zur Fläche des Fahnenblättes noch größer sein. Der Anteil der Assimilation des Fahnenblättes und der anderen grüner Organe am Aufbau der Körner ist keine statische Größe, sondern verändert sich im Laufe der Entwicklung (STOY 1973). Hinzu kommt, daß der Zusammenhang von Fläche und Leistung des Fahnenblättes stark von Prozessen der Blattalterung beeinflusst wird (APEL et al. 1973, DANTUMA 1973, GALE et al. 1974, STAMP & HERZOG 1976). Aufgrund dieser Befunde ist es nicht möglich, Rückschlüsse von den Gaswechselfmessungen an individuellen Fahnenblättern über einen Zeitabschnitt auf die CO₂-Assimilation einer ganzen Pflanze oder eines ganzen Bestandes über einen Zeitabschnitt zu ziehen. Soll der Gaswechsel ganzer Bestände erfaßt werden, ist ein anderer Versuchsansatz, so wie der von BURKHART et al. (1997) nötig.

➔ Auf gepflügtem Boden in **Reinshof** zeigte die hohe mechanische Bodenbelastung über das geringe Wurzel- und Sproßwachstum bis ins dritte Versuchsjahr einen hemmenden Einfluß auf den CO₂/H₂O-Gaswechsel der Fahnenblätter. Auf dem Boden mit **FMW**, bei dem im zweiten und dritten Versuchsjahr keine belastungsabhängigen Beeinträchtigung des Wurzelsystems auftrat, wurde auch keine Hemmung des Gaswechsels bei zunehmender Bodenbelastung gemessen.

5.2.4 Ertragsbildung und Ertrag

Auf den drei Standorten **Reinshof**, **Rellehausen** und **Großobringen** wurde im Versuchsjahr **1995** als Direktwirkung auf gepflügtem Boden ein bei steigender Belastung erheblich reduzierter Kornertrag festgestellt (Abb. 48-50).

Die mechanische Belastung führte in **Reinshof** und **Rellehausen** zu einer Reduktion der Bestandesdichte vor dem Bestocken (Tab. 26). Dies steht in Einklang mit den Befunden von ARVIDSSON & HÅKANSSON (1996). Die Autoren stellten auf verdichteten Böden - vor allem bei hohem Tongehalt - eine Beeinträchtigung der Saatbettqualität und eine damit verbundene Hemmung des Feldaufganges fest. Im Gegensatz dazu wurde in **Großobringen** - bei besonders hohem Tongehalt (Tab. 7) – keine Beeinträchtigung der Bestandesdichte festgestellt (Tab. 33). Möglicherweise ist dies auf die im Vergleich zu **Reinshof** und **Rellehausen** deutlich intensivere Saatbettbereitung mit mehrmaligem Grubber- und Kreiseleggeneinsatz zurückzuführen (Tab. 57-59, Anhang).

Im ersten Versuchsjahr wurde auf gepflügtem Boden eine positive Beziehung zwischen Wurzelsystem und Sproßwachstum festgestellt: Stark eingeschränkte Wurzelsysteme fielen mit reduziertem Sproßwachstum (Abb. 61) und geringem Kornertrag zusammen (Abb. 63). Die beträchtliche Einschränkung des durchwurzelten Bodens in Verbindung mit Funktionsstörungen der Wurzel könnten nicht nur Ursachen für eine beeinträchtigte Wasser- und Nährstoffaufnahme und damit für ein reduziertes Wurzel- und Sproßwachstum gewesen sein (vgl. Kap. 5.2.2), sondern auch die Ertragsbildung beeinflusst haben.

Auf allen drei Standorten wurde **1995** auf gepflügtem Boden eine bei steigender Belastung deutlich reduzierte Ährendichte und eine sinkende Einzelkornmasse ermittelt (Tab. 26, 30, 33). Wassermangel zur Zeit der Bestockung ist als Ursache möglich: Nach GEISLER (1984) ist die Anlage „produktiver“ Halme in der Phase der Bestockung besonders empfindlich gegen eine Wasserunterversorgung. Versorgen die Wurzel den Sproß in dieser Phase nicht ausreichend mit Wasser, kann die Anzahl der Halme pro Pflanze und so die Ährendichte reduziert werden. Besonders deutlich zeigte sich auf dem Standort **Reinshof** eine Abnahme der Einzelkornmasse bei steigender Bodenbelastung (Tab. 26). GEISLER (1984) wies darauf hin, dass Wassermangel während des Wachstums der Karyopse die Einzelkornmasse mindern und zu kümmerkorn führen kann.

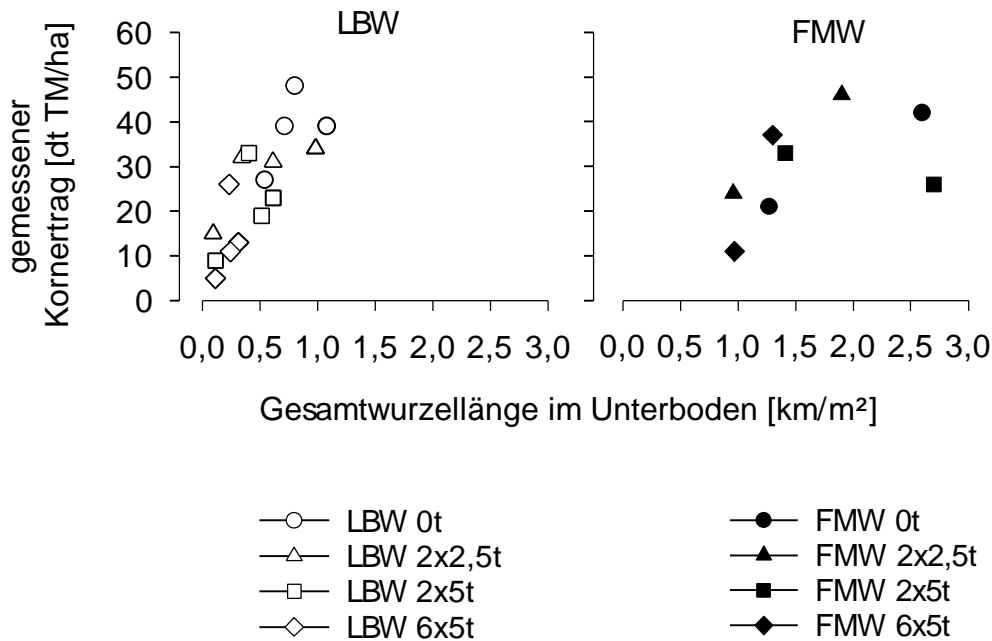


Abb. 63: Gemessener Kornertrag der Sommergerste **1995** als Funktion der Gesamtwurzellänge im Unterboden (Reinshof 26.07.95, Rellichausen 08.08.95, Großobringen 08.08.95) auf den Standorten **Reinshof**, **Rellichausen** und **Großobringen**. Die unterschiedlichen Bearbeitungstiefen in **Großobringen** (tief und flach) werden unter **LBW** zusammengefaßt.

Besonders drastisch zeigte sich der Einfluß der Wasserversorgung auf die Einzelkornmasse bei einem Vergleich der Standorte **Reinshof** und **Rellichausen**. Wie aus Tab. 37 hervorgeht, lag der Bodenwassergehalt des Standortes **Rellichausen** im Juli **1995** deutlich höher als in **Reinshof**. Möglicherweise führte das eingeschränkte Wasserangebot in **Reinshof** zu der im Vergleich mit **Rellichausen** um durchschnittlich 7,6 g geringeren Einzelkornmasse. Das deutlich niedrigere Gewicht der Körner in **Reinshof** ist wahrscheinlich auch als Ursache für den im Vergleich zu **Rellichausen** geringen Kornertrag anzusehen: Auf beiden Standorten lag die Ährendichte annähernd auf einer Höhe (Tab. 26, 30). Trotzdem brachte die Sommergerste in **Rellichausen** einen deutlich höheren Kornertrag (Abb. 48, 49).

Tab. 37: Bodenwassergehalt auf den Standorten **Reinshof** (20.07.1995) und **Rellichausen** (05.07.1995).

Boden- tiefe [cm]	Bodenwassergehalt [Gew. %]			
	Reinshof		Rellichausen	
	LBW	FMW	LBW	FMW
0-30	13,0	12,8	20,0	17,6
30-100	17,8	16,7	20,0	19,1

In **Reinshof** zeigte sich bei **LBW** ein Zusammenhang von Bodenbelastung, Blattflächenindex und Kornertrag (Abb. 64). So wie der Kornertrag, so lag der Blattflächenindex bei geringer, mittlerer und hoher Belastung (Abb. 64) deutlich unter der Kontrolle (**LBW 0t**). Vermutlich war bei reduzierter Blattfläche die Bildung von Assimilaten eingeschränkt, was die Anlage der Blüten und damit die Anzahl Körner pro Ähre beeinträchtigte.

Möglicherweise wurde die Ertragsbildung auch durch einen veränderten Hormonhaushalt bei behindertem Pflanzenwachstum geprägt (vgl. Kap. 5.2.2).

Bei **FMW** zeigte die Direktwirkung in **Reinshof** nur bei hoher Belastung einen reduzierenden Einfluß auf den Kornertrag (Abb. 48). Dies bestätigte die Beobachtungen, die bei diesem Bearbeitungssystem schon bei der Auswertung der Belastungswirkung auf den Gashaushalt (Abb. 10 unten), das Wurzelsystem (Abb. 19 unten links) und das Sproßwachstum (Abb. 23) gemacht wurden: Im Vergleich zu **LBW** wies der Boden mit **FMW** eine geringere Empfindlichkeit gegenüber mechanischer Belastung auf.

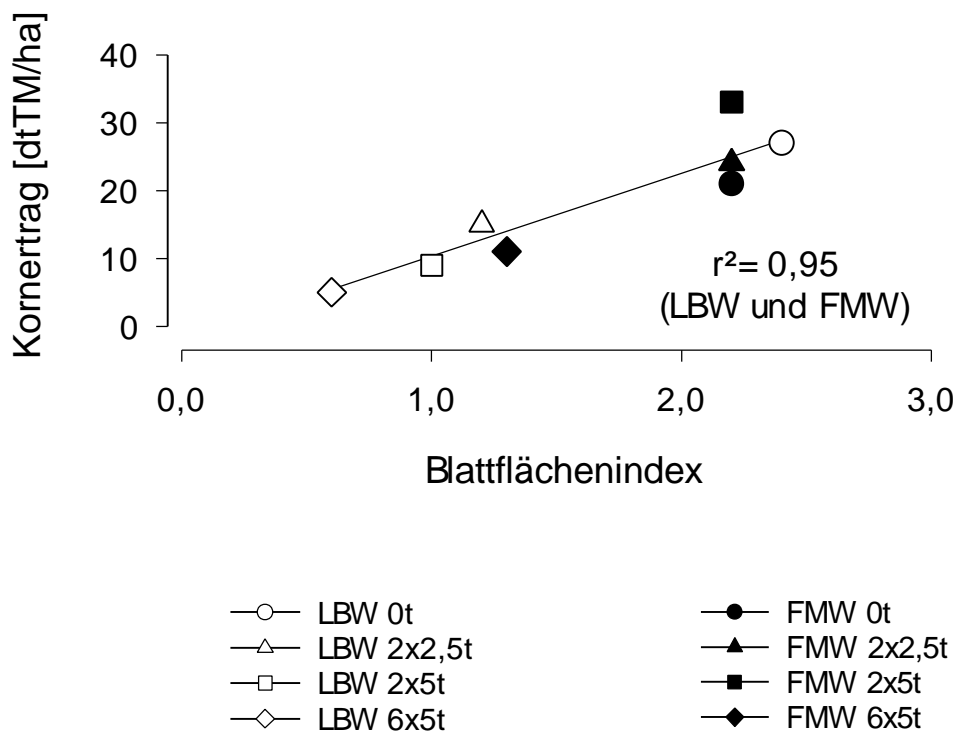


Abb. 64: Beziehung zwischen dem Kornertrag und dem mittleren Blattflächenindex von EC 25-37 der Sommergerste auf dem Standort **Reinshof** im Versuchsjahr **1995**.

Auf Grund der hohen Toleranz des Winterweizens gegenüber verdichteten Bodenschichten mit hohem EDW und eingeschränktem Gashaushalt wurde in **Reinshof** und **Großobringen 1996** kaum eine Beeinträchtigung der Wurzelsysteme bei steigender Belastung gemessen. Ebenso verhielt es sich mit dem gemessenen Kornertrag auf allen drei Standorten.

Aus der Ährendichte, dem Kornbesatz der Ähre und der Einzelkornmasse lässt sich ein theoretischer Kornertrag berechnen. Dieser berechnete Kornertrag spiegelt die Ertragsbildung anhand der ertragsbestimmenden Faktoren wider. Abb. 65 zeigt einen Vergleich des gemessenen Kornertrags mit dem berechneten Kornertrag des Winterweizens und der Wintergerste der Jahre **1996** und **1997** auf allen drei Standorten. Die teils große Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Kornertrag wird auf die Heterogenität der Versuchsfelder zurückgeführt.

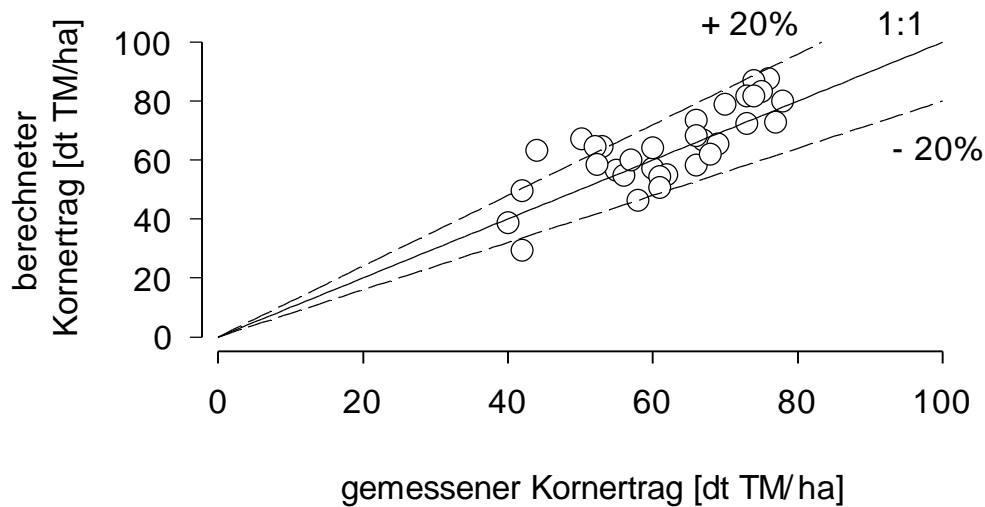


Abb. 65: Beziehung zwischen gemessenem und berechnetem Kornertrag auf den Standorten **Reinshof**, **Rellehausen** und **Großobringen** in den Jahren **1996** und **1997**.

Im Versuchsjahr **1997** wurde auf den Standorten **Rellehausen** und **Großobringen** auf gepflügtem Boden ein tendenzieller Abfall des Kornertrags bei hoher Bodenbelastung festgestellt (Abb. 49, 50). In **Reinshof** wurde diese Tendenz nicht festgestellt. Wohl aber kam es in **Reinshof** auf gepflügtem Boden mit hoher Belastung bei stark reduziertem Wurzelsystem zu einer deutlichen Reduktion der Ährendichte. Kornbesatz und Einzelkornmasse lagen jedoch auf der Höhe der Kontrolle (**LBW 0t**).

Die gemessenen Kornerträge des Jahres **1997** zeigen, daß die Wintergerste auch bei stark reduziertem Wurzelsystem - wie bei **LBW 2x5t** und **6x5t** in **Reinshof** (Abb. 19 rechts oben) - einen Kornertrag auf der Höhe der Kontrolle (**LBW 0t**) ausgebildet hat (Abb. 48). Das beweist, daß die Wintergerste in der Lage war, mögliche Beeinträchtigungen in der Versorgung mit Wasser durch das reduzierte Wurzelsystem bei der Ertragsbildung auszugleichen. Möglicherweise stand im Oberboden aber auch in ausreichendem Maße Wasser zur Verfügung. Es ist anzunehmen, daß Ertragseinbußen bei stark beeinträchtigten Wurzelsystemen mit steigender Austrocknung des Oberbodens zunehmen. Vor diesem Hintergrund gewinnen die unterschiedlichen Durchwurzelungstiefen bei **LBW** und **FMW** an Bedeutung. In **Reinshof** lag die maximale Durchwurzelungstiefe der Wintergerste auf dem Boden mit mittlerer Belastung bei **FMW** um 7% und bei hoher Belastung um 115% höher als bei **LBW** (Abb. 19 rechts unten).

➔ Die belastungsabhängige Erhöhung des mechanischen Widerstandes und die drastische Einschränkung des Gashaushaltes in der Krumbasis der Böden mit **LBW** hatte im ersten Versuchsjahr **1995** auf allen Standorten eine drastische Reduktion des Wurzel- und Sproßwachstums, sowie des Kornertrages zur Folge. Im Vergleich dazu trat bei **FMW** ein reduziertes Pflanzenwachstum und ein deutlich geringerer Kornertrag nur bei hoher Belastung auf. Im Versuchsjahr **1996** war in **Reinshof** eine belastungsabhängige Beeinträchtigung des Kornertrags in beiden Bearbeitungssystemen angedeutet. Im letzten Versuchsjahr (**1997**) zeigte sich diese Tendenz kaum. In **Rellehausen** wurde auf gepflügtem Boden, in **Großobringen** auf beiden Bearbeitungssystemen durch die Belastung der Kornertrag **1996** und **1997** in der Tendenz gemindert.

5.3 Konsequenzen für die pflanzenbauliche Praxis

Das Gesetz zum Schutz des Bodens fordert die Einhaltung einer guten fachlichen Praxis bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung. Zu den im Gesetzestext angegebenen Grundsätzen einer solchen Praxis zählen unter anderem die zwei folgenden Punkte: Die Bodenbearbeitung soll unter Berücksichtigung der Witterung standortangepaßt sein. Weiterhin sollen Bodenverdichtungen so weit wie möglich vermieden werden. Insbesondere sind hierbei die Bodenart, die Bodenfeuchte und die zur Bearbeitung eingesetzten Geräte zu berücksichtigen (GESETZ ZUM SCHUTZ DES BODENS DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 1998).

Die Ergebnisse haben gezeigt, daß die Böden der Standorte **Reinshof** und **Rellehausen** mit **FMW** im Vergleich zu **LBW** deutlich unempfindlicher gegenüber mechanischer Belastung waren: Bei annähernd gleicher Bodenfeuchte trat bei **FMW** eine erhebliche Beeinträchtigung der Funktion des Bodens, verbunden mit einer Einschränkung des Pflanzenwachstums erst bei deutlich höherer mechanischer Belastung auf als bei **LBW**. Vor allem die – bei **FMW** fehlende – pflugtypische Verdichtung der Krumbasis stellte sich nach mittlerer und hoher Belastung bei **LBW** als beträchtliche Durchwurzelungsbarriere dar. Eine Regeneration des belasteten Bodens durch Reißbildung und Ausbildung von Bioporen

trat bei **FMW** wesentlich schneller auf als bei **LBW**. Mit dem Ziel einer guten fachlichen Praxis, wie sie das Bodenschutzgesetz fordert, ist die **FMW** auf geeigneten Böden (EHLERS & CLAUPEIN 1994, EHLERS 1996) in den Katalog der Maßnahmen aufzunehmen, die es dem Landwirt ermöglichen, seine Bodenbewirtschaftung standortangepaßt und bodenschonend zu gestalten.

Eine Empfehlung von Grenzwerten für eine höchstzulässige Bodenbelastung ist aus der vorliegenden Arbeit heraus sicher nicht sinnvoll. Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen Hinweise auf Belastungsgrenzen ableiten: Bei mittlerer und hoher Belastung kam es in **Reinshof** auf gepflügten Böden zu drastischen Einschränkungen der Funktion des Bodens und des Wurzelwachstums bis ins dritte Versuchsjahr. Dies zeigt, schon die zweifache Überrollung mit 5t Radlast hat die Belastungsgrenze der Böden mit **LBW** überschritten. Durch die sechsfache Überrollung mit der gleichen Radlast wurde die Funktion des Bodens erheblich beeinträchtigt. Radlast und Überrollhäufigkeit sind zu begrenzen, um Bodenbelastungen im Sinne der Vorsorge zu vermeiden.

6 Zusammenfassung

Ständig schwerer werdende Landmaschinen wie Mähdrescher, selbstfahrende Köpfrödebunker, Güllefässer und Gerätekombinationen haben zu einer erheblichen Belastung vornehmlich gepflügter Ackerböden geführt. Bei hohem Wassergehalt können vor allem gepflügte Böden (Lockerbodenwirtschaft, **LBW**) belastungsempfindlich reagieren. Praktische Erfahrungen lassen die These zu, daß sich Böden mit einer flach lockernden Festboden-Mulchwirtschaft (**FMW**) im Vergleich zu gepflügten Böden gegenüber mechanischer Belastung als unempfindlicher erweisen und sich möglicherweise durch ein höheres Regenerationsvermögen auszeichnen. Vor diesem Hintergrund wurde in Südniedersachsen auf dem Standort **Reinshof** eine kolluvial überprägte Parabraunerde aus Löß und auf dem Standort **Rellehausen** eine Pseudogley-Parabraunerde aus Löß über Buntsandstein mit **LBW** und **FMW** nahe Feldkapazität im Frühjahr **1995** einer geringen, mittleren oder hohen mechanischen Belastung ausgesetzt. Als Kontrolle diente unbelasteter Boden mit **LBW** und **FMW**. Auf dem Standort **Großobringen** am Rande des Thüringer Beckens wurde tief und flach gepflügte Schwarzerde über Keuperton nach demselben Muster belastet. Auf diesem Standort wurde die Grundbodenbearbeitung mit dem Spatenpflug durchgeführt. Nach der einmaligen Bodenbelastung und der Aussaat von Sommergerste im ersten Versuchsjahr verliefen die pflanzenbaulichen Maßnahmen auf den drei Standorten betriebsüblich. Die Beobachtung der Auswirkungen der mechanischen Belastung wurde in den Jahren **1996** (Winterweizen) und **1997** (Wintergerste) fortgesetzt. Untersuchungen der bodenphysikalischen Eigenschaften, der Wurzelsysteme, des Sproßwachstums, des Gasaustausches der Pflanzen und des Kornertrags orientierten sich an der Wirkkette: mechanische Belastung → Bodeneigenschaften → Wurzelwachstum → Sproßwachstum → Ertrag.

Auf allen drei Standorten zeigte die Direktwirkung im ersten Versuchsjahr **1995** bei **LBW** einen Anstieg der Lagerungsdichte verbunden mit einer erheblichen Reduktion des Anteils grober Poren in der Krumbasis als Folge der Belastung. Dies führte zu einer drastischen Erhöhung des mechanischen Widerstandes und zu einem Absinken des Gasdiffusionskoeffizienten des Bodens bei steigender Belastung. Sowohl die Untersuchung der Wurzelsysteme als auch ein Vergleich des Sproßwachstums und des Kornertrags der Sommergerste zeigten den Effekt

der Belastung auf die bodenphysikalischen Eigenschaften der gepflügten Böden: Mit steigender Belastung wurde das Pflanzenwachstum auf allen drei Standorten erheblich eingeschränkt. Im Durchschnitt der Standorte nahm der Kornertrag der Sommergerste bei **LBW** im ersten Versuchsjahr von der Kontrolle bis zur hohen Belastung um 66 % ab. Der pflugtypischen Krumbasisverdichtung auf den Standorten **Reinshof** und **Rellehausen** kam besondere Bedeutung zu: Mit zunehmender Belastung stellte sich diese Bodenschicht als beträchtliche Durchwurzelungsbarriere dar, die bei geringer, mittlerer und hoher Belastung zu Ende der Vegetationszeit eine Reduktion der Gesamtwurzellänge im Unterboden um annähernd 80% bewirkte.

Im Vergleich zu **LBW** trat bei **FMW** eine erhebliche Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften, verbunden mit einer beträchtlichen Reduktion des Pflanzenwachstums und des Kornertrags erst bei deutlich höherer Belastung auf. Im Durchschnitt der Standorte **Reinshof** und **Rellehausen** lag der Kornertrag **1995** bei **FMW** mit hoher Belastung 30% unter dem Kornertrag auf dem Boden ohne Belastung.

In **Großobringen** zeigten der tief und der flach bearbeitete Boden mit **LBW** annähernd die gleiche Direktwirkung der Belastung wie die Böden mit **LBW** der Standorte **Reinshof** und **Rellehausen**. Die flache Bodenwendung mit dem Spatenpflug führte in **Großobringen** nicht zu einer deutlich geringeren Empfindlichkeit des Bodens gegenüber mechanischer Belastung.

Im zweiten Versuchsjahr **1996** wurden kaum belastungsabhängige Unterschiede des Pflanzenwachstums und des Kornertrags auf den drei Standorten gemessen. Der Winterweizen stellte sich gegenüber der Nachwirkung der Belastung als relativ unempfindlich dar.

Im dritten Versuchsjahr **1997** deutete in **Reinshof** auf gepflügtem Boden ein geringfügiger Anstieg der Gasdiffusionskoeffizienten bei geringer, mittlerer und hoher Belastung eine leichte Regeneration des belasteten Bodens an. Dennoch zeigte die Wintergerste kurz vor dem Ährenschieben bei mittlerer und hoher Belastung eine Reduktion der Gesamtwurzellänge im Unterboden von durchschnittlich 65 %. Die Nachwirkung der hohen mechanischen Belastung bewirkte **1997**

bei **LBW** im Vergleich zu **FMW** einen Verlust von 80% des durchwurzelten Bodens. Das Wurzelsystem der Wintergerste stellte sich im Vergleich zum Winterweizen als empfindlicher gegenüber der mechanischen Bodenbelastung dar. So wie die Wurzelsysteme, so zeigte die Bestandeshöhe der Wintergerste in **Reinshof** bei **LBW** eine Beziehung zur Belastung: Mit zunehmender Bodenbelastung war die Wuchshöhe der Pflanzen reduziert. Messungen des Gesamtwasserpotentials und des Gaswechsels am Fahnenblatt der Wintergerste in **Reinshof 1997** zeigten auf gepflügtem Boden – im Gegensatz zum gemulchten, nicht gepflügten Boden - bei hoher Belastung eine geringere CO₂- Assimilation als ohne Belastung. Dies war verbunden mit einem höheren Wasserstreß. Diese Befunde legen die Vermutung nahe, daß in **Reinshof** bei **LBW** die Nachwirkung der mechanischen Belastung bis in das dritte Versuchsjahr reichte und entsprechend der Wirkkette über veränderte Bodeneigenschaften Wurzelsystem und Sproßwachstum negativ beeinflusste.

Bei **FMW** lagen **1997** die Diffusionskoeffizienten des belasteten Bodens auf dem Niveau des unbelasteten Bodens. Belastungsabhängige Beeinträchtigungen des Wurzelsystems, der Bestandeshöhe oder des Gaswechsels wurden nicht gemessen.

In **Reinshof** wurde **1997** der Kornertrag der Wintergerste bei **LBW** und **FMW** durch die Belastung nicht verändert. Im Gegensatz dazu wurde auf den Standorten **Reliehausen** und **Großobringen** bei **LBW** in der Tendenz ein Abfall des Kornertrags bei hoher Belastung festgestellt.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, daß sich die Böden mit **FMW** im Vergleich zu **LBW** durch eine höhere Unempfindlichkeit gegen mechanische Belastung und ein höheres Regenerationsvermögen auszeichnen. Die Befunde deuten darauf hin, daß **FMW** auf geeigneten Böden dazu beitragen kann, Nebenwirkungen der Bodenbelastung zu verringern. Die Direktwirkung der hohen Belastungsstufe hat sowohl bei **LBW** als auch bei **FMW** zu einer drastischen Beeinträchtigung von Bodenfunktionen und des Pflanzenwachstums geführt. Dies deutet darauf hin, daß bei **LBW** aber auch bei **FMW** eine Begrenzung von Radlast und Überrollhäufigkeit beachtet werden muß, wenn Bodenschutz Teil der Landbewirtschaftung sein soll.

7 Literatur

- AGUIRREZABAL L. A. N., PELLERIN S. & TARDIEU F. (1993): Carbon nutrition, root branching and elongation: can the present stage of knowledge allow a predictive approach at the whole-plant level? *Environmental and Experimental Botany* **33**, 121-130.
- ALAKUKKU L. & ELONEN P. (1994): Finnish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil & Tillage Research* **29**, 151-155.
- ALBLAS J., WANINK F., van den AKKER J. & van der WERF H. M. G. (1994): Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of tillage maize in The Netherlands. *Soil & Tillage Research* **29**, 157-165.
- APEL P., LEHMANN C. O. & FRIEDRICH O. (1973): Beziehung zwischen Fahrenblattfläche, Photosyntheserate und Einzelährenertrag bei Sommerweizen. *Kulturpflanze* **21**, 89-95.
- ARVIDSSON J. & HÅKANSSON I. (1996): Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil & Tillage research* **39**, 175-197.
- ASSAEED A. M., MCGOWAN M., HEBBLETHWAITE P. D. & BRERETON J. C. (1990): Effect of soil compaction on growth, yield and light interception of selected crops. *Annals of Applied Biology* **117**, 653-666.
- ATWELL B. J. (1990): The effect of soil compaction on wheat during early tillering. 1. Growth, development and root structure. *New Phytologist* **115**, 29-35.
- BAEHR A.L. (1987): Selective transport of hydrocarbons in the unsaturated zone due to aqueous vapor phase partitioning. *Water Resources Research* **23**, 1926-1938.
- BAEUMER K. (1992): *Allgemeiner Pflanzenbau*. Ulmer, Stuttgart.
- BAEUMER K. & PAPE G. (1972): Ergebnisse und Aussichten des Anbaus von Zuckerrüben im Ackerbausystem ohne Bodenbearbeitung. *Zucker* **25**, 711-718.
- BAKKER J.W. & HIDDING A.P. (1970): The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **18**, 37-48.
- BALL B. C. (1981): Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. *Journal of Soil Science* **32**, 483-498.
- BARLEY K. P. (1962): The effect of localized pressure on the growth of roots. *Journal of Experimental Botany* **13**, 95-110.

- BARRACLOUGH P. B. & WEIR A. H. (1988): Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat. *Journal of Agricultural Science* **110**, 207-216.
- BAUMGARTL T. (1991): Spannungsverteilung in unterschiedlich texturierten Böden und ihre Bedeutung für die Bodenstabilität. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel **12**.
- BEADLE C. L. (1993): Growth analysis. In: *Photosynthesis and Production in a Changing Environment*. (Chapman & Hall, Hrsg.), Chapman & Hall, London.
- BERGMANN W. (1954): Wurzelwachstum und Ertrag. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **97**, 336-362.
- BERTRAND A.R. & KOHNKE H. (1957): Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and growths of corn roots. *Soil Science Society of America Journal* **21**, 135-140.
- BETHENOD O., TARDIEU F. & KATERJI N. (1996): Relationship between net photosynthetic rate and stomatal conductance in leaves of field-grown maize subjected to soil compaction or soil drying. *Photosynthetica* **32**, 367-379.
- BLACKWELL P. S., GREEN T. W. & MASON W. K. (1990): Response of biopore channels from roots to compression by vehicle stresses. *Soil Science Society of America Journal* **54**, 1088-1091.
- BORNSCHEUER H. (1984): Die Bodengesellschaft auf dem Systemversuch Reinshof. Diplomarbeit, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- BÖHM, W. (1979): *Methods of Studying Root Systems*. Ecological studies 33. Springer, Berlin.
- BRANDHUBER R. (1997): Mechanische Bodenbelastung durch die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Bayern. Schriftenreihe der Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau **7**, 14-19.
- BURKHART S., MANDERSCHIED R. & WEIGEL H. J. (1997): Bestandesgaswechsellmessungen an Sommerweizen unter erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen und Trockenstress. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **10**, 93-94.
- CAMPELL R. D. & MOREAU R. A. (1979): Ethylen in compacted soils and its effect on growth, tuber quality and yield of potatoes. *American Potato Journal* **56**, 199-210.
- CARMI A. & HEUER B. (1981): The role of roots in control of bean shoot growth. *Annual Botany* **48**, 519-527.

- COCKROFT B., BARLEY K.P. & GREACEN E.L. (1969): The penetration of clays by fine probes and root tips. *Australian Journal of Soil Research* **7**, 333-348.
- COLEMANN J. S. & SCHNEIDER K. M. (1996): The evidence that abscisic acid does not regulate a centralized whole-plant response to low soil-resource availability. *Oecologia* **106**, 277-283.
- COOTE D.R. & RAMSEY J.F. (1983): Qualification of the effects of over 35 years of intensive cultivation on four soils. *Canadian Journal of Soil Science* **63**, 1-14.
- CURRIE J. A. (1960): Gaseous diffusion porous media. 2. Dry granular materials. *British Journal of Applied Physics* **11**, 318-323.
- CZERATZKI W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Völkerode* **22**, 29-36.
- DAHL J. (1997): Das ökologische Mißverständnis und einiges andere zur Landwirtschaft. In: *Landwirtschaft 97. Der kritische Agrarbericht (Agrarbündnis e.V. Bonn, Hrsg.)*, ABL Bauernblattverlags-GmbH, 30-33.
- DANOWSKI M. (1995): Die Auswirkungen konventioneller Landbewirtschaftung auf die nachhaltige Fruchtbarkeit des Bodens in einem Agrarlandschaftselement des Nordostdeutschen Tieflandes. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **39**, 237-259.
- DANTUMA G. (1973): Rates of photosynthesis in leaves of wheat and barley varieties. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **21**, 181-187.
- DAVIDSON R. L. (1969): Effect of root/leaf temperature differentials on root/shoot ratios in some pasture grasses and clover. *Annals of Botany* **33**, 561-569.
- DAVIES W. J. & ZHANG J. (1991): Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **42**, 55-76.
- DEWIT C.T. (1991): On the efficiency of resource use in agriculture. In: *Ziele und Wege der Forschung im Pflanzenbau. Festschrift für Kurt Bäumer zum 65. Geburtstag (Böhm W., Hrsg.)*, Triade Verlag E. Claupein Göttingen, 29-54.
- DEXTER A. R. (1986): Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted subsoil. 3. Entry of pea and wheat roots into cylindrical biopores. *Plant and Soil* **95**, 149-161.
- DEXTER A. R. (1988): Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* **11**, 199-238.

- DIETZ T. (1991): Einfluß reduzierter Bodenbearbeitung auf Bodengefüge, Wasserhaushalt und Ertrag. *Feldwirtschaft* **32**, 347-349.
- DOMZAL H., GLINSKI J. & LIPIEC J. (1991): Soil compaction research in Poland. *Soil & Tillage Research* **19**, 99-109.
- DÖRFFLING K. (1981): Das Hormonsystem der Pflanzen. Georg Thieme, Stuttgart 96-98.
- DÜRR H. D., PETELKAU H. & SOMMER C. (1995): Literaturstudie „Bodenverdichtung“. UBA-Texte **55**, 203.
- EHLERS W. (1977): Measurement and calculation of hydraulic conductivity in horizons of tilled and untilled loess-derived soil. *Geoderma* **19**, 293-306.
- EHLERS W. (1983): Auswirkungen der Bodenbelastung mit schwerem Gerät und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und das Pflanzenwachstum. *KALI-Briefe (Büntehof)* **16**, 499-516.
- EHLERS W. (1991): Wirkung von Bearbeitungssystemen auf gefügeabhängige Eigenschaften verschiedener Böden. *Berichte über Landwirtschaft* **204** (Sonderheft), 118-137.
- EHLERS W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Ulmer, Stuttgart.
- EHLERS W. (1997): Optimizing the components of soil water balance by reduced and no-tillage. In: *Experience with Applicability of No-tillage Crop Production in West-European Countries, Proceedings of the EC-Workshop—III- Evora*, (Tebrügge F. & Böhrnsen A., Hrsg.), Wissenschaftlicher Fachverlag Gießen 107-118.
- EHLERS W., KHOSLA B.K., KÖPKE U., STÜLPNAGEL R., BÖHM W. & BAEUMER K. (1980/81): Tillage effects on root development, water uptake and growth of oats. *Soil & Tillage Research* **1**, 19-34.
- EHLERS W., KÖPKE U., HESSE F. & BÖHM W. (1983): Penetration resistance and root growth of oats in tilled und untilled loess soil. *Soil & Tillage Research* **3**, 261-275.
- EHLERS W., GOSS M. J. & BOONE F. R. (1986): Einfluß der Bodenbearbeitung auf Bodenwassergehalt, Durchwurzelung und Wasserentzug. *KALI-Briefe (Büntehof)* **18**, 107-125.
- EHLERS W. & TEIWES K. (1987): Der Einfluß der Bodenbearbeitung auf Porenraumgliederung, ungesättigte Wasserleitfähigkeit und Gasdiffusion: 1. Porenraumgliederung und Wasserleitung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **53**, 381-386.
- EHLERS W. & CLAUPEIN W. (1994): Approaches towards conservation tillage in Germany. In: *Conservation Tillage in Temperate Agroecosystems* (Carter M.R., Hrsg.), Lewis Publishers, Chelsea, Michigan (USA), 141-165.

- EHLERS W., WERNER D. & FENNER S. (1994): Reconsolidation of a deep-loosened silt loam under plowing and conservation tillage. Proc. of the 13th International Conference, ISTRO Denmark, Volume 1, 55-60.
- ELLIS F. B. & BARNES B. T. (1980): Growth and development of root systems of winter cereals grown after different tillage methods including direct drilling. *Plant and Soil* **55**, 283-295.
- ESTLER M. (1996): *Praktische Bodenbearbeitung. Grundlagen, Gerätetechnik, Verfahren, Bewertung.* DLG-Verlags- GmbH, Frankfurt, 108-109.
- ETANA A. & HÅKANSSON I. (1994): Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil & Tillage Research* **29**, 167-172.
- FENNER S. (1995): *Wirkung und Nachhaltigkeit mechanischer Lockerung von Krumenbasisverdichtungen unter Wendepflug- und Mulchwirtschaft.* Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- GALE M. D., EDRICH J. & LUPTON F. G. H. (1974): Photosynthetic rates and the effect of applied gibberellin in some dwarf, semi-dwarf and tall wheat varieties. *Journal of Agricultural Science* **83**, 43-46.
- GAMEDA S., RAGHAVAN G. S. V., MCKYES E., WATSON A. K. & MEHUYS G. (1994): Long term effects of a single incidence of high axle load compaction on a clay soil in Quebec. *Soil & Tillage Research* **29**, 173-177.
- GEISLER G. (1983): *Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas.* Paul Parey, Hamburg.
- GEISLER G. & RITZ J. (1981): Untersuchungen zur Sproß-Wurzel-Beziehung bei Weizen. 1. Eingriff in das Wurzelwachstum und deren Bedeutung für das vegetative Wachstum der Weizenpflanze. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **150**, 161-172.
- GESETZ ZUM SCHUTZ DES BODENS (1998): *Bundesgesetzblatt Jahrgang 1998, Teil 1, Nr. 16, ausgegeben zu Bonn am 24.03.1998. Vierter Teil: Landwirtschaftliche Bodennutzung, § 17: Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft.*
- GOSS M. J. (1977): Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Experimental Botany* **28**, 96-111.
- GOSS M. J., EHLERS W., BOONE F. R., WHITE I. & HOWSE K. R. (1984): Effects of soil management practice on soil physical conditions affecting root growth. *Journal of Agricultural Engineer Research* **30**, 131-140.
- GOSS M. J., HOWSE K. R. & HARRIS W. (1988): Effects of cultivation on soil water retention and use by cereals in clay soils. *Journal of Soil Science* **29**, 475-488.

- GRABLE A. R. & SIEMER E. G. (1968): Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Journal* **32**, 180-186.
- GREGORY P. J. (1994): Root growth and activity. In: *Physiology and Determination of Crop Yield*. (Boote K. J., Bennet J. M., Sinclair T. R. & Paulsen G. M., Hrsg.), American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin (USA), 65-93.
- GRUBER W. (1994): Der Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Gefügestabilität von Ackerböden. In: *Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristige Auswirkung auf den Boden* (Tebrügge F. & Dreier M., Hrsg.), Wissenschaftlicher Fachverlag Dr. Fleck, Gießen, 17-24.
- HÅKANSSON I., VOORHEES W. B., ELONEN P., RAGHAVAN G. S. V., LOWERY B., VAN WIJK A. L. M., RASMUSSEN K. & RILEY H. (1987): Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil and Tillage Research* **10**, 259-268.
- HAMMEL J. E. (1994): Effect of high axle-load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest, USA. *Soil & Tillage Research* **29**, 195-203.
- HARTGE K.H. & Bohne H. (1983): Der Einfluß der Gefügegeometrie auf Verdichtbarkeit des Bodens und auf Keimung von Roggen. *Zeitung für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **24**, 5-10.
- HARTGE K. H. & HORN R. (1991): *Einführung in die Bodenphysik*. Enke, Stuttgart.
- HILL R.L. & MEZA-MONTALVO M. (1990): Long-term wheel traffic effects on soil physical properties under different tillage systems. *Soil Science Society of America Journal* **54**, 865-870.
- HILLEL D. (1980): *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York.
- HOFFMANN C. (1993): Einfluß der Bodenverdichtung auf Wurzel- und Sproßwachstum sowie die Phosphatversorgung von Zuckerrübe und Getreide. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- HOFFMANN C. & JUNGK A. (1995): Growth and phosphorus supply of sugar beet as effected by soil compaction and water tension. *Plant and Soil* **176**, 15-25.
- HORN R. (1986): Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **149**, 9-18.

- HORN R. (1998): mündliche Mitteilungen.
- HORN R., KÜHNER S. & WIERMANN C. (1997): Was leisten Bodenbewirtschaftungsverfahren in Lehmböden für die Bodenstabilität? Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft **178**, 43-52.
- HSIAO T. C. (1993): Growth and productivity of crops in relation to water status. International symposium on irrigation of horticultural crops. Almeria, Spain, 23.-27. November 1992. Acta Horticultae **335**, 137-148.
- JOHNSON J. F., VOORHEES W. B., NELSON W. W. & RANDALL G. W. (1990): Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. Agronomy Journal **82**, 973-979.
- KAYS S. J., NICKLOW C. W. & SIMONS D. H. (1974): Ethylen in relation to the responses of roots to physical impedance. Plant and Soil **40**, 565-571.
- KÖPKE U. (1979): Ein Vergleich von Feldmethoden zur Bestimmung des Wurzelwachstums landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- LACHNO D. R., HARRISON-MURRAY R. S. & AUDUS L. J. (1982): The effect of mechanical impedance to growth of the levels of ABA and IAA in the root tips of *Zea mays* (L). Journal of Experimental Botany **136**, 943-951.
- LANGMAACK M. (1997): Mechanische Streßverträglichkeit von Bearbeitungssystemen mit reduziertem mechanischen Eingriff. Teil 4: Beitrag von Bodentieren zur mechanischen Streßverträglichkeit. Interner Arbeitsbericht, (nicht veröffentlicht).
- LANGMAACK M. (1998): Wechselwirkungen zwischen Bodenverdichtung und der Bodenfauna landwirtschaftlich genutzter Böden. Dissertation, Gemeinsame Naturwissenschaftlich Fakultät, Technische Universität, Braunschweig.
- LARCHER W. (1984): Ökologie der Pflanzen. Ulmer, Stuttgart.
- LEHFELDT J. (1988): Effects of plough pan compaction on root penetration of various crops grown on sandy and loamy soils. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde **32**, 533-539.
- LOTHSKY L., BERAN P., PARIS P. & VALIGURSKA L. (1991): Degradation of soil by increasing compression. Soil & Tillage Research **19**, 287-295.
- LOWERY B. & SCHULER R. T. (1991): Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant growth. Soil Science Society of America Journal **55**, 216-223.
- MARTINO D. L. & SHAYKEWICH C. F. (1994): Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. Canadian Journal of Soil Science **74**, 193-200.

- MASLE J. & PASSIOURA J. B. (1987): The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Australian Journal of Plant Physiology* **14**, 643-656.
- MASLE J., FARQUHAR G. D & GIFFORD R. M. (1990): Growth and carbon economy of wheat seedlings as effected by soil resistance to penetration and ambient partial pressure of CO₂. *Australian Journal of Plant Physiology* **17**, 465-487.
- MATERECHERA S. A., DEXTER A. R. & ALSTON A. M. (1991): Penetration of very strong soil by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil* **135**, 31-41.
- MATERECHERA S. A., ALSTON A. M., KIRBY J. M. & DEXTER A. R. (1992): Influence of root diameter on penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil* **144**, 297-303.
- MCAFEE M., LINDSTROM J. & JOHANNSSON W. (1989): Effects of presowing compaction on soil physical properties, soil atmosphere and growth of oats on a clay soil. *Journal of Soil Science* **40**, 707-717.
- MERTEN K. (1998): Das Wurzelbild von Winterweizen in einem verdichteten Lößboden bei unterschiedlicher Bodenbelastung. Diplomarbeit, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- MOHR H. & SCHOPFER P. (1985): *Pflanzenphysiologie*. Springer, Berlin.
- MULLHOLAND B. J., BLACK C. R., TAYLOR I. B., ROBERTS J. A. & LENTON J. R. (1996): Effect of soil compaction on barley (*Hordeum vulgare* L.). Possible role of ABA as a root sourced chemical signal. *Journal of Experimental Botany* **47**, 539-549.
- MUNNS R. & CRAMER G. R. (1996): Is coordination of leaf and root growth mediated by abscisic acid? *Opinion. Plant and Soil* **185**, 33-49.
- OUSSIBLE M., CROOKSTON R. K. & LARSON W.E. (1992): Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal* **84**, 34-38.
- PASSIOURA J. B. (1994): The yield of crops in relation to drought. In: *Physiology and Determination of Crop Yield*. (Boote K. J., Bennet J. M., Sinclair T. R. & Paulsen G. M., Hrsg.), American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin (USA), 344-359.
- PETELKAU H. & DANNOWSKI M. (1990): Effect of repeated vehicle traffic lanes on soil physical properties, nutrient uptake and yield of oats. *Soil & Tillage Research* **15**, 217-225.
- PIETOLA L. (1991): Effect of clay soil strength and structure on root penetration and crop yield. *Annales Agriculturae Fenniae* **30**, 345-358.

- RAVICHANDRAN V. & MUNGSE H. B. (1995): Effects of moisture stress on leaf area development, dry matter production and grain yield in wheat. *Annals of Plant Physiology* **9**, 117-120.
- RILEY H. (1994): The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. *Soil & Tillage Research* **29**, 211-214.
- RUHM E. (1983): Gute Voraussetzungen für eine schlechte Ernte. *Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung* **136**, 3-4.
- RUSANOV V. A. (1991): Effects of wheel and track traffic on the soil and on the crop growth and yield. *Soil & Tillage Research* **19**, 131-143.
- RUSSEL R. S. & GOSS M. J. (1974): Physical aspects of soil fertility – The response of roots to mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* **22**, 305-318.
- SCHARPENBERG D. (1986): Nichtwendende Lockerung mit dem Parapflug im Vergleich zu konventioneller und reduzierter Bearbeitung: Wirkung auf biogene Durchporung des Bodens und das Wurzelwachstum von Weizen. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Göttingen.
- SCHEFFER F. & SCHACHTSCHABEL P. (1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 11. Auflage, Enke, Stuttgart.
- SCHJØNNING P. & RASMUSSEN K.J. (1994): Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil & Tillage Research* **29**, 215-227.
- SCHOLANDER P. F., HAMMEL H. T., BRADSTREET E. D. & HEMMINGSEN E. A. (1965): Sap pressure in vascular plants. *Science* **148**, 339-346.
- SCHLICHTING E. & BLUME H.P. (1966): *Bodenkundliches Praktikum*. Paul Parey, Hamburg.
- SCHUURMAN J. J. (1965): Influence of soil density on root development and growth of oats. *Plant and Soil* **22**, 352-374.
- SOMMER C., DÜRR H. J. & ZACH M. (1995): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf den Pflanzenertrag und Schlußfolgerungen aus der Sicht des Bodenschutzes. *KTBL-Schrift* **362**, 176-188.
- SOMMER C., RUHM E. & ALTEMÜLLER H.J. (1981): Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. *KALI-Briefe (Büntehof)* **15**, 429-448.
- STAMP P & HERZOG H. (1976): Untersuchungen zur Fahnenblattalterung und zum Kornwachstum einiger deutscher Sommerweizensorten (*Triticum aestivum* L.). *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung* **77**, 330-338.

- STEWART G.A. & VYN T.J. (1994): Influence of high axle loads and tillage systems on soil properties and grain corn yield. *Soil & Tillage Research* **29**, 229-235.
- STOCKFISCH N. (1997): Strohabbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in zwei Bodenbearbeitungssystemen. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- STOCKFISCH N., EHLERS W. & EBERHARD U. (1995): Einfluß reduzierter Bodenbearbeitung auf biologische und chemische Kennwerte in verschiedenen Tiefen einer Löß-Parabraunerde. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **76**, 697-700.
- STOY V. (1973): Assimilatbildung und -verteilung als Komponente der Ertragsbildung beim Getreide. *Angewandte Botanik* **47**, 17-26.
- STÜLPNAGEL R. (1979): Ertragsbildung von Hafer auf bearbeiteten und unbearbeiteten Löß-Parabraunerden. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- TARDIEU F. (1988): Analysis of the spatial variability of mais root density. 1. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil* **107**, 259-266.
- TARDIEU F. (1994): Growth and functioning of roots and of root systems subject to soil compaction. Towards a system with multiple signalling? *Soil and Tillage Research* **30**, 217-243.
- TAYLOR H. M. & RATLIFF L. F. (1969): Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Science* **108**, 113-119.
- TAYLOR H.M., ROBERSON G.M. & PARKER J.J. JR. (1966): Soil strength – root penetration relations for medium - to coarse - textured soil materials. *Soil Science* **102**, 18-22.
- TEBRÜGGE F. & BÖHRNSEN A. (1995): Beurteilung von Bearbeitungssystemen hinsichtlich Bodenschonung und Kostenentlastung. In: *Zeitgemäße Bodenbearbeitungssysteme – verfahrenstechnisch effizient, ökologisch präzise* (AG Landtechnik und Bauwesen Hessen e.V., Hrsg.), AG Landtechnik und Bauwesen Hessen e. V., Kassel, 27-36.
- TEIWES K. (1988): Einfluß von Bodenbearbeitung und Fahrverkehr auf physikalische Eigenschaften schluffreicher Ackerböden. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- THORNE G. N. (1965): Photosynthesis of ears and flag leaves of wheat and barley. *Annual Botany* **29**, 317-329.

- THORSTENSON D.C. & POLLOCK D.W. (1989): Gas transport in unsaturated zones: Multicomponent systems and adequacy of Fick's laws. *Water Resources Research* **25**, 477-507.
- TORREY J. G. (1976): Root hormones and plant growth. *Annual Review of Plant Physiology* **27**, 435-459.
- VAN GENUCHTEN M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* **44**, 892-898.
- VETTER H. & SCHARAFAT S. (1964): Die Wurzelverbreitung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen im Unterboden. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **120**, 275-298.
- VOLKMAR K. M. (1995): A method for characterizing the effect of root-formed pores on growth of roots in a chernozemic clay loam. *Canadian Journal of Soil Science* **75**, 293-298.
- VOORHEES W.B. (1983): Relative Effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Science Society of America Journal* **47**, 129-133.
- VOORHEES W.B., SENST C.G. & NELSON W.W. (1978): Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern corn belt. *Soil Science Society of America Journal* **42**, 344-349.
- VOORHEES W. B. & LINDSTROM M. J. (1984): Long-term effects of tillage methods on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Science Society of America Journal* **48**, 152-156.
- VOORHEES W. B., JOHNSON J. F., RANDALL G. W. & NELSON W. W. (1989): Crop growth and yield as effected by surface and subsoil compaction. *Agronomy Journal* **81**, 294-303.
- WEISCHET W. (1995): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Teubner Studienbücher Geographie, Stuttgart.
- WENDROTH O. (1990): Koeffizienten des Wasser- und Gastransportes zur Ableitung von Kenngrößen des Bodengefüges. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.
- WERNER D. (1995): Mechanische Streßverträglichkeit von Bearbeitungssystemen mit reduziertem mechanischen Eingriff. Teil 2: Quantifizierung der Gefügeentwicklung unter differenzierter mechanischer Belastung durch Röntgen-,CT- und REM-Technik. Interner Arbeitsbericht, (nicht veröffentlicht).
- WERNER D. (1996): mündliche Mitteilungen.

- WERNER D. (1998): The effects of mechanical stress and regenerative soil processes on the structure of conventionally and conservationally tilled loess soil – soil physical and image analytical findings. In: Soil Compaction and Compression in Relation to Sugar Beet Production. (Märländer B., Tijink F.G.J., Hoffmann C. & Beckers R., Hrsg.), Internationales Institut für Rübenforschung, Göttingen, 21-33.
- WIERMANN C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. Dissertation, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel.
- WIERSUM L. K. (1957): The relationship of the size and the structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant and Soil* **9**, 75-85.
- WILSON A. J., ROBARDS A. W., & GOSS M. J. (1977): Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.) 2. Effects on cell development in seminal roots. *Journal of Experimental Botany* **28**, 1216-1227.
- WÖSTEN J.H.M. & VAN GENUCHTEN M.T. (1988): Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal* **52**, 1762-1770.
- XU X., NIEBER J.L. & GUPTA S.C. (1992): Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal* **56**, 1743-1750.
- YOUNG I. M., MONTAGU K., CONROY J. & BENGOUGH A. G. (1997): Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals. *New Phytologist* **135**, 613-619.
- ZADOKS J.C., CHANG T.T. & KONZAK C.F. (1974): A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* **14**, 415-421.
- ZHANG J. & TARDIEU F. (1996): Relative contribution of apices and mature tissues to ABA synthesis in droughted mais root systems. *Plant Cell Physiology* **35**, 598-605.
- ZIEGLER K. (1995): Rübentechnik – Der Siegeszug der 6-reihigen Köpfrödebunker. In: Die Zuckerrübenzeitung (Verband Süddeutscher Zuckerrübenanbauer e. V. Hrsg.) **6**, 8-9.

8 Anhang

Tab. 38: Technische Daten und Gewicht der verwendeten Fahrzeuge.

(- keine Angaben)

Standort	Reinshof u.	Reinshof u.	Großobringen	Großobringen
	Relliehausen	Relliehausen		
Fahrzeuge:	Radlader	Radlader	Kranwagen	Radlader
-Typ	O&K L 35	O&K L 15	Omega S15	Ahlmann
-Gewicht [kg]	18680	8700	19140	9780
Reifentyp:	Michelin	Dunlop	Michelin	-
	23.5R25	E91-2	1400-R24	15x5/25
-Durchmesser [cm]	149	130	-	-
-Breite [cm]	54	48	-	-
Innendruck [bar]				
-vorne	3,75	-	8,82	-
-hinten	2,00		8,82	-

Tab. 39: Kontaktflächendruck bei den Belastungsstufen. Die Angaben sind zusammengestellt nach WIERMANN 1997. (- = keine Angaben)

Standort	Reinshof		Relliehausen		Großobringen	
	LBW	FMW	LBW	FMW	LBW tief	LBW flach
Kontaktflächen- druck [kPa] bei 2. Belastungsstufe	77	111	96	105	127	-
Kontaktflächen- druck [kPa] bei 3. und 4. Belastungsstufe	150	163	185	144	107	-

Tab. 40: Die Entwicklungsstadien bei Getreide nach ZADOKS et al. (1974).

EC	Keimung
00	Trockenes Saatkorn
01	Beginn der Wasseraufnahme
03	Abschluß der Wasseraufnahme
05	Austritt der Keimwurzel aus dem Saatkorn
07	Austritt der Koleoptile
09	Blatt erreicht die Spitze der Koleoptile
	Keimtriebentwicklung
10	Auflaufen: Koleoptile durchstößt Erdoberfläche
11	1-Blatt-Stadium: 1. Blatt entfaltet
12	2-Blatt-Stadium: 2. Blatt entfaltet
13	3-Blatt-Stadium: 3. Blatt entfaltet
14-19	Viertes bis 9. und mehr Blätter entfaltet
	Bestockung
20	Nur Haupttrieb vorhanden
21	Bestockungsbeginn: Haupttrieb und 1. Bestockungstrieb
22-25	Haupttrieb und 2 bis 5 Bestockungstriebe
26	Haupttrieb und 6 Bestockungstriebe
27-29	Haupttrieb und 7-9 und mehr Bestockungstriebe
	Schossen
	Schoßbeginn: Haupt- und Nebentriebe aufgerichtet
31	1. Knoten dicht über der Erdoberfläche wahrnehmbar
32	2. Knoten wahrnehmbar. Ein Stengel hat sich gebildet.
37	Fahnenblatt gerade sichtbar
39	Blattscheide ist geschwollen
	Ligula des Fahnenblattes ist vollständig entwickelt
	Wachstum des Blütenstandes
41	Fahnenblatt-Lamina entwickelt sich
43	Oberster Halmteil schwillt an
47	Fahnenblattscheide öffnet sich
49	Erste Grannen (soweit vorhanden) sichtbar

Blütenstand tritt hervor

- 51 Beginn des Ähren- oder Rispenschiebens
- 52/53 $\frac{1}{4}$ des Blütenstandes sichtbar
- 54/55 $\frac{1}{2}$ des Blütenstandes sichtbar
- 56/57 $\frac{3}{4}$ des Blütenstandes sichtbar
- 58/59 Blütenstand voll sichtbar

Blüte

- 61 Blühbeginn: Die ersten Staubbeutel erscheinen
- 65 Vollblüte: Die meisten Ährchen haben reife Staubbeutel
- 69 Blühende: Sämtliche Ährchen haben geblüht

Reife

- 71 Kornbildung
- 73/74 Frühe Milchreife
- 75/76 Mittlere Milchreife
- 77/79 Späte Milchreife
- 83 Frühe Teigreife
- 85 Weichteigreife
- 87 Gelbreife: Korninhalt plastisch bis fest
- 91 Vollreife: Korninhalt hart; Pflanze abgestorben
- 92 Totreife: Korninhalt vollständig hart
- 93 Karyopse lockert sich über Tag
- 94 Überreife: Stroh abgestorben und zusammenbrechend
- 95 Samenruhe
- 96 lebensfähige Körner zu 50% keimfähig
- 97 Samen nicht mehr im Ruhestand
- 98 2. Ruhephase beginnt
- 99 2. Ruhephase beendet

Tab. 41: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Reinshof 1995**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm]	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm]	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
	LBW	LBW		FMW	FMW	
0t	7-13	1,39	16,3	7-13	1,46	14,0
	18-24	1,51	10,2	18-24	1,51	12,5
	30-36	1,48	12,2	30-36	1,45	15,7
	40-46	1,44	15,7	40-46	1,43	17,4
2x2,5t	7-13	1,46	15,1	7-13	1,52	12,4
	18-24	1,48	10,5	18-24	1,57	9,0
	30-36	1,52	10,4	30-36	1,43	16,4
	40-46	1,46	14,5	40-46	1,42	17,4
2x5t	7-13	1,50	12,3	7-13	1,53	11,1
	18-24	1,49	10,0	18-24	1,53	10,9
	30-36	1,50	10,4	30-36	1,48	14,3
	40-46	1,48	12,2	40-46	1,46	15,9
6x5t	7-13	1,57	7,5	7-13	1,60	7,7
	18-24	1,55	9,5	18-24	1,60	7,6
	30-36	1,52	9,9	30-36	1,56	9,5
	40-46	1,52	10,9	40-46	1,50	12,5

Tab. 42: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Reinshof 1996**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm]	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm]	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
	LBW			FMW		
		LBW		FMW		
0t	6-12	1,43	16,7	4-10	1,44	13,8
	16-22	1,49	12,1	16-22	1,51	11,5
	30-36	1,53	11,4	29-35	1,52	12,1
	40-46	1,45	15,9	40-46	1,47	15,5
2x2,5t	6-12	1,50	13,5	4-10	1,53	9,3
	16-22	1,49	13,2	16-22	1,54	9,5
	30-36	1,54	11,9	29-35	1,50	14,0
	40-46	1,50	13,5	40-46	1,49	13,9
2x5t	6-12	1,41	18,6	4-10	1,51	9,8
	15-21	1,43	15,4	16-22	1,59	7,9
	30-36	1,58	9,5	29-35	1,54	10,9
	40-46	1,46	14,4	40-46	1,54	11,4
6x5t	5-11	1,51	13,9	4-10	1,52	11,5
	13-19	1,46	14,6	16-22	1,66	6,1
	30-36	1,62	7,9	29-35	1,62	7,1
	40-46	1,53	11,6	40-46	1,52	12,1

Tab. 43: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pf 1,8 auf dem Standort **Reinshof 1997**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm] LBW	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm] FMW	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
0t	6-12	1,41	13,7	4-10	1,44	10,6
	16-22	1,37	15,9	16-22	1,54	8,4
	30-36	1,58	6,9	30-36	1,44	13,6
	40-46	1,47	12,1	40-46	1,46	12,0
2x2,5t	6-12	1,46	10,4	4-10	1,51	6,4
	16-22	1,45	12,7	18-24	1,55	7,1
	27-33	1,55	9,1	30-36	1,48	12,5
	40-46	1,48	11,1	40-46	1,44	14,6
2x5t	6-12	1,44	12,1	4-10	1,52	8,4
	16-22	1,43	12,5	17-23	1,55	7,7
	28-34	1,57	7,2	29-35	1,51	10,1
	40-46	1,48	11,3	40-46	1,44	14,4
6x5t	6-12	1,47	10,9	4-10	1,54	7,8
	16-22	1,46	13,3	17-23	1,62	6,1
	26-32	1,66	3,7	29-35	1,58	7,8
	38-44	1,55	8,0	40-46	1,51	11,0

Tab. 44: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Rellehausen 1995**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm] LBW	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm] FMW	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
		LBW			FMW	
0t	10-16	1,43	12,6	10-16	1,54	9,1
	20-26	1,39	12,6	20-26	1,51	9,0
	30-36	1,57	5,9	30-36	1,57	6,9
	45-51	1,50	8,7	45-51	1,54	7,4
2x2,5t	10-16	1,48	9,6	10-16	1,58	6,8
	20-26	1,44	10,0	20-26	1,50	9,7
	30-36	1,55	7,0	30-36	1,58	6,3
	45-51	1,53	7,3	45-51	1,51	7,2
2x5t	10-16	1,49	8,7	10-16	1,60	4,6
	20-26	1,44	8,3	20-26	1,58	7,3
	30-36	1,66	4,1	30-36	1,59	5,4
	45-51	1,56	7,3	45-51	1,57	6,7
6x5t	10-16	1,48	9,0	10-16	1,61	5,3
	20-26	1,55	7,3	20-26	1,58	6,9
	30-36	1,65	4,1	30-36	1,65	4,3
	45-51	1,58	7,3	45-51	1,54	7,8

Tab. 45: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Rellehausen 1996**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm]	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm]	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
	LBW	LBW		FMW	FMW	
0t	4-10	1,30	20,7	4-10	1,49	12,5
	16-22	1,30	21,3	16-22	1,51	9,7
	30-36	1,47	11,8	30-36	1,59	11,2
	40-46	1,52	9,6	40-46	1,51	8,8
2x2,5t	4-10	1,39	17,0	4-10	1,51	11,4
	16-22	1,40	16,2	16-22	1,52	9,9
	30-36	1,57	7,0	30-36	1,53	11,2
	40-46	1,54	7,9	40-46	1,50	8,8
2x5t	4-10	1,37	18,2	4-10	1,48	12,0
	16-22	1,43	15,3	16-22	1,58	8,1
	30-36	1,59	6,2	30-36	1,61	7,2
	40-46	1,67	5,3	40-46	1,68	5,1
6x5t	4-10	1,23	25,9	4-10	1,42	14,8
	16-22	1,29	22,7	16-22	1,62	6,7
	30-36	1,60	5,9	30-36	1,60	6,7
	40-46	1,64	4,7	40-46	1,57	6,5

Tab. 46: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Reiliehausen 1997**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm] LBW	Lagerungs- dichte [g/cm ³] LBW	Luft- kapazität [Vol. %] LBW	Boden- tiefe [cm] FMW	Lagerungs- dichte [g/cm ³] FMW	Luft- kapazität [Vol. %] FMW
0t	4-10	1,38	13,6	4-10	1,48	9,9
	14-20	1,36	15,1	16-22	1,51	9,7
	24-30	1,52	8,4	30-36	1,56	7,8
	40-46	1,45	14,3	40-46	1,50	9,7
2x2,5t	4-10	1,42	12,4	4-10	1,50	9,9
	12-18	1,39	13,8	16-22	1,51	10,2
	23-29	1,55	7,2	30-36	1,57	8,1
	40-46	1,52	9,7	40-46	1,49	10,2
2x5t	3-9	1,36	15,0	4-10	1,49	10,0
	10-16	1,36	16,0	16-22	1,53	9,4
	20-26	1,56	6,4	30-36	1,63	5,6
	40-46	1,53	10,1	40-46	1,54	6,9
6x5t	2-8	1,47	9,9	4-10	1,46	10,3
	8-14	1,45	11,7	16-22	1,56	9,0
	18-24	1,58	5,8	30-36	1,60	5,6
	40-46	1,52	9,3	40-46	1,52	9,4

Tab. 47: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Großobringen 1995**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm] LBW tief	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm] LBW flach	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
		LBW tief			LBW flach	
0t	3-11	1,32	17,0	3-11	1,26	19,2
	15-22	1,44	12,1	15-22	1,50	8,6
	28-36	1,45	12,1	28-36	1,50	8,4
	39-46	1,44	12,6	39-46	1,47	9,2
2x2,5t	3-11	1,50	6,8	3-11	1,51	6,8
	15-22	1,56	6,9	15-22	1,53	7,2
	28-36	1,41	13,0	28-36	1,50	8,7
	39-46	1,43	13,1	39-46	1,46	10,0
2x5t	3-11	1,54	5,3	3-11	1,54	5,1
	15-22	1,55	5,2	15-22	1,55	5,1
	28-36	1,53	7,3	28-36	1,53	7,2
	39-46	1,44	10,9	39-46	1,45	10,6
6x5t	3-11	1,54	5,9	3-11	1,54	5,8
	15-22	1,60	4,3	15-22	1,57	4,4
	28-36	1,51	5,6	28-36	1,53	5,6
	39-46	1,50	7,3	39-46	1,54	7,5

Tab. 48: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Großobringen 1996**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm] LBW tief	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm] LBW flach	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
0t	5-11	1,33	19,6	5-11	1,28	22,0
	16-23	1,48	11,3	16-22	1,39	15,8
	29-35	1,50	8,1	29-35	1,40	11,4
	40-46	1,45	8,4	39-45	1,43	10,4
2x2,5t	5-11	1,32	20,0	5-11	1,34	18,6
	16-22	1,49	9,9	14-20	1,51	9,9
	29-35	1,47	12,3	28-34	1,47	8,8
	40-46	1,44	10,8	39-45	1,47	10,1
2x5t	3-9	1,33	19,5	3-9	1,30	20,6
	15-21	1,49	10,3	14-20	1,42	13,6
	27-33	1,56	5,6	28-34	1,59	5,2
	39-45	1,47	10,6	39-45	1,46	8,0
6x5t	4-10	1,36	19,3	3-9	1,30	21,6
	16-22	1,55	6,8	14-20	1,52	9,2
	27-33	1,53	6,8	27-34	1,57	4,9
	40-46	1,48	9,4	41-47	1,50	7,1

Tab. 49: Lagerungsdichte und Luftkapazität bei pF 1,8 auf dem Standort **Großobringen 1997**. Die Daten sind zusammengestellt nach Angaben der TLL, Jena.

Belastungs- stufe	Boden- tiefe [cm] LBW tief	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]	Boden- tiefe [cm] LBW flach	Lagerungs- dichte [g/cm ³]	Luft- kapazität [Vol. %]
		LBW tief			LBW flach	
0t	5-11	1,40	13,2	16-22	1,42	12,0
	16-22	1,54	8,1	24-30	1,53	6,6
	30-36	1,44	10,8	30-36	1,46	7,8
	40-46	1,41	11,3	40-46	1,45	10,2
2x2,5t	5-11	1,40	12,2	14-20	1,38	13,9
	16-22	1,49	9,8	22-28	1,55	6,0
	30-36	1,43	11,1	30-36	1,42	10,1
	40-46	1,38	12,4	40-46	1,42	12,9
2x5t	4-10	1,37	14,9	12-18	1,35	14,3
	17-23	1,55	7,4	22-28	1,58	5,0
	30-36	1,43	10,2	30-36	1,49	6,8
	40-46	1,39	12,0	40-46	1,46	8,7
6x5t	5-11	1,42	14,3	12-18	1,31	18,9
	16-22	1,59	7,0	22-28	1,56	6,3
	30-36	1,55	5,3	30-36	1,53	5,5
	40-46	1,44	9,0	40-46	1,51	6,1

Tab. 50: Wurzellängendichte der Sommergerste in der Bodenmatrix (idBm) und in Bioporen (iBp) auf dem Standort **Reinshof** am 03.07.1995 (EC45).

		Wurzellängendichte [cm/cm³]														
		Bearbeitungssystem / Belastungsstufe														
entiefe m]	LBW/0t		LBW / 2x2,5t		LBW / 2x5t		LBW / 6x5t		FMW / 0t		FMW / 2x2,5t		FMW / 2x5t		FMW / 6x5t	
	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp
5	1,024	0	0,316	0	0,455	0	0,228	0	0,704	0,008	0,447	0	0,325	0	0,476	0
10	0,908	0,008	0,683	0	0,561	0	0,174	0	0,524	0,032	0,467	0,026	0,472	0,059	0,450	0
is 15	0,594	0,059	0,310	0	0,207	0,051	0,106	0	0,357	0,055	0,384	0,039	0,369	0,027	0,186	0
is 20	0,297	0,113	0,079	0,068	0,167	0,002	0,076	0	0,262	0,054	0,273	0,070	0,251	0,036	0,139	0,01
is 25	0,305	0,036	0,083	0,016	0,080	0,009	0,040	0,012	0,259	0,043	0,258	0,041	0,194	0,099	0,114	0,013
is 30	0,271	0,034	0,061	0,010	0,042	0,025	0,012	0,011	0,227	0,040	0,172	0,055	0,277	0,056	0,123	0,003
is 35	0,137	0,006	0,022	0,003	0,018	0,017	0,035	0,005	0,148	0,071	0,132	0,039	0,108	0,078	0,131	0
is 40	0,104	0,013	0,011	0,003	0,015	0,015	0,017	0,005	0,139	0,054	0,172	0,012	0,073	0,059	0,150	0,030
is 45	0,058	0,029	0,009	0,008	0,015	0,014	0,016	0,011	0,138	0,067	0,075	0,040	0,088	0,043	0,180	0,006
is 50	0,043	0,040	0,019	0,005	0,010	0,003	0,018		0,080	0,056	0,020	0,065	0,247	0,039	0,083	0,021
is 55	0,040	0,029	0,006	0,003					0,100	0,065	0,024	0,034	0,085	0,022	0,068	0,019
is 60	0,019	0,002							0,057	0,032	0,011	0,051	0,086	0,025	0,002	0,023
is 65	0,007	0,005							0,009	0,050	0,066	0,015	0,108	0,029	0,049	0,022
is 70	0,001	0,006							0,050	0,020	0,012	0,029	0,076	0,029	0,038	0,016
is 75									0,054	0,012	0,035	0,009	0,058	0,013	0,023	0,018
is 80									0,012	0,003	0,011	0,009	0,064	0,011	0,000	0,029
is 85									0,028	0,003	0,027	0,006	0,012	0,021	0,003	0,019
is 90									0,011	0,003	0,014	0,006	0,010	0,009		
is 95									0,003	0,002	0,014	0,003	0,007	0,006		
is 100											0,015	0,001	0,003	0,002		
bis105											0,003					
bis110											0,002					
bis115											0,002					

Tab. 51: Wurzellängendichte der Sommergerste in der Bodenmatrix (idBm) und in Bioporen (iBp) auf dem Standort **Reinshof** am 26.07.1995 (EC 85).

Wurzellängendichte [cm/cm ³]																
Bearbeitungssystem / Belastungsstufe																
Tiefentiefe [cm]	LBW / 0t		LBW / 2x2,5t		LBW / 2x5t		LBW / 6x5t		FMW / 0t		FMW / 2x2,5t		FMW / 2x5t		FMW / 6x5t	
	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp	idBm	iBp
bis 5	0,593	0	0,614	0	0,554	0	0,520	0	0,476	0	0,550	0	0,470	0,018	0,450	0
bis 10	0,524	0,035	0,503	0,014	0,535	0,048	0,488	0,018	0,568	0,005	0,570	0	0,725	0,051	0,766	0,003
bis 15	0,416	0,013	0,185	0,021	0,248	0,067	0,131	0,007	0,272	0	0,366	0,007	0,283	0	0,335	0
bis 20	0,296	0,067	0,105	0,036	0,107	0,019	0,111	0	0,210	0,015	0,258	0,011	0,233	0,005	0,158	0,002
bis 25	0,188	0,091	0,108	0,02	0,121	0,014	0,106	0,012	0,171	0,025	0,145	0,051	0,201	0,002	0,111	0
bis 30	0,196	0,02	0,051	0	0,083	0	0,124	0,013	0,152	0,039	0,156	0,014	0,159	0,012	0,156	0
bis 35	0,122	0,003	0,011	0,026	0,031	0	0,037	0,019	0,148	0,009	0,137	0,051	0,162	0,036	0,129	0,004
bis 40	0,090	0	0,010	0,005	0,021	0	0,010	0,015	0,108	0,005	0,045	0,042	0,153	0,032	0,103	0,005
bis 45	0,093	0,026	0,011	0,002	0,018	0,003		0,011	0,076	0,019	0,056	0,019	0,112	0,022	0,106	0,007
bis 50	0,111	0,003	0,019	0,001	0,000	0,001			0,093	0,019	0,049	0,019	0,088	0,019	0,066	0,009
bis 55	0,069	0,001	0,001	0,003	0,014	0,001			0,003	0,090	0,036	0,032	0,060	0,033	0,082	0,039
bis 60	0,038	0,005	0,004		0,001	0,007			0,059	0,009	0,038	0,005	0,086	0,003	0,082	0,062
bis 65	0,023	0,005	0,005		0,001	0,002			0,038	0,012	0,018	0,003	0,060	0,019	0,081	0,033
bis 70	0,021				0,009				0,038	0,009	0,005	0,015	0,053	0,005	0,089	0,046
bis 75	0,003				0,002				0,033	0,023	0,018	0,013	0,045	0,009	0,023	0,044
bis 80									0,013	0,012	0,014	0,002	0,022	0,009	0,035	0,009
bis 85									0,009	0,005	0,017		0,003	0,008	0,025	0,012
bis 90									0,007	0,016	0,010		0,007	0,003	0,022	0,023
bis 95									0,000	0,009	0,009		0,012	0,003	0,010	
bis 100									0,006		0,013		0,002	0,006	0,005	
0 bis 105									0,001				0,001	0,003	0,002	
5 bis 110									0,001				0,002		0,001	

Tab. 53: Wurzellängendichte des Winterweizens auf dem Standort **Reinshof** am 12.06.1996 (EC 50).

Wurzellängendichte [cm/cm ³]								
Bearbeitungssystem / Belastungsstufe								
Bodentiefe [cm]	LBW / 0t	LBW / 2x2,5t	LBW / 2x5t	LBW / 6x5t	FMW / 0t	FMW / 2x2,5t	FMW / 2x5t	FMW / 6x5t
0 bis 5	0,941	0,895	0,965	0,767	0,883	0,841	0,789	0,736
5 bis 10	0,945	0,765	0,648	0,696	0,675	0,598	0,569	0,510
10 bis 15	0,710	0,998	0,795	0,708	0,335	0,458	0,548	0,360
15 bis 20	0,615	0,554	0,459	0,548	0,359	0,469	0,125	0,425
20 bis 25	0,551	0,425	0,325	0,474	0,167	0,169	0,299	0,339
25 bis 30	0,318	0,365	0,399	0,290	0,124	0,125	0,320	0,230
30 bis 35	0,269	0,236	0,125	0,167	0,160	0,265	0,400	0,310
35 bis 40	0,260	0,256	0,222	0,158	0,159	0,211	0,159	0,187
40 bis 45	0,136	0,154	0,329	0,102	0,123	0,154	0,143	0,100
45 bis 50	0,100	0,269	0,026	0,079	0,056	0,089	0,125	0,137
50 bis 55	0,075	0,059	0,098	0,093	0,064	0,048	0,125	0,137
55 bis 60	0,067	0,024	0,098	0,148	0,089	0,090	0,110	0,088
60 bis 65	0,078	0,020	0,098	0,155	0,122	0,130	0,025	0,058
65 bis 70	0,022	0,010	0,075	0,139	0,100	0,090	0,050	0,077
70 bis 75	0,013	0,001	0,002	0,049	0,060	0,035	0,006	0,034
75 bis 80	0,005	0,002	0,009	0,004	0,047	0,006	0,001	0,026
80 bis 85	0,019	0,002	0,008	0,001	0,057	0,005	0,001	0,019
85 bis 90	0,019	0,001			0,050	0,004	0,001	0,006
90 bis 95	0,010	0,001			0,045	0,001	0,001	0,013
95 bis 100	0,001	0,001			0,012	0,001	0,002	0,001
100 bis 105	0,001	0,001			0,001	0,005	0,001	
105 bis 110	0,001				0,001		0,001	
110 bis 115	0,003				0,001		0,001	
115 bis 120	0,001				0,001			
120 bis 125	0,001							

Tab. 54: Wurzellängendichte des Winterweizens auf dem Standort **Reinshof** am 17.07.1996 (EC 71).

Wurzellängendichte [cm/cm ³]								
Bearbeitungssystem / Belastungsstufe								
Bodentiefe [cm]	LBW / 0t	LBW / 2x2,5t	LBW / 2x5t	LBW / 6x5t	FMW / 0t	FMW / 2x2,5t	FMW / 2x5t	FMW / 6x5t
0 bis 5	0,844	0,939	0,860	0,973	0,874	0,845	0,701	0,765
5 bis 10	0,824	0,960	0,540	0,711	0,972	0,740	0,625	0,635
10 bis 15	0,783	0,588	0,780	0,609	0,685	0,690	0,623	0,387
15 bis 20	0,618	0,712	0,632	0,593	0,458	0,359	0,316	0,318
20 bis 25	0,590	0,450	0,490	0,429	0,433	0,546	0,322	0,304
25 bis 30	0,421	0,365	0,590	0,380	0,428	0,455	0,326	0,215
30 bis 35	0,210	0,215	0,149	0,193	0,338	0,326	0,336	0,173
35 bis 40	0,189	0,189	0,125	0,121	0,253	0,265	0,365	0,130
40 bis 45	0,188	0,204	0,125	0,129	0,274	0,265	0,256	0,070
45 bis 50	0,179	0,165	0,120	0,126	0,244	0,265	0,215	0,069
50 bis 55	0,136	0,199	0,129	0,224	0,188	0,244	0,158	0,071
55 bis 60	0,122	0,099	0,100	0,130	0,125	0,265	0,125	0,056
60 bis 65	0,098	0,098	0,045	0,089	0,083	0,154	0,089	0,074
65 bis 70	0,098	0,048	0,058	0,085	0,071	0,099	0,056	0,064
70 bis 75	0,043	0,045	0,056	0,041	0,081	0,054	0,046	0,034
75 bis 80	0,067	0,015	0,035	0,015	0,044	0,025	0,059	0,051
80 bis 85	0,040	0,020	0,025	0,017	0,047	0,011	0,045	0,056
85 bis 90	0,028	0,026	0,036	0,011	0,057	0,009	0,066	0,037
90 bis 95	0,029	0,003	0,006	0,004	0,028	0,006	0,003	0,038
95 bis 100	0,010	0,002	0,006	0,001	0,055	0,006	0,002	0,023
100 bis 105	0,001	0,001	0,004		0,022	0,001	0,001	
105 bis 110	0,001	0,001	0,001		0,006	0,001	0,001	
110 bis 115	0,004				0,004		0,001	
115 bis 120					0,001			
120 bis 125					0,001			

Tab. 57: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf dem Standort **Reinshof** für die Bearbeitungssysteme Lockerbodenwirtschaft (**LBW**) und Festboden-Mulchwirtschaft (**FMW**) in den Jahren 1995 bis 1997.

Datum	Maßnahme	Beschreibung
12./13.04.95	Versuchsanlage	
13.04.95	Saatbettbereitung	Kreiselegge, Tiefe: 10cm
13.04.95	Aussaat	Sommergerste, Sorte: Maresi
20.04.95		Feldaufgang
18.05.95	N-Düngung	40 kg N/ha als Kalkammonsalpeter
06.06.95	Herbizideinsatz	1l/ha Starane + 1l/ha Duplo DP + 1,5l/ha IPU
15.08.95	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense
28.08.95	Stoppelbearbeitung	Kreiselegge, Tiefe: 5cm
18.09.95	Stoppelbearbeitung	Kreiselegge, Tiefe: 5cm, 2 x diagonal
05.10.95	Grundbodenbearbeitung	LBW : Streichblechpflug, Tiefe: 25cm FMW : keine Bearbeitung
06.10.95	Saatbettbereitung	Kreiselegge, Tiefe: 5cm
06.10.95	Aussaat	Winterweizen, Sorte: Pequital
16.10.95		Feldaufgang
27.03.96	Herbizideinsatz / + N-Düngung	1,3 l/ha IPU + 72 kg N/ha als Ammonitrat-Harnstofflösung
08.05.96	N-Düngung/ + Herbizideinsatz/ + Halmverkürzer	20 kg N/ha als Ammonitrat-Harnstofflösung + 0,6 l/ha Starane + 1,0 l/ha Optica NP + 0,8 l/ha Chlorcholinchlorid
14.06.96	Fungizideinsatz	1,3 l/ha Opus Top
17.06.96	N-Düngung	60 kg N/ha als Kalkammonsalperter
23.08.96	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense
04.09.96	Stoppelbearbeitung	Kreiselegge, Tiefe: 5cm, 2 x diagonal
23.09.96	Grundbodenbearbeitung	LBW : Streichblechpflug, Tiefe: 25cm FMW : keine Bearbeitung
23.09.96	Stoppelbearbeitung	Kreiselegge, Tiefe: 5cm
23.09.96	Aussaat	Wintergerste, Sorte: Theresa
03.10.96		Feldaufgang
11.03.97	N-Düngung	70 kg N/ha als Kalkammonsalperter
10.04.97	Herbizideinsatz	0,6 l/ha Ralon Super + 0,6 l/ha Starane (+ 1,0 l/ha Oleo)
25.04.97	Herbizideinsatz	2,0 l/ha IPU 500
22.07.97	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense

Tab. 58: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf dem Standort **Reliehausen** für die Bearbeitungssysteme Lockerbodenwirtschaft (**LBW**) und Festboden-Mulchwirtschaft (**FMW**) in den Jahren 1995 bis 1997.

Datum	Maßnahme	Beschreibung
25./26. 04.95	Versuchsanlage	
26.04.95	Saatbettbereitung/ Aussaat	Kreiseldrillkombination Sommergerste, Sorte: Maresi
05.05.95		Feldaufgang
24.05.95	N-Düngung	46 kg N/ha als Harnstoff
01.09.95	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense
07.09.95	Stoppelbearbeitung	Scheibenegge, Tiefe: 7cm
16.10.95	Stoppelbearbeitung	Kreiselegge, Tiefe 5cm, 2 x diagonal
31.10.95	Grundbodenbearbeitung	LBW : Streichblechpflug, Tiefe: 25cm FMW : keine Bearbeitung
01.11.95	Saatbettbereitung/ Aussaat	Kreiselegge + Walze/ Winterweizen, Sorte: Zentos
12.11.95		Feldaufgang
08.05.96	N-Düngung/ Herbizideinsatz/ Halmverkürzer	73 kg N/ha als Ammonnitrat-Harnstoff- lösung + 1,5 l/ha Lumeton + 0,5 l/ha Chlorcholinchlorid
14.06.96	N-Düngung/ Fungizideinsatz/ Wachstumsregler	46 kg N/ha als Harnstoff + 0,7 l/ha Opus Top + 0,4 l/ha Zenit
04.09.96	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense
12.09.96	Stoppelbearbeitung	Scheibenegge, Tiefe 10cm
18.09.96	Grundbodenbearbeitung	LBW : Streichblechpflug, Tiefe: 25cm FMW : keine Bearbeitung
23.09.96	Saatbettbereitung/ Aussaat	Kreiseldrillkombination, Wintergerste, Sorte: Theresa
02.10.96		Feldaufgang
12.03.97	N-Düngung/ Herbizideinsatz	72 kg N/ha als Ammonnitrat-Harnstoff- lösung + 0,6 l/ha Fenikan + 1,4 l/ha IPU
15.05.97	Fungizideinsatz/ Wachstumsregler	0,5 l/ha Zera + 0,7 l/ha Juwel + 0,7 l/ha Chlorcholinchlorid
20.05.97	N-Düngung	46 kg N/ha als Harnstoff
30.07.97	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense

Tab. 59: Pflanzenbauliche Maßnahmen auf dem Standort **Großbringen** für die Bearbeitungssysteme Lockerbodenwirtschaft tief (**LBW tief**) und Lockerbodenwirtschaft flach (**LBW flach**) in den Jahren 1995 bis 1997.

Datum	Maßnahme	Beschreibung
23./24. 03.95	Versuchsanlage	
27.03.95	Saatbettbereitung	mehrmaliges Grubbern der Varianten 6x5t
03.04.95	Sattbettbereitung/ Aussaat	Kombinationsdrillmaschine Sommergerste, Sorte: Maresi
13.04.95		Feldaufgang
03.05.95	Herbizideinsatz	0,7 l/ha Starane + 25 g/ha Pointer
29.05.95	Herbizideinsatz	0,7 l/ha M-Fluid A
14.08.95	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense
16.08.95	Stoppelbearbeitung	Schwergrubber, Tiefe: 10cm
08.09.95	Grundbodenbearbeitung	LBW tief: Spatenmaschine, Tiefe: 25cm LBW flach: Spatemaschine, Tiefe: 12cm
16.10.95	Saatbettbereitung/ Aussaat	Kombinationsdrillmaschine Winterweizen, Sorte: Aron
28.10.95		Feldaufgang
23.04.96	Striegeln	Striegel
27.04.96	N-Düngung	81 kg N/ha als Kalkammonsalpeter
14.06.96	N-Düngung	40 kg N/ha als Ammonnitrat-Harnstoff- lösung
23.08.96	Ernte	Ernteparzellen mit der Sense
10.09.96	Abschlägeln der Stoppeln	Schlägelhäcksler
12.09.96	Stoppelbearbeitung	Scheibenegge, Tiefe: 7cm
20.09.96	Grundbodenbearbeitung	LBW tief: Spatenmaschine, Tiefe: 25cm LBW flach: Spatemaschine, Tiefe: 12cm
01.10.96	Sattbettbereitung/ Aussaat	Kombinationdrillmaschine Wintergerste, Sorte: Grete
10.10.96		Feldaufgang
04.11.96	N-Düngung	30 kgN/ha als Ammoniumsulfat
07.03.97	N-Düngung	54 kgN/ha als Kalkammonsalpeter
02.04.97	Herbizideinsatz	0,7 l/ha Starane + 25 g/ha Pointer
06.05.97	N-Düngung	72 kgN/ha als Ammonnitrat-Harnstoff- lösung
12.05.97	Herbizideinsatz	1,0 l/ha Starane + 25 g/ha Pointer

Dank

Mein herzlichster Dank gilt meiner lieben Anke und meinen Kindern Mathis und Lena. Sie zeigten mir immer wieder mit ihrem Lachen, was für mich wirklich wichtig ist.

Ganz besonderer Dank soll meinen Eltern zukommen. Sie unterstützten mich wo immer sie konnten mit Rat und Tat.

Herrn Prof. Dr. Wilfried Ehlers danke ich für die Bereitstellung des interessanten Themas, für seine Unterstützung bei der Planung, Durchführung und Auswertung der Feldversuche und für seine wertvolle Hilfe bei der Fertigstellung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Michael Runge danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Herrn Dr. habil. Dietrich Werner von der TLL Jena bin ich sehr dankbar für seine wertvolle Unterstützung bei den Feldversuchen und für die Bereitstellung seiner Meßergebnisse.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Klaus George. Er übernahm die Führung der Feldversuche auf dem Standort Großobringen.

Allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen „unseres“ DFG-Forschungsvorhabens sei an dieser Stelle für ihre Hilfe gedankt.

Mein aufrichtiger Dank gilt allen Kräften des Institutes für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, die durch ihre sorgfältige und ausdauernde Arbeit zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnt werden soll Frau Anita Bartlitz. Ohne ihren Einfluß hätte die Datenerfassung leicht zu einem Chaos werden können.

Meinen Kolleginnen und Kollegen Annette Muhs, Barbara Hohlmann, Dr. Thomas Forstreuter und Helmut Kimpel-Freund danke ich herzlich für die freundschaftliche Zusammenarbeit und die stets aufschlußreiche und erfrischende Diskussion privater und innerbetrieblicher Zusammenhänge.

Frau Dr. Friederike de Mol danke ich herzlich für die kritische Durchsicht des Textes und das so manches Mal gewährte Obdach.

Herrn Dr. Stefan Fenner danke ich für die Einführung in die Geheimnisse der Gasdiffusion und der ungesättigten Wasserleitfähigkeit in Böden.

Herrn Christian Sirie und seinen Mitarbeitern vom Versuchsgut Relliehausen sei für die sorgfältige und zuverlässige Durchführung aller notwendigen Arbeiten auf dem Standort Relliehausen gedankt.

Der Firma Orenstein und Koppel gilt mein Dank für die unkomplizierte Bereitstellung der Radlader.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Karl-Theodor Mähner
Geburtstag: 28.10.1963
Geburtsort: Hamm/ Westfalen
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig, zwei Kinder

Schulbildung:

1970 bis 1974 Grundschule in Hamm / Westfalen
1974 bis 1984 Gymnasium in Hamm / Westfalen
Mai 1984 Allgemeine Hochschulreife

1984 bis 1985 Grundwehrdienst in Flensburg

Berufsausbildung:

Ausbildung zum staatlich geprüften landwirtschaftlichen Gesellen:

1985 bis 1986 erstes Lehrjahr auf dem Hof Friedrich Wilms-Schulze Kump in Hamm/Westfalen
(120 Hektar Ackerbau, Schweinemast und Ferkelaufzucht)

1986 bis 1987 zweites Lehrjahr auf dem Hof Franz Kaiser in Süddinker / Westfalen
(35 Hektar Weide / Futterbau, 10 Hektar Ackerbau und 28 Milchkühe mit Kälberaufzucht)

Juni 1987 Abschlußprüfung an der Landwirtschaftskammer Westfalen/Lippe

Hochschulausbildung:

1987 bis 1991 Grundstudium Agrarwissenschaften an der Universität Göttingen

1991 bis 1994 Hauptstudium Agrarwissenschaften (Fachrichtung Pflanzenbau) an der Universität Göttingen

Diplomarbeit: Die Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf die Evaporation eines syrischen Vertisols

1994 Erfolgreicher Abschluß des Studiums zum Dipl.-Ing. agr

Berufstätigkeit:

1995 bis 1998 Wissenschaftlicher Angestellter der Universität Göttingen,
 Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Auslandspraktika:

Mai - Juli 1989 Aufenthalt in Syrien und Ägypten. Praktikum Trockenfeldbau

Juli - Sept.1990 Aufenthalt in Costa Rica. Praktikum Kaffeeanbau.

Juni - Aug.1992 Aufenthalt in Malaysia/Borneo. Praktikum Tee- und
 Ölpalmenanbau.

Okt.'92-April'93 Aufenthalt in Syrien. Wissenschaftlicher Angestellter am
 International Center For Agricultural Research In Dry Areas
 (ICARDA).