



Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut für Meteorologie (BOKU-Met)

Betreuer:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Eitzinger

und

O.Univ.Prof. Dr.phil. Helga Kromp-Kolb

**DER EINFLUSS VON KLIMAÄNDERUNG, BODENBEARBEITUNG UND
SAATTERMIN AUF DEN WASSERHAUSHALT UND DAS ERTRAGS-
POTENTIAL VON GETREIDE IM MARCHFELD**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von

Dipl.-Ing. Pablo Rischbeck

Wien, September 2007

Danksagung

Diese Dissertation wurde durch ein Stipendium des Programms
AKTION Tschechische Republik - Österreich
im Rahmen der "Tandemdissertationsnetzwerke" unterstützt.

Diese Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem
Ústav agrosystémů a bioklimatologie an der MZLU Brno.

Besonderer Dank für Ihre Unterstützung gilt den KollegInnen Sabina Thaler, Petr Hlavinka, Zdeněk Žalud, Miroslav Trnka, Jochen Wagner, Philipp Weihs, Stana Simič, Wolfgang Laube, Grzegorz Gruszczynski, Petra Seibert, Susanna Ostertag, Patrick Haas, Irene Schicker, Thomas Gerersdorfer, Martin Dubrovsky, Peter Cepuder, Gerhard Kammerer, Andreas Klik, Yunes Sufi, Friedrich Forster, Alina Busch-Petersen, Johanna Hofmann, Karl Haigner, Willibald Loiskandl, Sabine Klepsch, Herbert Formayer, Michael Scheck, Helmut Wagenristl, Klaus Ofner, Hans-Jörg Schlichtner, Živka Marinkovič und Martin Bernhard Franziskus Fuchs.

Vorwort

Die Landwirtschaft ist sowohl Mitverursacherin als auch Betroffene des anthropogenen Klimawandels (ALVA 2004). Die Agrarindustrie und die LandwirtInnen wurden durch die Politik aufgefordert, ihre Verantwortung für die Reduktion von Treibhausgasen und den Klimaschutz wahr zu nehmen. Die Österreichische Klimastrategie (BMLFUW 2002) legte im Rahmen der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls für die österreichische Landwirtschaft ein Reduktionsziel von -48% der Treibhausgasemissionen bis 2012 gegenüber dem Referenzniveau von 1990 fest. Bis 2005 wurden die Emissionen aus der Landwirtschaft tatsächlich nur um -14,3% reduziert (Umweltbundesamt 2007), bei Fortsetzung dieses Trends werden die Ziele verfehlt.

Aber selbst bei Erreichen der Ziele der Kyoto-Konferenz wird ein globaler Klimawandel stattfinden (Kromp-Kolb und Formayer 2005). Berechnungen mit globalen Zirkulationsmodellen ermittelten, abhängig von der Entwicklung der Treibhausgasemissionen, eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um 1,4-5,8°C bis zum Jahr 2100 (IPCC 2001). Der globale Klimawandel wirkt sich auch auf regionaler Ebene aus. Im Rahmen der Studie *reclip:more* (Gobiet et al. 2007) wurden für Ostösterreich bis 2050 zunehmend wärmere und aridere Bedingungen während der Vegetationsperiode berechnet.

Die Landwirtschaft im semi-ariden Marchfeld ist vom Klimawandel über eine Veränderung der Bedingungen des Pflanzenwachstums direkt betroffen (Cajic 2003, Eitzinger et al. 2003). Auch im Zusammenhang mit dem Klimawandel werden von Bäuerinnen und Bauern, Angehörigen der Landwirtschaftskammern (z.B. Humer 2006) und anderer Institutionen und Unternehmen sowie AgrarwissenschaftlerInnen verschiedene Anpassungsstrategien für den Marktfruchtbau in der Region Marchfeld diskutiert. Darunter ist die Verwendung trockenheitsresistenter Sorten, die Anpassung der Saattermine und der Verzicht auf den Pflug.

Eine mögliche pflanzenbauliche Maßnahme ist der Ersatz des Pflugs durch Minimalbodenbearbeitung und Direktsaat. Dieser Schritt bietet sowohl arbeitstechnische und wirtschaftliche (Schlichtner 2003, Stadler et al. 2005) als auch pflanzenbauliche Vorteile. Verschiedene Studien belegen, dass die Minimalbodenbearbeitung zum Erosionsschutz beiträgt, das Bodenleben schont (Hofmann 2005) und die nutzbare Feldkapazität – und damit die Wasserversorgung der Pflanzen – erhöht (Kosutič et al. 2001, Rischbeck 2004). In vielen semi-ariden Gebieten, wie z.B. Teilen Australiens und der USA (Frazee 2006), wird die Minimalbodenbearbeitung erfolgreich zur Stabilisierung der Erträge im Getreidebau angewandt. Wie weit die Minimalbodenbearbeitung unter den Bedingungen des Klimawandels für die Region Marchfeld geeignet ist, soll in dieser Arbeit geklärt werden.

Mögliche Nachteile der Minimalbodenbearbeitung sind der verstärkte Krankheits- (z.B. Fusarium) und Beikraut/Beigrasdruck (Davies et al. 2006). Die Firma Monsanto (Monsanto 2007) bewirbt in diesem Zusammenhang den Einsatz von Minimalbodenbearbeitung in Verbindung mit gentechnisch veränderten, glyphosatresistenten Kulturpflanzen und den Einsatz von Glyphosat als Totalherbizid. Dieses Paket kann nicht als nachhaltige Strategie bezeichnet werden. Eine Studie aus den USA (Benbrook 2004) führte zu dem Ergebnis, dass der einseitige und dauerhafte Einsatz von Glyphosat zu Resistenzerscheinungen bei kanadischem Berufskraut, Fuchsschwanz und Ryegrass geführt hat. Diese drei Arten, insbesondere Fuchsschwanz, sind auch im Marchfeld bedeutende Beikräuter/Beigräser.

Eine Umstellung der Bodenbearbeitung sollte vielmehr in ein nachhaltiges Konzept des Erhalts der natürlichen Bodenfruchtbarkeit, und damit einem langfristigen Erhalt der Produktivität, integriert werden. Hierfür geeignet sind leguminosenstarke und getreide/maisarme Fruchtfolgen und die weitestgehend mechanische und biologische Beikraut- und Krankheitskontrolle. Im Sinne des

Klimaschutzes sollte der Verbrauch energieintensiver Betriebsmittel (fossile Treibstoffe, Pestizide, N-Dünger) reduziert werden. Der ökologische Landbau (siehe Klik et al. 2005/MUBIL II, Rodale Institute 2007) und das Österreichische Programm für eine umweltgerechte und den natürlichen Lebensraum schützende Landwirtschaft (ÖPUL) bieten hier positive Impulse.

Kurzfassung/Abstract

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob eine Umstellung der Bodenbearbeitung und eine Verschiebung der durchschnittlichen Saattermine geeignete Strategien für die Region Marchfeld zur Anpassung des Getreidebaus an den Klimawandel sind. Auf Grundlage eines Bodenbearbeitungsversuchs am Standort Raasdorf (NÖ) wurde eine Pflanzenwachstumssimulation für Winterweizen und Sommergerste für die Region Marchfeld durchgeführt. Die Simulation führte zum Ergebnis, dass der Ersatz des Pflugs durch Minimalbodenbearbeitung und Direktsaat zu einer Steigerung der nutzbaren Feldkapazität der Böden, zu einer besseren Wasserversorgung der Kulturpflanzen und zu einer Verringerung der unproduktiven Wasserverluste führt. Das Ertragspotential im Marchfeld erhöht sich unter gegenwärtigen Klimabedingungen (=1971-2005) bei einer Umstellung um +1,4% bei Winterweizen und um +2,6% bei Sommergerste (nur auf den Faktor Bodenbearbeitung zurück zu führen).

Der Klimawandel erfordert eine Verschiebung des durchschnittlichen Saattermins bei Winterweizen um maximal 14 Tage von 14. Oktober auf den 16. Oktober (HadCM 2025 LOW) bis 28. Oktober (HadCM 2050 HIGH). Bei Sommergerste soll die Saat aufgrund des Klimawandels vorverlegt werden. Sie soll von durchschnittlich 14. März auf 7. März (HadCM 2050 HIGH) bis 12. März (HadCM 2025 LOW und 2050 LOW) verschoben werden. Das Ertragspotential steigt bei Winterweizen, vor allem aufgrund eines CO₂ Düngungseffekts, um +4,8% (2025 LOW, Pflug) bis +12,3% (2050 HIGH, Pflug) an. Bei Sommergerste führt zunehmende Aridität zu einer Senkung des Ertragspotentials um -1,9% (2025 HIGH) bzw. zu einer Stagnation mit +0,1% (2050 HIGH). Die Bedeutung der Minimalbodenbearbeitung zur Verringerung von Trockenstress bei Getreide nimmt bei zunehmend ariden Bedingungen im Zuge des Klimawandels zu.

Schlagwörter: Minimalbodenbearbeitung, Klimawandel, Saattermin, Weizen, Gerste

Within the scope of this work it was examined, whether an adjustment of tillage and a shift of average sowing dates are adequate strategies to adapt cereal cultivation in the Marchfeld region (Eastern Austria) towards climate change. Based on a tillage field trial at Raasdorf (Lower Austria) plant growth of winter wheat and spring barley in the Marchfeld region was simulated. The replacement of the plough by minimum tillage and direct drilling leads to an increase of plant available field capacity, a better water supply for the cereal crops and a decrease of unproductive water losses. Due to a replacement the yield potential of winter wheat in the Marchfeld region increases under present climate conditions (1971-2005) by +1,4% and for spring barley by +2,6% (only due to the factor tillage).

Climate change demands a delay of the average sowing date of winter wheat of max. 14 days from Oct. 14th to Oct. 16th (HadCM 2025 LOW) or Oct. 28th (HadCM 2050 HIGH). In the case of spring barley climate change demands an earlier average sowing date, it should be shifted from Mar. 14th to Mar. 7th (HadCM 2050 HIGH) or Mar. 12th (HadCM 2025 LOW und 2050 LOW). Yield potential of winter wheat increases, especially due to the CO₂-fertilizing effect, by +4,8% (2025 LOW, plough) to +12,3% (2050 HIGH, plough). For spring barley increased aridity leads to a decrease of the yield potential by -1,9% (2025 HIGH) and to a stagnation in the long run (2050 HIGH). The increasing aridity due to climate change enhances the importance of minimum tillage for the mitigation of drought stress for cereal crops.

Keywords: minimum tillage, climate change, sowing date, wheat, barley

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	9
1 Einleitung	13
1.1 Rahmenbedingungen des Getreidebaus in Ostösterreich	13
1.1.1 Europäische Agrarpolitik und Getreidepreise	13
1.1.2 Die Agrarstruktur im Untersuchungsgebiet Marchfeld.	14
2 Derzeitiger Stand des Wissens	17
2.1 Agrarökologische Beschreibung des Marchfelds.	17
2.1.1 Die Böden im Marchfeld	17
2.1.2 Das Agrarklima im Marchfeld	19
2.2 Der Bodenwasserhaushalt	21
2.2.1 Bodeneigenschaften und Bodenwasser.	22
2.2.2 Die Bewegungen des Bodenwassers	25
2.2.3 Die Wasserleitfähigkeit im Boden	26
2.3 Die Wirkung der Bodenbearbeitung auf Boden und Nutzpflanzen.	27
2.3.1 Lagerungsdichte und Porenanteil	28
2.3.2 Pflugsohlenbildung.	30
2.3.3 Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens	30
2.3.4 Infiltration und kapillarer Aufstieg	32
2.3.5 Energiehaushalt des Bodens	33
2.3.6 Aggregatstabilität und Erosion.	33
2.3.7 Humus und Mulch	33
2.3.8 Bodenleben und Pflanzenschutz	34
2.3.9 Die Wirkung der Egge auf das Bodengefüge	35
2.3.10 Das Dickenwachstum von Ernteorganen	36
2.4 Die Reaktion von Nutzpflanzen auf Trockenstress	37
2.4.1 Der Wasserhaushalt der Getreidepflanze	37
2.4.2 Die physiologische Wirkung von Trockenstress	40
2.4.2.1 Ertragsphysiologie und Trockenstress im Getreidebau.	41
2.4.3 Die Züchtung trockenresistenter Sorten.	42
2.5 Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wachstum und Ertrag von Nutzpflanzen im Marchfeld	42
3 Zielsetzung	46

4	Datengrundlagen, Material und Methoden	48
4.1	Bodenphysikalische Untersuchungen	48
4.1.1	Korngrößenverteilung	48
4.1.2	Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung (pF-Kurve)	49
4.2	Feldversuch in Raasdorf	51
4.2.1	Die Eigenschaften des Versuchsstandorts	51
4.2.2	Versuchsanlage	53
4.2.3	Datenerhebung	54
4.2.4	Messtechnik	55
4.2.5	Die Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers	56
4.3	Die Simulation des Pflanzenwachstums	56
4.3.1	CERES/DSSAT	56
4.3.2	Die Datenbasis der Simulation.	58
4.3.3	Bodendaten und Klassenbildung	58
4.3.4	Die Charakterisierung der gebildeten Bodenklassen für das Marchfeld	60
4.3.5	Kalibration und Validierung der Sorten	61
4.3.6	Die Erzeugung von synthetischen Wetterdaten	65
4.3.7	Analyse der Klimaszenarien	68
4.3.8	Ausgabe, Bearbeitung und Darstellung der Simulationsergebnisse	70
5	Ergebnisse und Diskussion	74
5.1	Ergebnisse und Diskussion der bodenphysikalischen Untersuchungen.	74
5.1.1	Korngrößenverteilung	74
5.1.2	Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung (pF-Kurve)	75
5.2	Ergebnisse und Diskussion des Feldversuchs in Raasdorf	75
5.2.1	Der Witterungsverlauf während der Versuchsjahre	75
5.2.2	Die volumetrischen Wassergehalte im Ackerboden.	77
5.2.3	Die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen bearbeitetem und unbearbeitetem Ackerboden	80
5.2.4	Das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Wurzelraum	81
5.2.5	Die Erträge der Feldfrüchte	82
5.3	Ergebnisse und Diskussion der Pflanzenwachstumssimulation	85
5.3.1	Ergebnisse und Diskussion der Simulation für Winterweizen.	85
5.3.1.1	Die Veränderung der Phänologie bei Winterweizen	85
5.3.1.2	Der Wasserhaushalt bei Winterweizen	87

5.3.1.3	Die Veränderung des Ertragspotentials bei Winterweizen	93
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion der Simulation für Sommergerste	100
5.3.2.1	Die Veränderung der Phänologie bei Sommergerste.	100
5.3.2.2	Der Wasserhaushalt bei Sommergerste	102
5.3.2.3	Die Veränderung des Ertragspotentials bei Sommergerste	106
6	Zusammenfassung	112
7	Literaturverzeichnis	114
	Tabellenverzeichnis	120
	Abbildungsverzeichnis	122
8	Anhang	126
9	Abkürzungsverzeichnis	154
10	Lebenslauf	155

1 Einleitung

1.1 Rahmenbedingungen des Getreidebaus in Ostösterreich

1.1.1 Europäische Agrarpolitik und Getreidepreise

Die europäische Landwirtschaft ist mit sich ändernden politischen, ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen konfrontiert. Die Auswirkungen dieser Änderungen sind sowohl auf nationaler als auch auf regionaler Ebene spürbar. Die aktuelle Gemeinsame Agrarpolitik (GAP, Europäische Kommission 2005) läuft im Jahr 2013 aus. Die Zukunft dieses Instruments wird bereits kontroversiell diskutiert. Im Zuge der Erweiterung der EU sind die Agrarförderungen und Maßnahmen der GAP auf die neuen Mitgliedsstaaten ausgeweitet worden. Unter diesen Staaten befinden sich Länder wie die tschechische Republik, die über eine groß strukturierte, intensive Landwirtschaft verfügt. Gleichzeitig sind darunter Länder wie die Republik Polen in denen eine eher kleinteilige, bäuerlich geprägte Landwirtschaft vorherrscht. Vor allem bei solch kleinteiligen Strukturen werden hohe Ausgaben befürchtet. Im Jahr 2005 wurden bereits 46,2% des gesamten EU-Budgets für die Landwirtschaft verausgabt (BMLFUW 2005). Für die Verantwortlichen stellt sich die Frage wie diese hohen Ausgaben in Zukunft in der Öffentlichkeit zu verantworten sein werden.

Unter anderem aus diesem Grund zeigt sich in der aktuellen Agrarpolitik der EU eine Tendenz zur Liberalisierung und Deregulierung. Das System der Interventionspreise und Exportförderungen, das einen wesentlichen Teil der GAP ausmacht, wird immer mehr in Frage gestellt. Zuletzt zeigte sich das im Rahmen der Zuckermarktreform, auch gibt es seit 2004/05 keine Interventionspreise für Roggen mehr (Egrain 2006). Interveniert wird nur mehr bei den Getreidearten Weichweizen, Hartweizen, Gerste und Mais. Trotz Intervention ist der österreichische Erzeugerpreis für Weichweizen gesunken (siehe Abbildung 1.1). Ausnahme ist nur das extreme Trockenjahr 2003, in dem schlechte Ernten kurzfristig zu höheren Preisen führten. Die sinkenden Erzeugerpreise haben zu zunehmendem ökonomischen Druck auf die Getreidebäuerinnen und -bauern geführt. Der Welt-

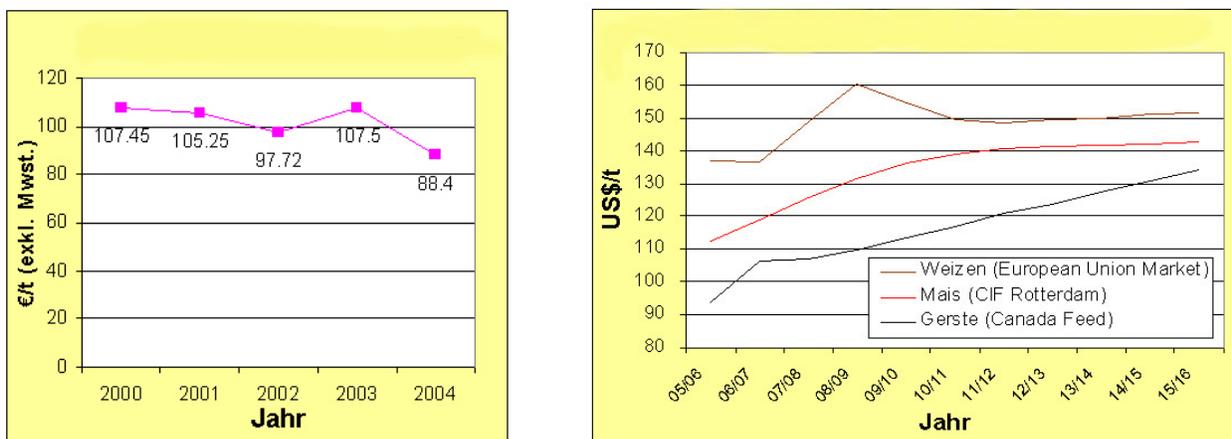


Abbildung 1.1: links: österreichischer Erzeugerpreis für Weichweizen (in €/t ohne MwSt., Quelle: BMLFUW 2005); rechts: Projektion der Weltmarktpreise für Getreide (Quelle: FAPRI 2006)

marktpreis für Weizen ist in den 1990er Jahren stark gefallen, und hat sich seit 2000 wieder leicht erholt. Das "Food and Agricultural Policy Research Institute" (FAPRI 2006) geht in Berechnungen davon aus, dass der Weltmarktpreis bis 2015 wieder ansteigen wird (siehe Abbildung 1.1). Ein wesentlicher Grund dafür ist der erhöhte Nahrungsmittelbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung, und die damit verbundene stärkere Nachfrage. Eine Rolle spielt auch die zunehmende energetische Nutzung von Getreide, bzw. ein Rückgang der Getreideanbauflächen zugunsten von Energiepflanzen. Das FAPRI geht aber auch von einer zunehmenden Volatilität der Preise, und damit einem erhöhten ökonomischen Risiko für die LandwirtInnen aus. Die steigende Volatilität der Preise ist unter anderem auf den globalen Klimawandel zurück zu führen, der in vielen Getreideregionen zu einem erhöhten Ertragsrisiko führen kann.

1.1.2 Die Agrarstruktur im Untersuchungsgebiet Marchfeld

Die agrarwirtschaftlichen Entwicklungen können nicht spurlos an den Bäuerinnen und Bauern vorübergehen. Nicht erst seit dem EU-Beitritt ist auch in der österreichischen Landwirtschaft der ökonomische Druck spürbar stärker geworden. Die LandwirtInnen reagieren darauf unterschiedlich. Ein Teil der Bäuerinnen und Bauern geht zur Nebenerwerbslandwirtschaft über, und verdient den Großteil des Einkommens dann in anderen Wirtschaftssektoren. Andere, vor allem ältere Bäuerinnen und Bauern, geben überhaupt ihre Betriebe auf. Einige LandwirtInnen können dadurch Flächen zukaufen oder zupachten und ihre Betriebe vergrößern. Häufig ist das auch mit Kreditaufnahmen und Investitionen in Gebäude, Viehbestand und Maschinen verbunden (BML-FUW 2005).

Allein im Zeitraum von 1999 bis 2003 reduzierte sich die Anzahl der familieneigenen Arbeitskräfte in der niederösterreichischen Landwirtschaft von 125.063 Personen auf 102.105 Personen also um 18,4% (Statistik Austria 2003). Bei etwa gleich bleibender landwirtschaftlicher Nutzfläche in diesem Bundesland (2003: 1.627.558 ha; Statistik Austria 2003) ergibt sich ein hoher Verlust an Arbeitszeit, der für die Bewirtschaftung dieser Flächen zur Verfügung steht. Dieser Verlust wurde zum Teil durch technische Investitionen und Anstellung von Arbeitskräften (meist SaisonarbeiterInnen) wieder wett gemacht. Die Zahl der unselbstständig Beschäftigten ist im selben Zeitraum von 12.370 auf 18.168, also um 46,9% angestiegen. Die Entwicklung besteht also aus einem allgemeinen Rückgang an Arbeitskräften in der niederösterreichischen Landwirtschaft, und einer teilweisen Ersetzung familieneigener Arbeitskraft durch Lohnarbeit und Mechanisierung.

Im Marchfeld, dem Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, zeigt sich diese Entwicklung auf Gemeindeebene. Aus Tabelle 1.1 geht hervor, dass die Anzahl der Betriebe im Marchfeld von 1991 bis 1999 um 232 bzw. 14,4% abgenommen hat. In keiner Gemeinde sind Betriebe neu hinzu gekommen, nur in 5 Gemeinden ist die Anzahl der Betriebe gleich geblieben.

Die früher in den Marchfeldgemeinden weit verbreitete Viehwirtschaft ist seit etwa den 1980er Jahren aufgegeben worden. Die Betriebe haben sich mit unterschiedlichen Strategien auf den Marktfruchtbau spezialisiert. In dieser ebenen Region war eine Mechanisierung und Intensivierung der Produktion relativ leicht möglich. Die arbeitsintensive und unflexible Viehwirtschaft erschien den LandwirtInnen im Vergleich zum Marktfruchtbau als wenig attraktiv.

Das Marchfeld ist mit Teilen des Burgenlands die Region in Österreich mit der großflächigsten Agrarstruktur. Die durchschnittliche Betriebsgröße im Marchfeld lag 1999 bei 49 ha im Vergleich zu bundesweit 19 ha (Stand: 2005, Statistik Austria 2005).

Putz (1980) hat das Marchfeld in mehrere agrarische Strukturzonen eingeteilt: In den westlichen an Wien angrenzenden Marchfeldgemeinden wie Raasdorf, Markgrafneusiedl oder Obersieben-

Tabelle 1.1: Bevölkerungs- und Agrarstatistik Marchfeld (nach Gemeindedaten Statistik Austria 2001)

	Wohn- bev. 2001	landw. Bev. 2001	Agrar- quote 2001	Landw. Nutz- fläche (in ha) 1999	land- wirtsch. Betriebe 1991	land- wirtsch. Betriebe 1999	Verän- derung 91-99
<i>Westliches Marchfeld</i>							
Aderklaa	233	90	38,6	1381	26	25	-1
Andlersdorf	118	26	22,0	611	15	14	-1
Glinzendorf	255	71	27,8	1517	33	33	0
Großenzersdorf	8128	427	5,3	7183	145	140	-5
Großhofen	92	14	15,2	278	9	5	-4
Leopoldsdorf	2392	102	4,3	2719	49	40	-9
Markgrafneusiedl	828	73	8,8	1781	32	30	-2
Obersiebenbrunn	1416	87	6,1	2611	37	35	-2
Parbasdorf	135	37	27,4	926	21	19	-2
Raasdorf	664	214	32,2	2002	17	17	0
<i>"Donaugemeinden"</i>							
Eckartsau	1179	126	10,7	7358	110	93	-17
Engelhartstetten	1807	172	9,5	4841	200	154	-46
Haringsee	1163	116	10,0	3392	79	66	-13
Mannsdorf a, d, D,	435	65	14,9	939	26	24	-2
Orth a,d, Donau	1966	96	4,9	1720	59	53	-6
<i>Östliches Marchfeld</i>							
Lasseo	2354	45	1,9	4612	147	121	-26
Marchegg	2850	106	3,7	4084	61	55	-6
Untersiebenbrunn	1400	43	3,1	1835	28	19	-9
Weiden a,d, March	904	167	18,5	4665	90	90	0
Weikendorf	1976	108	5,5	3596	87	76	-11
<i>"Nordbahn- gemeinden"</i>							
Deutsch Wagram	6808	89	1,3	1762	27	27	0
Gänserndorf	7928	71	0,9	2293	36	29	-7
Strasshof	6993	28	0,4	60	8	8	0
<i>Übergangsbereich zum Weinviertel</i>							
Auersthal	1869	102	5,5	2207	162	126	-36
Prottes	1280	26	2,0	1525	56	35	-21
Schönkirchen- Reyersdorf	1854	57	3,1	1519	49	43	-6
Gesamt	57027	2558	4,5	67417	1609	1377	-232

brunn ist die Anzahl der Betriebe noch am stabilsten. Die Agrarquote liegt relativ hoch. Hier findet die Landwirtschaft überwiegend gute Böden vor. Viele Bäuerinnen und Bauern haben sich hier seit der Ausweitung der Beregnung in den 1970er Jahren auf die arbeitsintensive Produktion von Feldgemüse und Obst spezialisiert. Die manuellen Feldarbeiten, wie z.B. Spargel stechen, Erdbeeren ernten usw., werden in diesen Betrieben überwiegend von SaisonarbeiterInnen durchgeführt. Wien als Absatzmarkt für die Produkte liegt in der Nähe, insbesondere die Direktvermarktung über den Straßenhandel hat sich als erfolgreich heraus gestellt.

In den "Donaugemeinden" von Mannsdorf an der Donau bis Markthof ist der Anteil an kleinen Betrieben und Nebenerwerbsbetrieben höher als im restlichen Marchfeld. Auch die Agrarquote liegt über dem Durchschnitt. Die Betriebe in diesem Gebiet sind fast ausschließlich reine Ackerwirtschaften.

Im östlichen Marchfeld sind die Böden sehr heterogen. Sie reichen von sehr trockenen Schotterstandorten in Breitensee bis zu Feuchtschwarzerden in Lasee. Vor allem in Untersiebenbrunn, Oberweiden und Lasee gibt es Sandstandorte, die überwiegend im 19. Jahrhundert aufgeforstet wurden. Die Bäuerinnen und Bauern in diesen Gemeinden sind daher auch die einzigen LandwirtInnen im Marchfeld mit nennenswertem Waldbesitz, da die Auwälder entlang Donau und March meist in staatlichem Besitz sind.

Die "Nordbahngemeinden" Deutsch Wagram, Strasshof und Gänserndorf unterscheiden sich vom restlichen Marchfeld durch die hohe Bevölkerungsdichte. Die landwirtschaftliche Nutzfläche ist eher gering, und die Agrarquote entsprechend niedrig. Die vorhandenen Betriebe sind überdurchschnittlich groß. Am Rand der größeren Ortschaften gibt es eine Reihe von Gutshöfen.

Im Übergangsbereich vom Marchfeld zum Weinviertel ("Weinbaugemeinden") von Pillichsdorf bis Prottes gibt es einen Anteil von Weingärten an der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Er übersteigt jedoch in keiner Gemeinde 15% der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Viele Betriebe sind daher gemischte Acker-Weinbauwirtschaften. Diese Struktur bedingt eine hohe Anzahl an Kleinbetrieben, die Nebenerwerbsquote ist besonders hoch. Der Strukturwandel war und ist deshalb in dieser Region besonders stark. Allein zwischen 1970 und 1976 wurde etwa die Hälfte der Kleinbetriebe aufgelassen.

2 Derzeitiger Stand des Wissens

2.1 Agrarökologische Beschreibung des Marchfelds

Das Marchfeld wird von vielen Bäuerinnen und Bauern anderer Regionen als landwirtschaftliches Produktionsgebiet mit sehr günstigen natürlichen Bedingungen angesehen. Die ebene, weitgehend ausgeräumte "Agrarsteppe" erlaube eine mechanisierte und hochproduktive Landwirtschaft. Dieses Urteil stimmt nur zum Teil. Rötzer (2004) sieht folgende Einschränkungen:

- Die Niederschlagssummen im Marchfeld sind relativ gering (in Groß-Enzersdorf fallen in der Vegetationsperiode des Sommergetreides von April bis Juli im Durchschnitt 236 mm, das sind 42% des mittleren Jahresniederschlags) und vielerorts wird die Trockenheit durch die Bodenverhältnisse noch verstärkt. Höchsterträge sind daher nur auf bewässerten Flächen möglich. Die Bewässerung ist aber nur bei intensiveren Kulturen wie Feldgemüse, Erdbeeren usw. rentabel.
- Innerhalb des Marchfelds sind die Standortverhältnisse sehr heterogen. Das Spektrum reicht von Kulturrohböden auf Sand oder Schotter bis zu Tschernosemen aus Löss oder Feuchtschwarzerden.
- Auch die besten Böden reichen nicht an die Verhältnisse im Raum Hollabrunn im westlichen Weinviertel heran. Gute Böden im Marchfeld werden von der Finanzbodenschätzung mit einer Bodenklimazahl um 60 eingestuft, während die besten Ackerböden Österreichs (Guntersdorf bei Hollabrunn, Machland in Oberösterreich) mit 100 bewertet werden.

2.1.1 Die Böden im Marchfeld

Das Marchfeld ist Teil des Wiener Beckens, das von drei mitteleuropäischen Gebirgssystemen umschlossen wird: den Alpen, den Karpaten und der böhmischen Masse. Der Name Marchfeld ist geologisch irreführend, da es eigentlich von Donauschottern gebildet wurde. Auf diesen in Terrassen abgelagerten Donauschottern haben sich junge, nacheiszeitliche Böden gebildet (siehe Abbildung 2.1).

Der am meisten verbreitete Bodentyp im Marchfeld ist der Tschernosem. Der Tschernosem ist ein durch die Trockenheit in der Verwitterung gehemmter, tiefgründiger Boden. Auf einen mächtigen humushaltigen A-Horizont folgt darunter unmittelbar das Ausgangsmaterial des Bodens, meistens Löss, der C-Horizont. Diese tiefgründigen, mäßig trockenen Böden stellen gute Ackerstandorte dar. Auch aus kalkhaltigem Sand haben sich Tschernoseme entwickelt, etwa im Bereich der Lasseer Heide oder des Aspacherfeldes. Diese Böden sind leichter und trockener als die Tschernoseme aus Löss und stellen nur mittelwertige Ackerböden dar.

Im rezenten Aubereich der Donau haben sich vorwiegend Rohauböden und Graue Auböden entwickelt. Die regelmäßigen Überschwemmungen dieser Böden finden aufgrund der Donauregulierung nicht mehr statt. Diese Auen wurden teilweise gerodet, und werden als Siedlungs- und Ackerland genutzt. Entlang der March finden sich vergleyte Auböden. Die verbliebenen Auwälder stehen heute unter Naturschutz.

Die früheren Feuchtstandorte bei Lasseer und in der Siebenbrunner Bucht sind durch Anmoore, Gleye und Feuchtschwarzerden geprägt. In diesen Gebieten fanden sich, zum Teil bis vor wenigen Jahrzehnten, durch den hohen Grundwasserstand versumpfte Flächen. Regulierungs- und

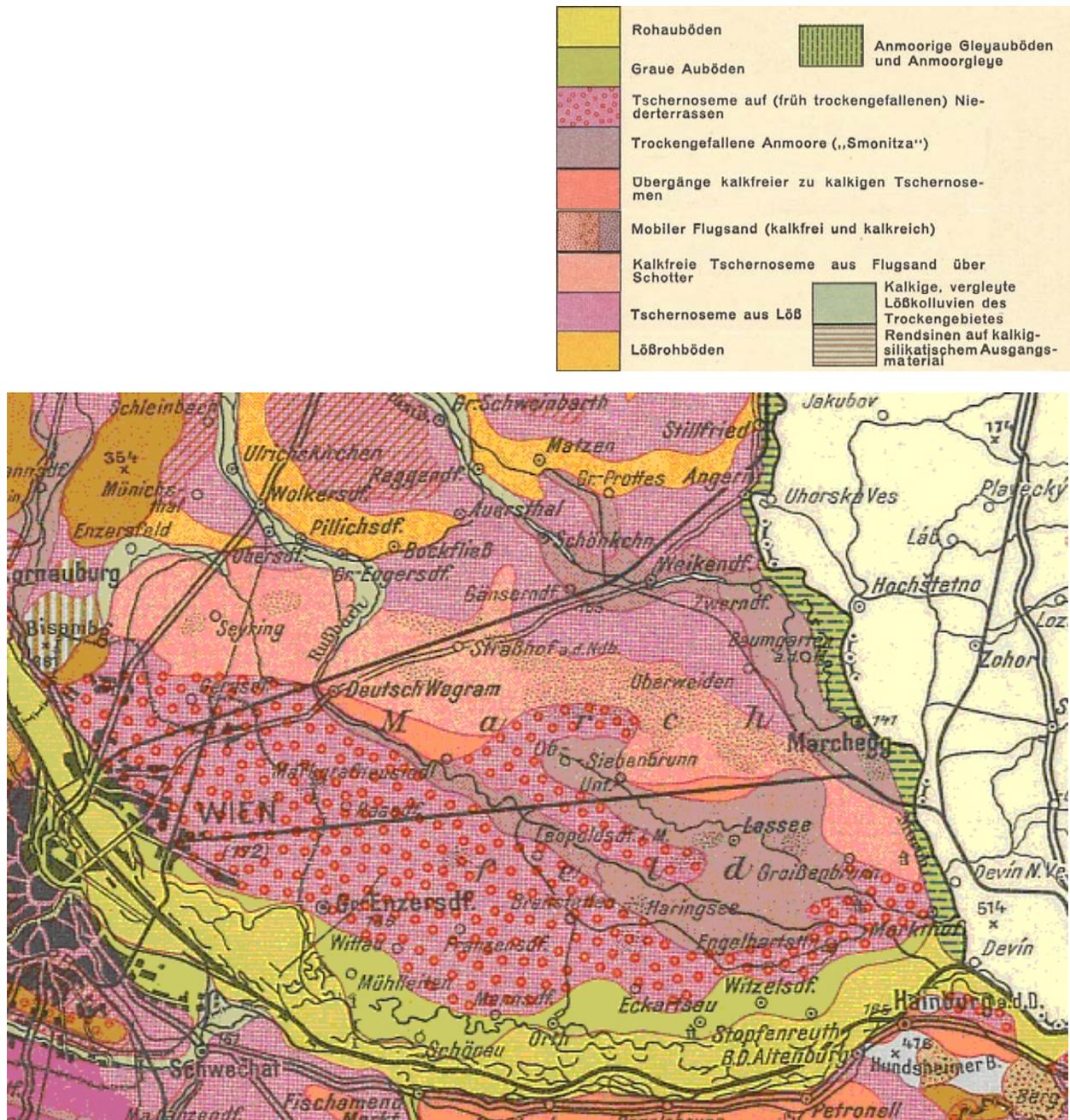


Abbildung 2.1: Bodenkarte Marchfeld 1:500.000 und Legende (nach Fink 1958)

Entwässerungsmaßnahmen führten zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels. Das ermöglichte die Umwandlung der Wiesen, Sümpfe und Lacken in Ackerland mit teilweise sehr fruchtbaren Böden.

Aufgrund starker Wasserentnahmen durch die Landwirtschaft kam es als Nebenwirkung zu einem starken Absinken des Grundwasserspiegels im Marchfeld. Von 1970 bis 1990 sank der Grundwasserspiegel jährlich um 10 bis 20 cm. Um dem entgegen zu wirken, wurde in den 1990er Jahren der Marchfeldkanal gebaut.

Über den Flugsanden der Gänserndorfer Terrasse sind kalkfreie Tschernoseme anzutreffen. Diese leichten Böden bilden nur trockenes mittel- bis geringwertiges Ackerland. Auf Sanddünen und -rücken befindet sich ein Kulturrohboden aus Flugsand, der für den Ackerbau ungeeignet ist.

Die Ackerböden im Marchfeld sind, mit Ausnahme weniger Auböden, grundwasserfern. In den grundwasserführenden Schotterkörpern findet kein kapillarer Aufstieg statt.

Informationen in diesem Kapitel nach Bundesanstalt für Bodenkunde (1993).

2.1.2 Das Agrarklima im Marchfeld

Das Marchfeld liegt am nord-westlichen Rand der pannonischen, kleinen ungarischen Tiefebene. Die Kleine Ungarische Tiefebene (auch Kleines Ungarisches Tiefland, ungarisch: Kisalföld, slowakisch: Malá dunajská kotlina) ist eine etwa 8000 km² große Tiefebene im nordwestlichen Ungarn und der südwestlichen Slowakei (slowakisch: Podunajská nížina - Donautiefland). In Österreich umfasst sie das Wiener Becken, den Seewinkel und den Ostrand des steirischen Hügellandes. Die Grenzen dieser Großlandschaft bilden im Westen die Alpen, im Norden die slowakischen Karpaten und im Südosten das Bakony-Vértes-Hügelland (nach Freytag & Berndt 2007).

Das Klima im Marchfeld ist semi-arid. Es ist ein Übergangsklima zwischen dem westeuropäischen, maritimen und dem osteuropäischen, kontinentalen Klima. Die Winter sind kalt und oft schneearm mit häufig scharfen Frösten. Die Sommer sind heiß und phasenweise trocken. Die langjährige Jahresmitteltemperatur (1953-1987) am Standort Obersiebenbrunn liegt bei 9,1°C. Im wärmsten Monat Juli liegt der langjährige Durchschnitt bei 19,1°C, im kältesten Monat Januar bei -2,0°C (siehe Abbildung 2.3) (Müller 1993).

Die mittleren Windgeschwindigkeiten weisen ebenfalls einen Jahrgang auf. Im Sommer und Frühherbst treten besonders häufig stabile Hochdruckwetterlagen auf. Die Windgeschwindigkeiten sind zu dieser Jahreszeit eher gering. Im Winter und vor allem im Frühjahr kommt es öfter zum Durchzug von Tiefdruckgebieten durch Mitteleuropa. Diese meist Westwetterlagen bringen lebhafteren Wind mit sich (siehe Abbildung 2.3). Die Windgeschwindigkeiten haben durch die Erhöhung

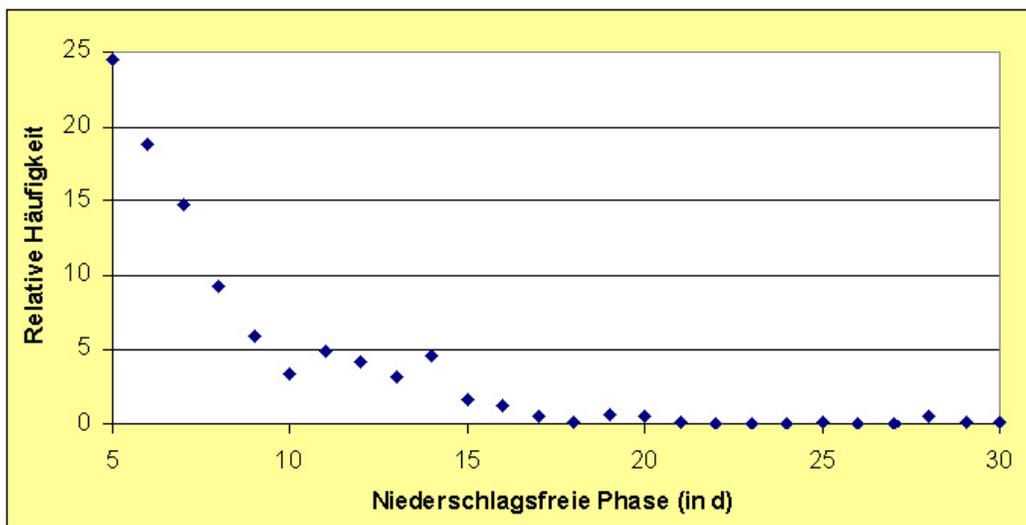


Abbildung 2.2: Relative Häufigkeiten der Dauer von Dürreperioden in der Vegetationsperiode (Monate III-XI der Jahre 1953-1987) in Obersiebenbrunn; n=408 (eigene Berechnung nach Müller 1993)

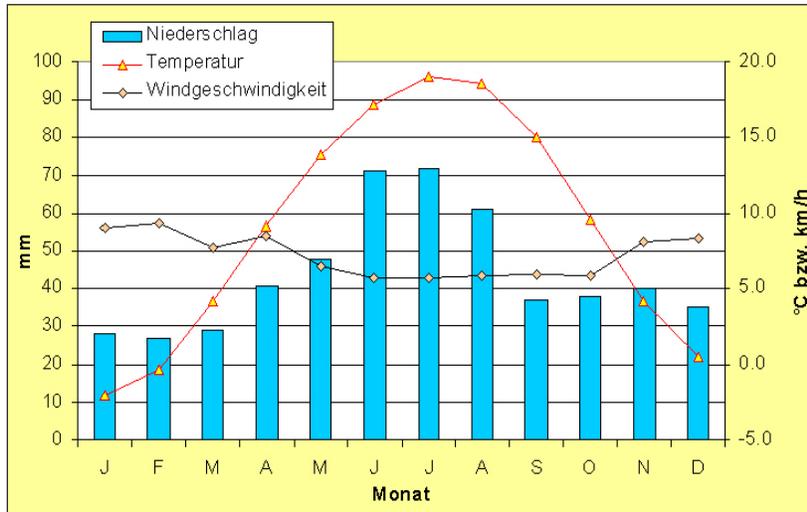


Abbildung 2.3: Klimadiagramm Obersiebenbrunn (nach Müller 1993) (Temperatur in 2 m und Niederschlag - Monatsmittelwerte von 1953-1987; Windgeschwindigkeit in 1 m - Monatsmittelwerte von 1965-1972)

der Evapotranspiration Einfluss auf das Pflanzenwachstum. Böiger Wind und Stürme können zum Lagern des Getreides führen.

Der Großteil der Niederschläge fällt im Sommer, häufig konvektiv in Verbindung mit Gewittern. Der wesentliche limitierende Faktor für die Landwirtschaft in diesem Gebiet ist Wasser. Tabelle 2.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung von niederschlagsfreien Phasen während der Trockenperiode (eigene Berechnung nach Müller 1993). Etwa ein Viertel der Trockenphasen dauert fünf Tage lang. Aus den Zahlen ist ersichtlich, dass die Häufigkeit von Trockenphasen mit ihrer Dauer exponentiell abnimmt. Je länger diese Phasen andauern, desto höher ist das Risiko von Trockenschäden. Auch Hitzeextreme können zur Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums führen (siehe Kapitel 2.4.2).

Nach der Bundesanstalt für Bodenkunde (1993) beträgt die Länge der Vegetationsperiode im Marchfeld im langjährigen Mittel 239 Tage (siehe Abbildung 2.3). Diese Periode beginnt im Durchschnitt am 18. März und reicht bis zum 12. November. Im langjährigen Durchschnitt kommt es im Marchfeld vom 24. Oktober bis zum 16. April zu Frösten.

Das Marchfeld ist eine Ebene. Die Höhenlage der Ackerflächen im Marchfeld weicht lediglich ~35m (Seehöhen: Engelhartstetten: 143m; Wolkersdorf: 178m) voneinander ab. Die klimatischen Unterschiede aufgrund der Seehöhe sind daher sehr gering.

Abbildung 2.4 zeigt den mittleren langjährigen Jahrgang des Bodenwassergehalts am Standort Obersiebenbrunn in einem Ackerboden unter Getreide. Es lassen sich deutlich eine trockene Jahreszeit - von April bis Oktober - und eine feuchte Jahreszeit - von November bis März - unterscheiden. Von etwa März bis Juni/Juli wird dem Boden durch ein Überwiegen der Evapotranspiration über den Niederschlag Wasser entzogen. Die vereinfachte Wasserbilanz (Abbildung 2.4) zeigt das Absinken des Bodenwassergehalts. Dieser Zeitraum entspricht auch etwa der Vegetationsperiode, während der die Getreidepflanzen dem Boden Wasser für die Transpiration entziehen. Etwa Anfang Juli reift der Getreidebestand ab, und die Transpiration wird damit beendet. Durch intensivere Niederschläge im Juli und August kommt es in diesen Monaten im Mittel zu einem Überwiegen der Niederschläge über die Verdunstung. Diese Monate sind aber ebenfalls meist sehr trocken. Die Befeuchtung durch die Niederschläge hält nur kurzfristig an, der Bodenwassergehalt sinkt durch die Evaporation rasch wieder ab. Vom Spätherbst bis zum Frühjahr wird der Bodenwasserspeicher

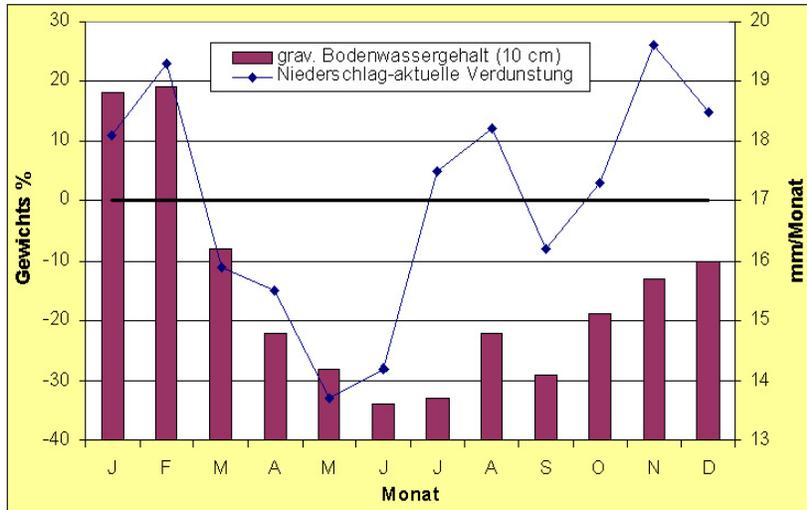


Abbildung 2.4: Vereinfachte Wasserbilanz (nach Müller 1993) (Niederschläge - aktuelle Verdunstung im Lysimeter unter Getreide) und gravimetrische Bodenwassergehalte in 10 cm Tiefe unter Getreide (jeweils Monatsmittelwerte von 1953-1987)

wieder aufgefüllt. Die Niederschläge überwiegen über die geringe Verdunstung. Die Feldkapazität wird im Marchfeld jedoch nicht in jedem Winter erreicht. Die höchsten Bodenwassergehalte treten meist zur Zeit der Schneeschmelze im Februar oder März auf. Während der kalten und feuchten Jahreszeit tritt auch der größte Teil der Sickerwasserspense und Grundwasserneubildung auf. Der Oberflächenabfluss ist im ebenen Marchfeld meist vernachlässigbar gering. Daten in diesem Kapitel nach Müller (1993).

2.2 Der Bodenwasserhaushalt

In Agrarökosystemen stammt das im Boden enthaltene Wasser meist zum Großteil aus Niederschlägen und, wenn vorhanden, aus der Bewässerung. Zu einem sehr geringen Ausmaß kann auch die Luftfeuchtigkeit z.B. über Taubildung zur Bodenbefeuchtung beitragen. Andere Wasserquellen sind der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser, der horizontale Transport von Bodenfeuchte, oder die Freisetzung von Wasser bei biologischen Prozessen (Atmung). Menge, Intensität und Variabilität der Niederschläge, und damit die Wasserspense an den Boden, sind Teil des lokalen Klimas eines Standorts.

Bei einem Niederschlagsereignis erreicht nicht das gesamte Regenwasser die Bodenoberfläche. Ein Teil verdunstet bereits im freien Fall der Tropfen und befeuchtet die Luft. Wenn der Boden mit Pflanzen bedeckt ist, wird je nach Dichte des Bestands ein Teil der Niederschläge von der Pflanzendecke abgefangen. Dieses Wasser verdunstet von dort (Interzeptionsverlust), tropft oder fließt über die Pflanzenoberfläche in den Boden ab.

Niederschlag der in Form von Schnee auftritt, kann erst nach der Schmelze und dem Auftauen des Bodens infiltrieren.

Bei intensiven Niederschlagsereignissen oder bei der Schneeschmelze im Frühjahr kann die Regenverdaulichkeit des Bodens überschritten werden. Es kommt zur Bildung von Stauwasser. Ob das Stauwasser langsam infiltrieren kann, oder abfließt ist von Faktoren wie Hangneigung, Pflan-

Tabelle 2.1: Anteil des Porenvolumens und Volumens der Porengrößenbereiche am gesamten Bodenvolumen in Mineralböden (C-Gehalt <2%) und organischen Böden (aus Schaffer/Schachtschabel, 1982)

	Porenvolumen (Vol. %)	Grobporen (Vol. %)	Mittelporen (Vol. %)	Feinporen (Vol. %)
Sandböden	42 (±7)	30 (±10)	7 (±5)	5 (±3)
Schluffböden	45 (±8)	15 (±10)	15 (±7)	15 (±5)
Tonböden	53 (±8)	8 (±5)	10 (±5)	35 (±10)
Anmoor	70	5	40	25
Hochmoor	90	25	50	15

zenbestand und Mulchbedeckung abhängig. Regenfälle mit niedriger Intensität können den Boden allmählich befeuchten und infiltrieren besser (Informationen nach Eitzinger 2002).

2.2.1 Bodeneigenschaften und Bodenwasser

Die Verteilung des infiltrierenden Niederschlagswassers hängt stark von den chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften ab. Organische Böden wie z.B. Torfe können sehr viel Wasser aufnehmen, speichern und abgeben. Die Wasserspeicherfähigkeit von überwiegend mineralischen Böden kann durch die Anreicherung von Humus verbessert werden. Auch die chemische Zusammensetzung des Mineralbodens wirkt sich auf seine Wasseraufnahmefähigkeit aus. Mineralboden besteht meist zu einem Großteil aus Tonmineralen. Tonminerale weisen eine geschichtete, kristalline Struktur auf. Wenn sie mit Wasser in Berührung kommen, quellen sie auf. Dabei werden Wassermoleküle zwischen ihren Schichten eingelagert. Die innere Oberfläche eines 1 cm³ großen Tonwürfels mit 6 cm² Außenfläche kann so bis zu 600000 cm² betragen. Das Tonmineral Kaolinit, das vor allem in reifen, schon stark verwitterten Böden auftritt, ist weniger quellfähig als Montmorillonit, der den Hauptbestandteil von jungen, eiszeitlichen Böden darstellt. Die chemische Verwitterung kann daher die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens vermindern.

Auch der Kalkgehalt der Ackerkrume spielt eine Rolle. Kalkreiche Böden haben eine günstigere Struktur und Wasseraneignung im Vergleich zu ähnlichen, kalkarmen Böden. Kalk bewirkt eine Flockung des Bodens, und führt zu einem Koagulatgefüge. Das wird in der Landwirtschaft beim Kalken der Böden genutzt.

Eine größere Rolle als der Chemismus spielen bei mineralischen Böden die physikalischen Eigenschaften. Die Körnung (Textur) beeinflusst die Wasserspeicherfähigkeit, die technische Bearbeitbarkeit und die Fruchtbarkeit der Böden. Die Größe der Bodenteilchen determiniert auch das Volumen der Poren, die von ihnen umschlossen werden. Sandige Böden (Korngröße: 63 µm - 2000 µm) enthalten relativ viele Grobporen (>10 µm). Feinkörnigere Böden enthalten bei gleicher Lagerungsdichte feinere Poren (siehe Tabelle 2.1).

Wie viel Wasser der Boden im gesättigten Zustand enthält, wird vom Porenvolumen bestimmt. Wie viel er davon gegen die Schwerkraft halten kann, hängt vor allem von der Verteilung der Porengrößen ab.

Poren mit einem Volumen >10 µm werden als Grobporen bezeichnet. Grobporen haben eine relativ geringe Oberfläche im Verhältnis zum Volumen. Grobporen leiten Wasser weiter, aber halten relativ wenig Wasser gegen die Schwerkraft. Ein hoher Anteil an Mittelporen (0,2 µm - 10 µm) ist

günstig für den Pflanzenbau. Mittelporen drainen weniger stark als Grobporen. Nach einer Sättigung halten sie einen größeren Volumensanteil Wasser zurück als Grobporen. Schluffböden sind daher weniger austrocknungsgefährdet als Sandböden. Aus den Mittelporen können die Pflanzen in Trockenperioden über längere Zeit Wasser entnehmen.

Ein hoher Anteil an Feinporen führt zu einem großen Gesamtporenvolumen des Bodens. Er ist daher mit einer großen Wasseraufnahmefähigkeit verbunden. Feinporen haben im Verhältnis zum Volumen aber auch die größte Oberfläche. Es herrschen daher sehr starke "elektrostatische Kräfte, van-der-Waals-Kräfte und Bindungen über Wasserstoffbrücken (Hartge und Horn 1991)" zwischen den Porenwänden und den Wassermolekülen vor. Diese Bindungskräfte verhindern die Wasseraufnahme aus den Feinporen durch die Pflanzenwurzeln. Schwere, tonige Böden sind schwer bearbeitbar und meist schlechte Ackerböden.

Böden weisen eine individuelle Entwicklung auf, die zu einer bestimmten Schichtung, den Bodenhorizonten, führt. Diese verschiedenen Formen der Böden werden als Bodentypen bezeichnet. Jeder Bodentyp hat einen für ihn charakteristischen Wasserhaushalt. Bodentypen können z.B. stauende Horizonte, oder starken kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser aufweisen.

Zur numerischen Beschreibung des Bodenwasserhaushalts wurden drei Punkte definiert (nach Scheffer und Schachtschabel 1982). Diese Punkte beschreiben den Zusammenhang zwischen der Wasserspannung im Boden, d.h. der Summe der Bindungskräfte zwischen der Bodenmatrix (feste Teilchen) und dem Bodenwasser, und dem Wassergehalt im Boden (in Volumsprozents):

- 1 der Sättigungspunkt: An diesem Punkt ist der Wassergehalt maximal, d.h. die Bodenporen sind vollständig mit Wasser gefüllt. Der theoretische pF-Wert beträgt $-\infty$, bei der angewandten Untersuchungsmethode entspricht das einem Druckpotential von 0 hPa (0 bar).
- 2 die Feldkapazität (FK): Der Wassergehalt an diesem Punkt entspricht der Menge an Wasser die der Boden, nach einer Sättigung, gegen die Schwerkraft halten kann. Der pF-Wert bei Feldkapazität ist 1,8 bis 2,5, das entspricht einem Druckpotential von etwa 60 hPa bis 300 hPa (=60 mbar bis 300 mbar). Gedanklich ist die Feldkapazität die "Grenze zwischen dem schnell laufenden Wasseranteil, für den die früher verwendete Bezeichnung "Sickerwasser" gut zutrifft, und dem Rest des Bodenwassers, der sich nur träge bewegt" (Scheffer und Schachtschabel 1982). Die Feldkapazität ist also die Scheidegrenze zwischen dem Wasser, das der Boden halten kann und der Grundwasserspende.
Für die Praxis ist dieser Wert ein Näherungswert, die Übergänge sind "fließend". Für Lössböden wird angenommen, dass nach starken Regenfällen nach etwa 3 Tagen, in denen der Wassergehalt durch den Verlust des Sickerwassers rasch absinkt, die Feldkapazität erreicht wird. Es tritt dann eine Stabilisierung des Wassergehalts ein. Die im Labor anhand von, aus dem Bodenverband gelöster, Proben bestimmte Feldkapazität stimmt nicht immer exakt mit der im Freiland messbaren Feldkapazität überein. Trotz dieser Unsicherheiten wird die FK für weiterführende Berechnungen verwendet.
- 3 der permanente Welkepunkt (PWP): Dieser Begriff stammt aus der angewandten Botanik (Streubing 1965). Er bezeichnet "diejenige Wassermenge im Boden, bei der die Pflanze irreversibel welkt, wenn sie diese im Verlauf einer Entwässerungsperiode erreicht oder unterschreitet" (Hartge und Horn, 1991). Der permanente Welkepunkt wird häufig bei einem pF-Wert von 4,2, das entspricht einem Druckpotential von 15000 hPa (=15 bar), angegeben. Der permanente Welkepunkt kann herangezogen werden, um festzustellen ob die Pflanzen unter Trockenstress leiden. Wenn dieser Punkt erreicht wird, sind sie nicht mehr in der Lage dem Boden ausreichend Wasser für ihren Stoffwechsel zu entziehen. Das noch im Boden vorandene Wasser haftet zu

stark an den Bodenteilchen. Der PWP ist für verschiedene Pflanzenarten unterschiedlich. 15 bar stellen aber einen guten Näherungswert für Getreide dar.

Die einzelnen Punkte können miteinander als Funktion zwischen Wasserspannung und Wasseranteilsbeziehung – kurz pF-Kurve – verbunden werden. Die Werte der pF-Kurve werden experimentell anhand von Bodenproben ermittelt. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen der Wasserspannung im Boden, d.h. der Summe der Bindungskräfte zwischen Bodenmatrix (feste Teilchen) und Bodenwasser und dem Wassergehalt im Boden (in Volumsprozent). Ausgedrückt wird die Wasserspannung als Logarithmus der Höhe einer gedachten senkrechten Wassersäule in cm, die gegen die Schwerkraft gehalten werden muss ($\log \text{ cm WS}$). Eine Wassersäule von 1 m entspricht also einem pF-Wert von 2 ($\log 100 = 2$). Diese pF-Werte sind für den Pflanzenbau interessant. Sie beschreiben das Potential, das die Pflanzenwurzeln unterschreiten müssen, um dem Boden Wasser zu entziehen.

Die genaue Beziehung zwischen dem Wassergehalt und der Wasserspannung ist vom Gesamtvolumen und der Größenverteilung der Poren abhängig. Vor allem ausschlaggebend sind Körnung, Lagerungsdichte und Humusgehalt. Für verschiedene Böden und Körnungen wurden charakteristische pF-Kurven (Abbildung 2.5) ermittelt.

Den Eingängen in den Bodenwasservorrat stehen die Ausgänge gegenüber. Wird die Feldkapazität des Bodens überschritten, beispielsweise bei der Schneeschmelze, dann fällt der Überschuss als Grundwasserspende an. Messungen der Sickerwasserspense können u.a. mit Lysimeteranlagen erfolgen. In diesen Anlagen wird ein möglichst intakter Bodenblock aus dem zu untersuchenden Boden herausgelöst, und in einem Stahlzylinder gelagert. Die Menge des aus einer Öffnung am Fuß des Zylinders austretenden Wassers kann gemessen werden. Durch die Analyse von Gewichtsveränderungen können exakte Wasserbilanzen erstellt werden, die auch die Evapo(transpi)ration umfassen.

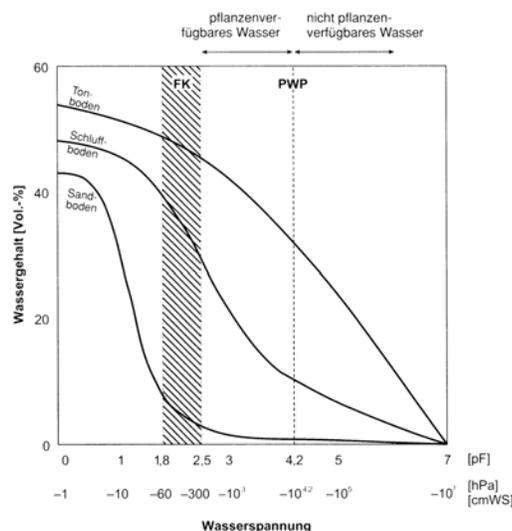


Abbildung 2.5: Typische pF-Kurven für verschiedene Böden (aus Scheffer und Schachtschabel, 1982)

In einem intakten Boden mit Grundwasseranschluss ist auch der entgegengesetzte Prozess zur Versickerung, ein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser, möglich. Die Wasserbilanz im Boden stellt den Eingängen in Form von Niederschlägen (oder Bewässerung) und kapillarem Aufstieg, die Verlustgrößen gegenüber:

$$N = E + A + (\Delta S_w) - K + D$$

N ... Niederschlag
 E ... Verdunstung
 A ... Abfluss
 ΔS_w Speicherung im Boden
 K ... Kapillarer Aufstieg
 D ... Drainage

Neben dem vertikalen Austausch, findet auch ein Transport von Wasser in horizontaler Richtung statt. Ausgehend von dem Bodenvolumen das betrachtet wird, z.B. die durchwurzelbaren Bodenhorizonte unter einem Weizenschlag, kann das einen Ab- oder Zugang von Wasser bedeuten (Informationen in diesem Kapitel nach Scheffer und Schachtschabel 1982).

2.2.2 Die Bewegungen des Bodenwassers

Um die Wasserbewegungen im Boden zu erklären und zu beschreiben, wurde die Potentialtheorie entwickelt. Hierbei wird unterstellt, dass jedem beliebigen Punkt im Boden zu einer bestimmten Zeit ein bestimmtes (Gesamt)Bodenwasserpotential (Ψ_t) zugeordnet werden kann. Potentiale werden, bezogen auf die Volumseinheit, in der Einheit $J\ m^{-3}$ angegeben. Das Bodenwasser bewegt sich stets von Orten mit höherem Gesamtpotential, zu Orten mit niedrigerem Gesamtpotential (z.B. zur Pflanzenwurzel).

Das Gesamtpotential (Ψ_t) des Wassers im Boden bei der Temperatur T_0 entspricht jener Arbeit pro Masseneinheit reinen Wassers in $J\ m^{-3}$, welche erforderlich ist, um eine infinitesimale Menge Wassers reversibel und isothermal aus einem Standardsystem S_0 in das Wasser im Boden im betrachteten Punkt zu bewegen. Das Standardsystem S_0 ist definiert als ein Behälter mit reinem (d.h. das Wasser darf nicht durch gelöste Salze beeinflusst sein, somit ist das osmotische Potenzial $p = 0$), freiem (d.h. das Wasser darf nicht vom Boden beeinflusst werden - Kapillarität) Wasser, mit der Temperatur T_0 in der Höhenlage h_0 und bei einem atmosphärischen Druck P_0 (Definition nach Mitteilungen der Österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft).

Das Gesamtpotential ist die Summe verschiedener Teilpotentiale:

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_o + \Psi_p$$

Ψ_t ... Gesamtpotential
 Ψ_g ... Schwerkraftpotential
 Ψ_o ... Osmotisches Potential
 Ψ_p ... Druckpotential

Die Teilpotentiale werden definiert, als:

das Schwerkraftpotenzial (Ψ_g) des Wassers bei der Temperatur T_0 . Es entspricht jener Arbeit pro Volumseinheit reinen Wassers in $J\ m^{-3}$, welche erforderlich ist, um eine infinitesimale Menge Wassers reversibel und isothermal aus dem Standardsystem S_0 in das System S_1 zu bewegen.

Das System S_1 ist definiert als ein Behälter mit reinem, freien Wasser (wie in S_0), jedoch in einer Höhenlage h_x des betrachteten Punktes bei sonst gleichen Bedingungen wie in S_0 . Dieses Potential kann aus der Höhendifferenz $\Delta h = h_x - h_0$ zwischen S_0 und S_1 ausgedrückt werden: $\Psi_g = g\Delta h$, wobei g die Schwerkraft pro Volumseinheit ist.

Ψ_g hat im Boden z.B. nach Niederschlagsereignissen eine Bedeutung. Das überschüssige, die Feldkapazität überschreitende Sickerwasser wird, infolge der Schwerkraft, nach unten verlagert. Das niedrigere Gravitationspotential der tieferliegenden Bodenschichten wird wirksam.

Das osmotische Potenzial (Ψ_o) des Wassers bei der Temperatur T_0 . Es entspricht jener Arbeit pro Volumseinheit reinen Wassers in J/m^3 , welche erforderlich ist, um eine infinitesimale Menge Wassers reversibel und isothermal aus dem Standardsystem S_1 in das System S_2 zu bewegen. Das System S_2 ist definiert als ein Behälter mit einer Lösung in der gleichen Zusammensetzung wie die Bodenflüssigkeit im betrachteten Punkt, die einen osmotischen Druck besitzt, bei sonst gleichen Bedingungen wie S_1 .

Die osmotische Festlegung des Bodenwassers durch Ionen, welche Ψ_o prägt, kann einen bedeutenden Anteil am Gesamtwasserpotential in Salzböden (z.B. Solontschak, Solonetz) einnehmen. In normaler Ackererde ist die Konzentration der Ionenlösung im Boden so gering, dass die daraus resultierende osmotische Wirkung kaum ins Gewicht fällt.

Das Tensiometer- oder Druckpotential (Ψ_p) des Wassers (in situ) entspricht jener Arbeit pro Volumseinheit reinen Wassers in J m^{-3} , welche erforderlich ist, um eine infinitesimale Menge Wasser reversibel und isothermal aus dem System S_2 in den betrachteten Punkt des Bodens bei dem dort herrschenden Wassergehalt zu bewegen.

In den meisten Ackerböden ist das Druckpotential (Ψ_p) die entscheidende Komponente für das Gesamtpotential. Es kann mit Hilfe von Sensoren (z.B. Watermark) gemessen werden, und wird in bar oder pF-Werten ausgedrückt. Wenn das Druckpotential negativ ist (außer bei Sättigung der Fall) wird es Wasserspannung genannt. Es ist abhängig vom Gasdruck der Bodenluft, von der Bodenstruktur (Bodenmatrix), von einer möglichen Auflast auf den Boden und vor allem vom Wassergehalt des Bodens.

Die Höhe der Wasserspannung ist von Interesse für den Pflanzenbau. Wenn sie bekannt ist, lässt sich eine Aussage darüber machen, welche Arbeit Pflanzen verrichten müssen um dem Boden Wasser zu entziehen.

Sind die Gesamtpotentiale in einem Boden in jedem beliebigen Punkt gleich ($\Psi_{t1} = \Psi_{t2,3,x}$), befindet sich das Bodenwasser in Ruhe. Dieser Ruhezustand tritt selten ein, gewöhnlich wird das Wasser im Boden ständig bewegt. Es bewegt sich, entsprechend den veränderlichen Potentialen, im Raum. Die Potentialtheorie ermöglicht die Ermittlung der resultierenden Vektoren der Bewegungen des Bodenwassers. Die Potentialtheorie kann auch für andere Wassermedien wie Pflanzen und Atmosphäre angewandt werden. Sie ermöglicht daher eine Berechnung der Bewegungen des Wassers im System Boden-Pflanze-Atmosphäre (nach Österreichische bodenkundliche Gesellschaft, 1980).

2.2.3 Die Wasserleitfähigkeit im Boden

Die Bewegung des Bodenwassers ist, neben dem antreibenden Potentialgradienten, der Fließstrecke und der Viskosität des Wassers von der Durchlässigkeit des Bodens abhängig. Die Bodenporen, durch die das Wasser fließen muss, können entweder mit Wasser oder mit Luft gefüllt sein.

Der Fließquerschnitt ist dabei umso größer, je mehr Wasser sich bereits in den Poren befindet. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist daher höher als die ungesättigte Wasserleitfähigkeit.

Wenn der Boden mit Wasser gesättigt ist, hängt der Fließquerschnitt und damit die Wasserleitfähigkeit (k-Wert) vor allem von der Textur ab. Großporige Sandböden haben aufgrund ihrer zahlreichen Grobporen eine größere Wasserleitfähigkeit, als Tonböden.

Der gesättigte Wasserfluss kann durch die Darcy-Gleichung beschrieben werden:

$$q = k \frac{dh}{dl}$$

q ... der Wasserfluss durch eine Fläche je Zeiteinheit (in $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

k ... Materialkonstante, drückt die Bodeneigenschaften aus (in cm s^{-1})

dh ... der Potentialunterschied als Höhe ausgedrückt (in cm)

dl ... die Fließstrecke (in cm)

Die Tatsache, dass die Fließbewegung vom höheren zum niedrigeren Potential gerichtet ist, wird manchmal durch ein Minuszeichen vor der rechten Seite der Gleichung gekennzeichnet. Der Koeffizient k ist ein Ausdruck der Bodeneigenschaften (nach Scheffer und Schachtschabel 1982).

2.3 Die Wirkung der Bodenbearbeitung auf Boden und Nutzpflanzen

Ziel der Bodenbearbeitung ist es, auf Ackerböden möglichst gute physikalische, chemische und phytosanitäre Bedingungen für das Wachstum von Nutzpflanzen zu schaffen. Die Bodenfruchtbarkeit soll dabei langfristig erhalten werden. Im mechanisierten Ackerbau stehen eine große Anzahl von verschiedenen geformten und verschieden tief arbeitenden Werkzeugen zur Bodenbearbeitung zur Verfügung. Dabei können verschiedene Funktionen unterschieden werden.

Bei der *Stoppelbearbeitung* wird nach der Ernte der Vorfrucht verbleibendes Pflanzenmaterial auf eine Tiefe von etwa 15 cm in den Boden eingearbeitet. Dieser Schritt beschleunigt die Rotte des Pflanzenmaterials und bereitet den Boden für die nachfolgende, tiefere Bearbeitung vor. Unkraut- und Ausfallsamen werden zur Keimung angeregt. Die Stoppelbearbeitung wird unter anderem mit Grubbern oder Scheibeneggen durchgeführt.

Bei der *Primärbodenbearbeitung* wird der Boden bis zu einer Tiefe von 40 cm gelockert und/oder gewendet. Dieser Arbeitsschritt erfolgt in Europa meist im Herbst, ist aber auch im Frühjahr möglich. Dabei wird das organische Material weiter in den Boden eingearbeitet. Nach der Stoppelbearbeitung aufgelaufene Jungpflanzen werden bekämpft. Die Primärbodenbearbeitung stellt einen massiven mechanischen Eingriff in den Boden dar. Sie verändert die physikalischen, chemischen und biologischen Bedingungen im Boden. Die Primärbodenbearbeitung wird meist mit dem Pflug, mit Grubbern oder Fräsen durchgeführt.

Die *Saatbettbereitung* erfolgt unmittelbar vor der Saat der Nachfrucht. Die Saatbettbereitung beschränkt sich auf eine Tiefe von einigen Zentimetern. Sie soll optimale technische Bedingungen für die Saat und für die Keimung der Nachfrucht schaffen. Diese Arbeit wird mit verschiedensten Eggen durchgeführt.

Diese Abfolge an Arbeiten wird, bei Verwendung des Pflugs, als konventionelle Bodenbearbeitung bezeichnet. Sie ist die traditionelle Form der Bodenbearbeitung in Europa, und wird nach wie vor von den meisten europäischen Ackerbäuerinnen und -bauern verwendet.

Die Wahl der richtigen Bodenbearbeitung ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Sie muss auf die Vorfrucht und die nachfolgende Hauptfrucht abgestimmt sein. Sie muss den klimatischen Bedingungen und vor allem dem zu bearbeitenden Boden angepasst sein. Sie sollte die Ressourcen Boden und Wasser schonen, und ökonomischen Zielsetzungen gerecht werden. Das sind teilweise widersprüchliche und schwer vereinbare Anforderungen.

Neben den genannten Vorteilen bringt die intensive Bodenbearbeitung auch eine Reihe von Nachteilen mit sich. Bodenbearbeitung ist *zeit- und kostenintensiv*. Stadler et al. (2005) geben eine notwendige Arbeitszeit von 11 Arbeitskraftstunden ha^{-1} für die konventionelle Bestellung von Winterweizen an. Weiters stellt die Bodenbearbeitung einen massiven *Eingriff in die Ökologie des Bodens* dar. Die Wirkungen der Primärbodenbearbeitung sind stark von Boden- und Klimaverhältnissen abhängig, und müssen daher anhand der regionalen Bedingungen bewertet werden. Studien von Kosutič et al. (2005) und Payne et al. (2001) zeigen, dass die Pflugarbeit zu einer *Verringerung der Wasserspeicherfähigkeit* des Bodens führen kann. In semi-ariden oder ariden Gebieten mit leichten Böden kann das zu einer schlechten Wasserversorgung der Bestände führen. Pflügen kann durch die *Verringerung der Agregatstabilität* auch zu massiven Erosionsproblemen führen. Die Befahrbarkeit des Bodens kann durch die Lockerung beim Pflügen herabgesetzt werden.

Ökonomische und ökologische Probleme weckten v.a. bei Bäuerinnen und Bauern in trockeneren Gebieten das Interesse nach Alternativen zu ihren traditionellen Methoden. Der globale Klimawandel fügt dem ein neues Motiv hinzu. In vielen Gebieten wird in Zukunft mit stärkerer Aridität gerechnet, eine Anpassung der Landwirtschaft ist notwendig. Die Grafik 2.6 zeigt die Alternativen zur intensiven Bodenbearbeitung. Die Bodenbearbeitung kann weitgehend extensiviert werden. Der mischende und wendende Pflug kann durch nur mischende Werkzeuge (z.B. Grubber) ersetzt werden. Die Bearbeitungstiefe und die Anzahl der Überfahrten kann reduziert werden. Die extensivste Form der Bestellung ist ein völliger Verzicht auf die Primärbodenbearbeitung. Dies wurde durch technische Neuerungen in der Sätechnik ermöglicht: Bei der Direktsaat wird das Saatgut mit Hilfe spezieller Säscharen unter die Mulchschicht an der Bodenoberfläche eingebracht. Je nach Beschaffenheit des Mulchs kann eine vorhergehende Zerkleinerung der Pflanzenreste notwendig sein. Durch die Direktsaat bleibt eine naturnahe Lagerung und Schichtung des Bodens erhalten. Negative Effekte der Primärbodenbearbeitung können vermieden werden.

Diese Extensivierung hat zahlreiche Auswirkungen auf das Agrarökosystem. In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie sich ein Verzicht auf Pflug und Egge auf die Bedingungen im Boden und damit auf das Pflanzenwachstum auswirkt. In der Literatur sind einige Wirkungen der Pflugarbeit beschrieben:

2.3.1 Lagerungsdichte und Porenanteil

Beim Pflügen werden Pflugbalken aus dem Bodenverband gelöst, die Balken werden gewendet und mehr oder weniger stark gemischt und gelockert. Der Pflug hinterlässt eine unebene Bodenoberfläche, auf der sich kaum mehr Erntereste befinden. Durch den Druck den die Schare auf den Boden ausüben, können sich zum Teil auch verdichtete Bodenkluten bilden. Es überwiegt aber die Lockerung des Bodens. Die Lockerung führt vor allem durch eine Zunahme der Grobporen ($>50 \mu\text{m}$) zu einer Erhöhung des Porenvolumens, einer Verminderung der Lagerungsdichte, zur Lösung des Bodenverbandes und zur Herabsetzung des Bodenwiderstandes gegenüber Massebelastungen (Hess und Franken, 1987).

Möglicher Geräteeinsatz bei:											
	Konventioneller Bodenbearbeitung		Konservierender Bodenbearbeitung				Direktsaat				
Vorfrucht	WG/WW/ Flächenstilllegung		WG/ Flächenstilllegung		WW		Getreide				
Juli/August											
August	mechanische Beikrautkontrolle/Herbizid?										
Zwischenfrucht	ohne		mit		ohne		ohne				
September											
Oktober											
Bodenart	T-tL	IU-U	T-tL	IU-U	IU-U	T-tL	IU-U	T-tL	IU-tL		
Februar	Frost		mechanische Beikrautkontrolle/Herbizid?								
April											
möglicher Bedeckungsgrad in %	0	0	50	25	35	70	15	30	>70-100		
Problembereich											
	konventionelle Saat ohne mit Saatbettbereitung		Mulchsaat ohne mit ohne Saatbettbereitung			Mulchsaat mit ohne Saatbettbereitung		Direktsaat			
Verschlämmung	-	-	xx	x	xx	o	x	xx	xx		
Bodenerosion	o	-	xx	x	xx	o	x	xx	xx		
Bodenverdichtung	x	-	x	x	xx	x	xx	xx	xx		
Nitrataustrag	-	-	xx	xx	xx	o	o	o	x		
Kosten	x	o	o	-	x	x	xx	xx	xx		

Abbildung 2.6: Schema der Bodenbearbeitung (nach Brunotte und Sommer aus Monsanto 2007)
 (xx = sehr gut; x = gut; o = befriedigend; - = unbefriedigend; T = Ton; tL = toniger Lehm; IU = lehmiger Schluff; U = Schluff)

Nach dem Pflügen führen weitere Bearbeitungsschritte (Packer, Walzen etc.) Schwerkraft, Niederschläge und Befahren zu einer Rückverdichtung des Bodens. Der Ackerboden kehrt langsam wieder zu seiner ursprünglichen Lagerungsdichte zurück. Die Effekte, die das Pflügen auf den Boden hat sind daher reversibel. Die Befahrung mit schweren Maschinen und/oder Bearbeitungsfehler können aber auch zu Schadverdichtungen führen.

2.3.2 Pflugsohlenbildung

Unter dem gepflügten Horizont kann eine über die natürliche Lagerung hinausgehende Verdichtung entstehen. Das wird durch den Druck den die Pflugschare auf den Unterboden ausüben, und das Befahren der Pflugfurche mit dem Traktorrad verursacht. Pagliali (1990) stellte fest, dass sich die verdichtete Pflugsohle bei einem lehmigen Boden über eine Tiefe von etwa 10 cm erstreckt.

Pflugsohlen können zahlreiche schädliche Wirkungen entfalten. Über Pflugsohlen kann sich stauende Nässe bilden. Dabei kann Fäulnis entstehen. Die Pflugsohle behindert das Wurzelwachstum und schränkt damit das Bodenvolumen ein, das den Pflanzen zur Nährstoff- und Wasseraufnahme zur Verfügung steht. Ide und Hofman (1990) berichteten über den Effekt von Pflugsohlenauflockerungen in schluffig-lehmigen Böden auf den Ertrag von Feldfrüchten. Die Erträge von Zuckerrübe und Wintergetreide stiegen um 5-10%.

Pagliali (1990) ermittelte, dass es rund ein Jahr dauert bis sich Verdichtungen in einem lehmigen Oberboden auflösen. Im Unterboden kann mit längeren Zeiträumen gerechnet werden. Die biologische Aktivität ist in diesen Horizonten geringer. Pflugsohlen können daher auch noch nachwirken, nachdem die Bodenbearbeitung umgestellt wurde. Biologische Aktivität und Frostgare sind natürliche Faktoren die zu einem Aufbrechen von Bodenverdichtungen führen. Mittels Unterbodenlockerung können Verdichtungen technisch beseitigt werden. Die technische Lockerung ist aber oft nicht nachhaltig, und muss nach erneuten Verdichtungen wiederholt werden.

2.3.3 Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens

Unmittelbar beim Pflügen werden tiefergelegene, feuchtere Bodenschichten an die Bodenoberfläche befördert und beginnen abzutrocknen. Ein Teil des Bodenwassers geht auf diese Weise verloren. Messungen des Bodenwassergehalts zeigten aber auch nach einer Wiederbefeuchtung des Bodens durch Niederschläge verringerte Bodenwassergehalte gepflügter Böden (Kosutić et al. 2001; Rischbeck 2004). Der Grund dafür liegt in einer Veränderung der Porengrößenverteilung im Boden. Für einen Tschernosem aus Löss ermittelte Hofmann (2005) eine Erhöhung des Gesamtporenvolumens durch eine Vermehrung der Grobporen, bei gleichzeitiger Verringerung des Volumens von Mittel- und Feinporen durch die Pflugarbeit. Auf der pF-Kurve (Abbildung 2.7) zeigt sich die Veränderung der Porengrößenverteilung als Verschiebung des Sättigungspunktes zu höheren Wasseranteilen und der Feldkapazität ($FK = pF\ 1,8-2,5$) und des permanenten Welkepunktes ($PWP = pF\ 4,2$) zu niedrigeren Wasseranteilen. Diese Veränderungen sind vor allem im geegigten Horizont (0-5 cm), aber auch im gepflügten Horizont (10-15 cm) zu erkennen. Der Pflughorizont entwässert bei der Abtrocknung stärker, niedrigere Bodenwassergehalte werden früher erreicht. Der Abstand zwischen FK und PWP verringert sich. Im Unterboden, der vom Pflug nicht beeinflusst ist, gibt es kaum Unterschiede zwischen den Varianten.

Die Veränderungen im Oberboden haben verschiedenste Auswirkungen auf den Wasser-, Nährstoff- und Energiehaushalt. Bei Starkniederschlägen kann der gepflügte Boden kurzfristig mehr Wasser aufnehmen. Die Sättigung wird unter natürlichen Bedingungen aber nur sehr selten, und wenn dann nur kurzfristig erreicht. Nach einem Regenereignis beginnt der gepflügte Boden durch die vermehrten Grobporen stärker zu dränen. Die Befeuchtungsfrent dringt tiefer in den Boden ein (wenn Sie nicht durch die Pflugsohle behindert wird). Der Oberboden kann weniger Wasser gegen die Schwerkraft halten. Bei Erreichen der Feldkapazität ist der Bodenwassergehalt des gepflügten Bodens bereits niedriger als der des natürlich gelagerten Bodens. Die Abtrocknung des Oberbodens beginnt von einem niedrigeren Ausgangspunkt. Verschiedene Studien (Kosutić 2001, Rischbeck 2004) zeigen, dass der volumetrische Wassergehalt des Oberbodens durch die Pflugarbeit

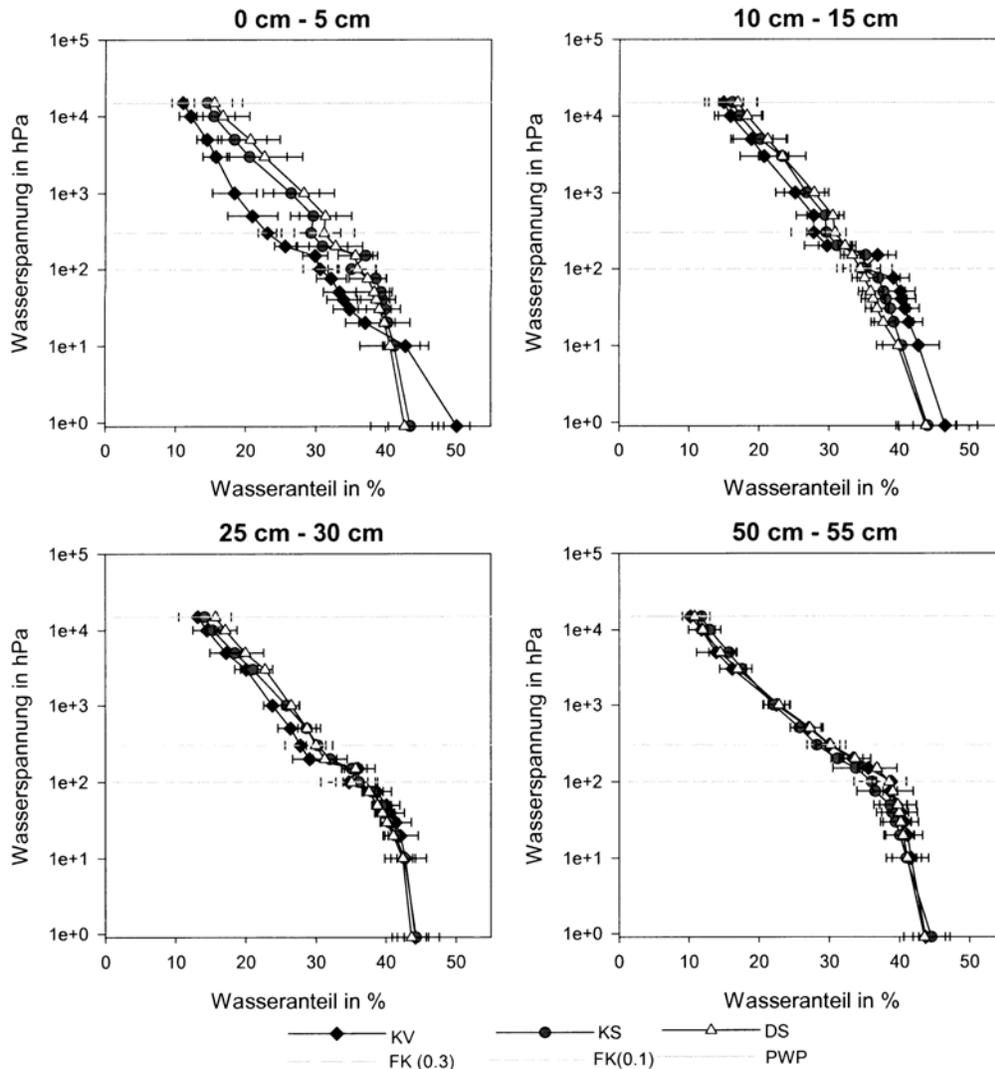


Abbildung 2.7: Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung der Bearbeitungsvarianten in Mistelbach (aus Hofmann 2005) (KV...gepflügte Variante; KS...Mulchsaat; DS...Direktsaat; FK...Feldkapazität; PWP...permanent Welkepunkt)

während der gesamten Vegetationsperiode gesenkt wird. Ein geringeres Volumen der Mittelporen bedeutet auch eine geringere von den Pflanzen nutzbare Feldkapazität (nFK):

$$nFK = FK - PWP$$

nFK ... nutzbare Feldkapazität

FK ... Feldkapazität

PWP ... permanenter Welkepunkt

Das aktuell für die Pflanzen verfügbare Bodenwasser verringert sich. Rischbeck (2004) stellte auf einem Lössstandort eine Reduktion des pflanzenverfügbaren Bodenwassers unter Winterweizen im Jahr 2002 um rund 40% fest. Wenn der aktuelle Bodenwassergehalt näher am permanenten Welkepunkt liegt, müssen die Pflanzen höhere Wasserspannungen überwinden um dem Boden Wasser zu entziehen. Da Nährstoffe nur in gelöster Ionenform von den Wurzeln aufgenommen werden können, ist eine geringere Wasserverfügbarkeit gleichbedeutend mit einer geringeren Nährstoffverfügbarkeit. Die durch das Pflügen verringerte Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit kann vor



Abbildung 2.8: links: Die Infiltration von gefärbtem Wasser in einen minimal bearbeiteten Boden
rechts: Infiltration in einem gepflügten Boden (Quelle: Anken 2002)

allen auf trockenen Standorten und in Jahren mit geringen Niederschlägen während der Vegetationsperiode zu Ertragsverlusten führen. Bei einem Feldversuch auf Löss in Pixendorf, NÖ kam es in einem trockenen Jahr (2003, Jahresniederschlag: 461 mm) zu einem um 32% höheren Ertrag von Körnermais in der direkt gesäten Variante. In einem eher feuchten Jahr (1999, Jahresniederschlag: 793 mm) zeigte sich die gepflügte Variante überlegen. Der Körnermaisertrag nach Pflug lag um 25% über der direkt gesäten Variante. Wenn das pflanzenverfügbare Wasser im Boden den limitierenden Faktor darstellt, erweist sich der Verzicht auf den Pflug auf Lössstandorten als günstig.

2.3.4 Infiltration und kapillarer Aufstieg

Das Infiltrationsvermögen des gepflügten Horizonts wird durch die Bearbeitung kurzfristig deutlich verbessert. Rischbeck (2004) stellte eine Erhöhung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k) auf einem Pseudogley (lehmiger Schluff) um den Faktor 2,5 fest. Dieser Effekt reicht aber nur bis zur Pflugsohle. In der Pflugsohle ist der k -Wert in Folge der Verdichtung und dem Verlust an Grobporen meist stark reduziert. In der Abbildung 2.8 ist die gute Infiltration und Verteilung des Wassers im Pflughorizont erkennbar. Unter dem Pflughorizont staut sich das Wasser an der Pflugsohle (Pfeil) und kann nur langsam in den verdichteten Unterboden eindringen.

Bei einer Umstellung auf Direktsaat ist die Infiltration im Oberboden demnach mittelfristig schlechter, oft sind auch noch rezente Pflugsohlen vorhanden. Langzeitbeobachtungen zeigen aber, dass sich die Infiltration im naturnäheren Boden vor allem durch verstärkte Bildung biogener Poren durch Regenwürmer und andere Bodenorganismen verbessert. Die Anzahl biogener Vertikalporen ist nach Sommer et al. (1997) bei konservierender Bodenbearbeitung 3-4 mal höher als bei konventioneller Bodenbearbeitung. Bei Aufbrechen der Pflugsohlen kann die Infiltration dann über das gesamte Profil gleichmässiger und günstiger sein. Die Abbildung 2.8 zeigt den präferentiellen Fluss durch Regenwurmröhren (Pfeile) in einem minimal bearbeiteten Boden.

Auf grundwassernahen Standorten spielt auch der kapillare Aufstieg eine grössere Rolle für den Bodenwasserhaushalt. Untersuchungen auf grundwassernahen Standorten (Wagentristl 1998) zeigen, dass die Kontinuität der Kapillaren durch die Bodenbearbeitung unterbrochen werden kann.

Bei tieferer Bearbeitung kann das den Aufstieg von Wasser aus dem Grundwasser unterbrechen. Bei seichter Bearbeitung kann bei manchen Böden die Evaporation durch die Unterbrechung der Kapillaren verringert werden.

2.3.5 Energiehaushalt des Bodens

Die Primärbodenbearbeitung führt zu einer Schaffung von Grobporen, und damit zu einer Durchlüftung des Oberbodens. Das Pflügen ersetzt damit den relativ guten Wärmeleiter Wasser durch den Wärmeisolator Luft. Gleichzeitig verringert sich die Kontaktfläche der Bodenteilchen zueinander, über die der Wärmetransport stattfinden kann. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens wird herabgesetzt.

Der gepflügte Boden erwärmt sich daher bei Einstrahlung an der Oberfläche rascher, und gibt weniger Energie an die unteren Bodenschichten ab. In der Nacht kühlt der Oberboden dann auch stärker aus. Im Oberboden (bis ca. 20 cm) sind daher stärkere Temperaturamplituden nach dem Pflügen feststellbar (Rischbeck 2004). Im Frühjahr kann sich der gepflügte Boden rascher erwärmen. Das kann zu günstigeren Keimbedingungen für Sommergetreide oder eine früher einsetzende Entwicklung des Wintergetreides führen.

2.3.6 Aggregatstabilität und Erosion

Barzegar et al. (2003) ermittelten eine Verbesserung der Aggregatstabilität bei Reduzierung der Bodenbearbeitung. Durch die Pflugarbeit wird das Bodengefüge zerstört, bestehende Aggregate werden zerkleinert und andere geschaffen (Kluten). Der Boden ist in diesem Zustand anfälliger für Erosion und Verschlammung.

Die Beseitigung des organischen Materials beim Pflügen trägt ebenfalls zur Erhöhung des Oberflächenabflusses und der Wassererosion in Hanglagen bei. In einem Langzeitversuch am Standort Mistelbach wurde eine Erhöhung des Bodenabtrages von $0,63 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Direktsaat auf $3,52 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Pflugarbeit festgestellt (Hofmann 2005). Der Verlust an Nährstoffen und organischer Masse ist dementsprechend höher.

2.3.7 Humus und Mulch

Der Pflug trennt Pflugbalken aus dem Bodenverband, wendet und mischt sie. Beim Pflügen wird daher ein Großteil der organischen Masse in die untere Hälfte des Pflughorizonts vergraben. Die vergrabene organische Masse kann bei Sauerstoffmangel aufgrund stauender Nässe oder schweren Bodens zu anaerobem Abbau und Fäulnis führen. An der Oberfläche werden die Pflanzenreste entfernt. Der so entstehende "reine Tisch" erleichtert das anschließende Eggen und Säen. Jede Primärbodenbearbeitung trägt Sauerstoff in den Bearbeitungshorizont ein. Die aerobe mikrobielle Aktivität wird angeregt. Ein verstärkter Abbau der organischen Substanz wird ausgelöst. Freierwerdende Nährstoffe stehen dem Pflanzenwachstum (z.B. im Herbst zur Saat der Winterungen) zur Verfügung, können aber auch vor allem in Form von Nitrat ausgewaschen werden. Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, verbleibt die organische Masse als Mulch an der Oberfläche wenn auf das Pflügen verzichtet wird. Die natürliche Schichtung des Bodens bleibt dabei weitgehend erhalten. Kurzfristig verändert der Pflug nur die Verteilung der organischen Masse in den Bodenhorizonten. Langfristig führt das Pflügen aber zu einem stärkeren Abbau des Humus, bzw. die Direktsaat zu einer Akkumulation von Dauerhumus an der Oberfläche. Bei einem Langzeitversuch in Indiana, USA

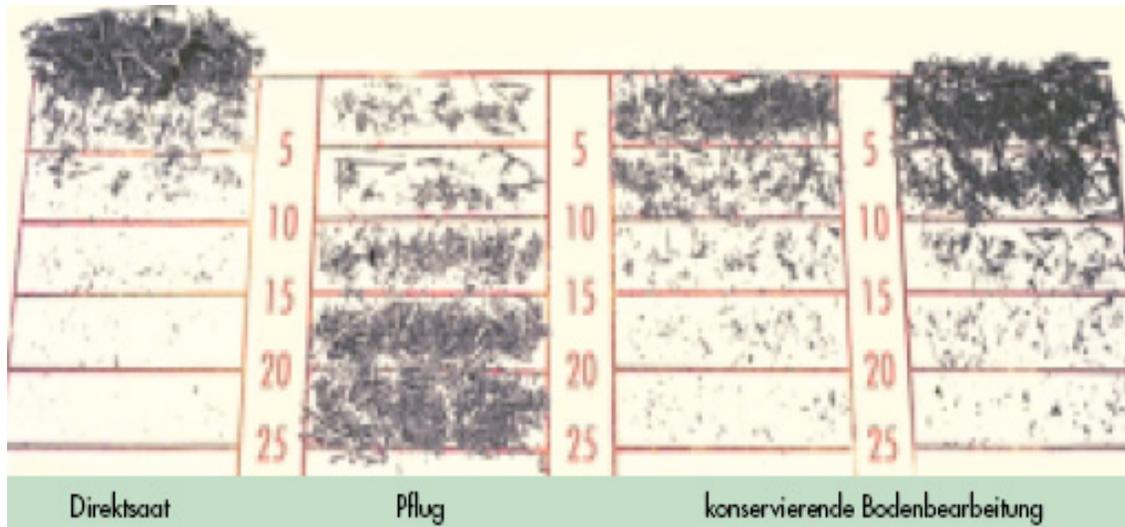


Abbildung 2.9: Die Einarbeitung von organischem Material bei der Bodenbearbeitung (aus Monsanto 2007)

wurde bereits nach 7 Jahren Maismonokultur ohne Pflug ein signifikanter Anstieg des organischen Kohlenstoffgehalts im Oberboden festgestellt (Frazee 2006).

Die Mulchschicht an der Oberfläche des Bodens hat einige günstige Eigenschaften. Sie reduziert den Oberflächenabfluss und damit die Erosion. Sie verhindert Verschlammung und Krustenbildung und verbessert damit die Regenverdaulichkeit. Sie unterdrückt die unproduktive Evaporation und verzögert damit eine Abtrocknung des Bodens. Die Wassernutzungseffizienz von Kulturpflanzenbeständen wird damit erhöht. Je nach Beschaffenheit des abgestorbenen Pflanzenmaterials kann die Mulchschicht die Saat behindern. Vor der Direktsaat kann daher eine Zerkleinerung der Mulchschicht (z.B. mit der Spatenrollegge) notwendig sein. Für die Saat selbst müssen Schare verwendet werden, die nicht vom Mulch behindert werden.

2.3.8 Bodenleben und Pflanzenschutz

Der Boden ist Lebensraum für eine Vielzahl an Organismen, die wichtige ökologische Funktionen wie den Abbau von Humus und die Freisetzung von Nährstoffen erfüllen. Dieses Bodenleben reagiert empfindlich auf eine Veränderung der Umweltbedingungen. Jede Bodenbearbeitung zerstört oder tötet durch einen mechanischen Eingriff zahlreiche Kleinsäugetiere, Insekten und Larven, Pilzmyzelien, Kräuter und Gräser u.s.w.

Auf der einen Seite wird das von den Bäuerinnen und Bauern erwünscht, weil damit Beikräuter und Schaderreger wie z.B. Kartoffelkäferlarven oder Sporangien von Schadpilzen vergraben werden. Auf der anderen Seite werden aber auch viele Nützlinge mit vergraben. Besonders problematisch ist die Vernichtung von Regenwürmern, die Bodenverdichtungen abbauen können, und den Boden mischen und verdauen.

Die Direktsaat schont für den Pflanzenbau nützliche und schädliche Bodenorganismen. Ausfallgetreide und Ungräser können als „grüne Brücke“ für Krankheiten und Schädlinge wie Rostpilze und Getreideblattläuse dienen. Ein verstärkter Befall mit Nacktschnecken ist zu erwarten, gleichzeitig nehmen aber auch räuberische Käfer und Schlupfwespen zu. Bei Getreide und Mais können ver-

mehrt Fusariosen auftreten (Davies et al. 2006). Einseitige, mais- und getreidestarke Fruchtfolgen sollten daher bei Minimalbodenbearbeitung vermieden werden.

Die größten Pflanzenschutzprobleme im Zusammenhang mit pflugloser Bearbeitung sind Beigräser und Beikräuter. Nach Schartow (1998) kann der totale Verzicht auf eine Herbizidbehandlung bei konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren bei Silomais zu Ertragseinbußen von bis zu 46% führen. Buhler (1995) stellte in verschiedenen Feldversuchen die Wirkung der reduzierten Bodenbearbeitung auf den Unkrautdruck fest. Es kam zu vergrößerten Populationen von ausdauernden Arten, sommerannuellen Gräsern, 2-jährigen Arten und winterannuellen Arten. Die Dichte von großsamigen, zweikeimblättrigen Pflanzen ging eher zurück (Buhler 1995). Ein sachgerechter Pflanzenschutz erfordert beim Verzicht auf das Pflügen mehr Wissen und Erfahrung. Meist sind auch intensivere mechanische oder chemische Pflanzenschutzmaßnahmen, vor allem zur Beikrautkontrolle, nötig. Im ökologischen Landbau wird aufgrund einer befürchteten Zunahme von Beigräsern und -kräutern meist der Pflug verwendet. Die reduzierte oder Minimalbodenbearbeitung ist aber auch im Ökolandbau bei entsprechender Kulturführung möglich. Der Verzicht auf Herbizide macht eine Einbindung von konkurrenzstarken Fruchtfolgegliedern (z.B. Luzerne), eine Überwachung und mechanische Bekämpfung der Beikräuter und -gräser und eventuell eine abwechselnde Verwendung von Minimalbodenbearbeitung und wendender oder nicht-wendender Bodenbearbeitung nötig.

Die phytosanitäre Situation ist sehr stark von den klimatischen Bedingungen abhängig. Feuchte Klimate fördern eher Pilze und bestimmte Beikräuter, während warm-trockene Klimate Insekten begünstigen. Die Eignung einer Region für die Direktsaat ist daher auch vom Beikraut-, Schädlings- und Krankheitsdruck abhängig.

2.3.9 Die Wirkung der Egge auf das Bodengefüge

Eggen führt zu einer Zerschlagung von Kluten und Bodenaggregaten, die der Pflug zurück gelassen hat. Die Bodenoberfläche wird eingeebnet, was bei herkömmlicher Sätechnik eine gleichmäßige Tiefenablage der Saat ermöglicht. Die Bodenoberfläche wird durch die Egge stark gelockert. Weil dadurch Lagerungsdichte und Eindringwiderstand herab gesetzt werden, werden gute Bedingungen für die Etablierung eines Wurzelsystems geschaffen.

Untersuchungen des geeegten Oberbodens (Hofmann 2005) zeigen, dass die Egge im Wesentlichen die Effekte des Pflugs verstärkt. Die Aggregatstabilität wird weiter herabgesetzt, was die Neigung zu Erosion und Verschlammung erhöht. In die Porenverteilung wird noch stärker eingegriffen als beim Pflügen. Der geeegte Boden neigt daher dazu, bei Befeuchtung und Abtrocknung Krusten zu bilden. Wagentristl (1998) weist darauf hin, dass Fehler in der Sekundärbodenbearbeitung ähnlich wie das Pflügen zu Verdichtungen unter dem bearbeiteten Horizont führen können.

Für die Keimung des abgelegten Kornes ist ein sehr lockerer Boden, wie er durch die Egge geschaffen wird, ungünstig. Unmittelbar nach der Saat wird der Boden rund um das abgelegte Korn daher mit Nachläufern oder Walzen rückverdichtet. Nur so wird ein Bodenschluss rund um das Korn erzeugt, und dem Keimling wird genügend Wasser zugeführt. Der Keimling findet den nötigen Halt für das Eindringen der Keimwurzel in den Boden.

Bei der Direktsaat wird das Korn in einen dichter gelagerten und oft feuchteren und kühleren Oberboden abgelegt. Die meisten Kulturen kommen mit diesen teilweise ungünstigeren Keimbedingungen gut zurecht. Bei Mais und Getreide konnte kein schlechterer Ausgang im Vergleich zur konventionellen Saatbettbereitung (Schlichtner 2003) beobachtet werden.

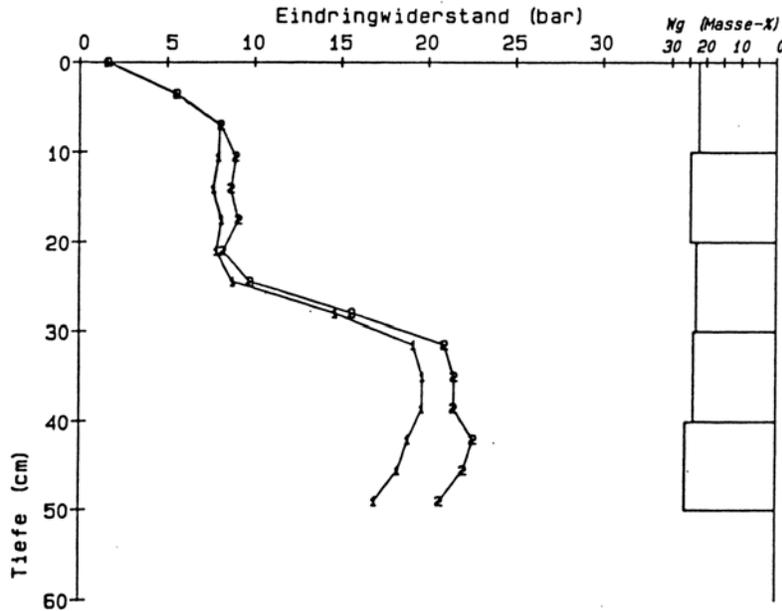


Abbildung 2.10: Korrigierter Penetrometerwiderstand bei über die Bodentiefe gleichem Wassergehalt (aus Eitzinger 1991) (1 = Pflug 24 cm ohne Feuchtekorrektur; 2 = Pflug 24 cm mit Feuchtekorrektur auf 22 Massenprozent; Wg...gravimetrischer Wassergehalt)

Bei manchen kleinsamigen Kulturen wie Leinsaat kann der dichtere Boden zu Problemen beim Aufgang führen (Fouk et al. 2005).

Beim Wachstum des Sekundärwurzelsystems werden die Wurzeln durch eine zu hohe Verdichtung des Bodens behindert. Eine Maßzahl für das mögliche Wurzelwachstum ist der Eindringwiderstand im Boden. Der Eindringwiderstand hängt vor allem vom Bodenwassergehalt und von der Lagerungsdichte des Bodens ab. Die Lagerungsdichte im gepflügten Boden ist niedriger, die Sauerstoffversorgung ist besser und die Bodentemperaturen sind oft höher. Dem entsprechend treten hier im Frühjahr oft gute Wachstumsbedingungen für das Wurzelsystem auf. Im Sommer trocknet der gepflügte Boden schneller ab. Der Eindringwiderstand für die Wurzeln wird im Vergleich zum feuchteren, unbearbeiteten Boden erhöht. Das ist aber nur für Kulturen relevant, deren Wurzelsystem zu dieser Jahreszeit noch expandiert (z.B. Mais).

Bearbeitungssohlen führen zu sehr ungünstigen Bedingungen für das Wurzelwachstum. Das Wurzelsystem dringt aufgrund von Verdichtungen nicht sehr tief in den Boden ein. Eitzinger (1991) zeigt den typischen Verlauf des Eindringwiderstands in einem gepflügten und geggten Boden (siehe Abbildung 2.10). Zu erkennen ist die lockernde Wirkung der Egge an der Bodenoberfläche und die Pflugsohle, bei der der Widerstand in etwa 25 cm Tiefe sprunghaft ansteigt. Nicht bearbeitete Böden zeigen meist höhere Eindringwiderstände im Oberboden die mit der Tiefe kontinuierlich zunehmen.

2.3.10 Das Dickenwachstum von Ernteorganen

Vor allem bei Kulturen deren Ernteorgane im Boden gebildet werden, wie z.B. Rüben, kann es bei Bodenverdichtungen zu Problemen kommen. Rüben bilden bei Verdichtungen kleinere Rübenkörper

aus, und neigen zur Beinigkeit. Die Ursache ist der Widerstand, den der Boden der Verdickung der Ernteorgane entgegensetzt. Pabin et al. (1990) ermittelten, dass die Zuckerrübenenerträge mit steigender Lagerungsdichte linear abnehmen. Negative Effekte wurden ab einer Lagerungsdichte von $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ (Optimum: $1,5 \text{ g cm}^{-3}$) und ab einem Penetrometerwiderstand von $3,75 \text{ MPa}$ (Optimum $1,75 \text{ MPa}$) festgestellt. Rüben können daher nur auf mittelschweren bis leichten Böden direkt gesät werden.

Kulturen die gepflanzt werden, wie z.B. die Kartoffel, brauchen einen lockeren Boden in den das Pflanzgut eingebracht werden kann. Nach der Blüte brauchen die Stolonen einen warmen und lockeren Boden um zu expandieren. Vor dieser Kultur kann daher auf eine Bodenbearbeitung nicht verzichtet werden.

Bei vielen in Europa üblichen Fruchtfolgen ist daher eine Kombination aus konventioneller, reduzierter und Minimalbodenbearbeitung sinnvoll. Der genossenschaftliche Erwerb von technischer Ausrüstung (z.B. Maschinenringe) kann hierfür zielführend sein. Die Wahl der Bodenbearbeitung soll sich u.a. nach den Ansprüchen der jeweiligen Hauptfrucht richten.

2.4 Die Reaktion von Nutzpflanzen auf Trockenstress

Das Marchfeld, das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, kann bei einem mittleren Jahresniederschlag von 568 mm und einer Jahresmitteltemperatur von $9,7^\circ\text{C}$ (Groß-Enzersdorf 1851-1950, Müller 1993) als semi-arid bezeichnet werden. Das pflanzenverfügbare Bodenwasser während der Vegetationsperiode stellt einen wesentlichen limitierenden Faktor für den Pflanzenbau dar. Die jährliche Klimavariabilität ist wesentlich ausschlaggebend für die Ertragsvariabilität im Getreidebau. Das Verständnis des Wasserhaushalts im System Boden – Pflanze – Atmosphäre ist daher Vorbedingung für die Wahl einer geeigneten Kulturführung in diesem Gebiet.

2.4.1 Der Wasserhaushalt der Getreidepflanze

Für die Pflanze ist die Verfügbarkeit von Wasser lebensnotwendig. Nach Larcher (1994) ist Wasser das Grundmedium für alle biochemischen und physiologischen Reaktionen im Pflanzenkörper. Es ist Lösungs- und Transportmittel für organische und anorganische Stoffe, Quellungsmittel für Kolloide und Rohstoff für diverse Stoffwechselfvorgänge (z.B. der Photosynthese). Die höheren Pflanzen regulieren ihre Temperatur durch die Abgabe von Wasserdampf aus den Spaltöffnungen. Bei der Verdunstung von 1 g Wasser werden der Pflanze $2,1 \text{ kJ}$ an Wärmeenergie entzogen, die Pflanze wird entsprechend gekühlt. Wasser ist auch wesentlicher Bestandteil des lebendigen Pflanzenkörpers, Blätter enthalten $80\text{-}90$ Volumsprozent Wasser, Wurzeln bestehen zu $70\text{-}95$ Volumsprozent aus Wasser. Nur die reifen Körner enthalten mit etwa $10\text{-}15$ Volumsprozent wesentlich weniger Wasser.

Wasser folgt im System Boden – Pflanze – Atmosphäre einem Potentialgradienten. Es bewegt sich von Regionen mit höherem Potential (in MPa) zu Orten mit niedrigerem Potential. Im Boden liegt bei Wassersättigung ein Potential von 0 MPa vor. Im Laufe der Abtrocknung kann es auf Werte unter -5 MPa absinken. Die Pflanzenwurzeln können dem Boden etwa bis zum permanenten Welkepunkt ($-1,5 \text{ MPa}$) Wasser entziehen. Das Wasser gelangt dabei vom Boden über Wurzelhaare und Feinwurzeln in die Wurzelrinde. Der Weitertransport erfolgt über die Zellzwischenräume (bis zum Casparischen Streifen) oder durch die Zellen bis zum Xylem. Das Xylem führt durch Wurzel und Stängel in die Blätter. Im Xylemsaft liegen Wasserpotentiale zwischen $-0,5$ und $-1,5 \text{ MPa}$ vor. Im Blatt verteilt sich das Wasser im Stammparenchym, Pallisadenparenchym und in den Epi-

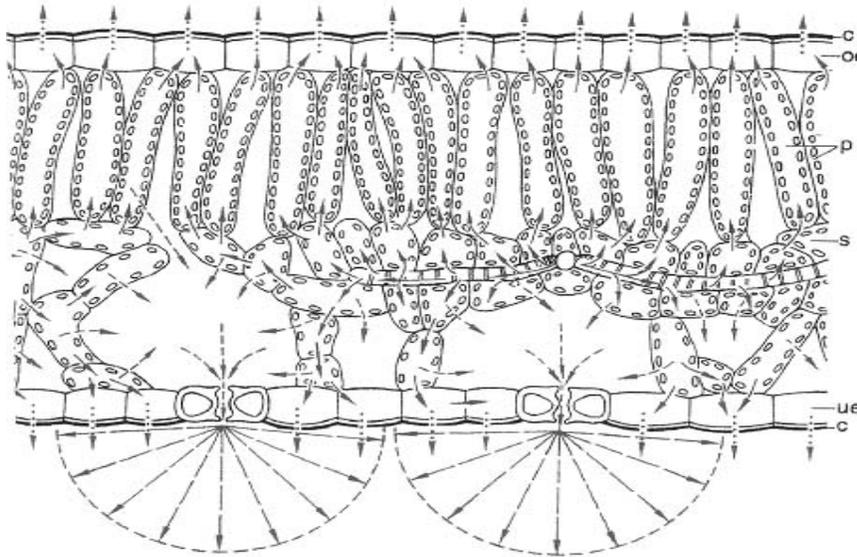


Abbildung 2.11: Die Transpiration eines Laubblatts (aus Nultsch 2001) (C = Cuticula; oe = obere Epidermis; p = Palisadenparenchym; ue = untere Epidermis; p = Palisadenparenchym, S = Schwammparenchym)

dermiszellen. In den Zellen des Blatts werden Potentiale zwischen $-0,5$ und $-2,5$ MPa erreicht. Das Parenchym gibt Wasserdampf in die mit Luft gefüllten Hohlräume im Blatt ab. Bei geschlossenen Spaltöffnungen stellt sich ein Gleichgewichtszustand mit dem Parenchym ein. Werden die Spaltöffnungen geöffnet, kann der Wasserdampf in die Atmosphäre diffundieren (siehe Abbildung 2.11). Trockene Luft hat sehr niedrige Wasserpotentiale (bei 20°C und 75% rF: -39 MPa; bei 20°C und 50% rF: -93 MPa). Der Potentialgradient zwischen Atmosphäre und Pflanze ist demnach viel größer, als der zwischen Pflanze und Boden. Die Pflanze muss sich daher vor der drohenden Austrocknung schützen. Das geschieht durch die Cuticula an der Oberfläche der Pflanzen, und durch den Schluss der Spaltöffnungen bei Trockenstress (nach Taiz und Zeiger 2006).

Die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre findet über die geöffneten Spaltöffnungen statt. Transpiration, Gasaustausch und Photosynthese sind daher direkt miteinander verknüpft. Die Transpiration korreliert daher stark mit der Biomasseproduktion der Pflanzen. Der Kennwert für diesen Zusammenhang ist der Transpirationskoeffizient, er drückt die Beziehung zwischen Wasserverbrauch einer Kultur/Sorte und der Trockenmasseproduktion aus. In Tabelle 2.3 sind die Transpirationskoeffizienten einiger Kulturpflanzen für das gemäßigte Klimagebiet angegeben. Besonders effizient sind die C4-Pflanzen Mais und Hirse. Diese Pflanzen sind an die Bedingungen in den semi-ariden Subtropen angepasst. Beim Brot- und Futtergetreide ist besonders Gerste und Hartweizen an trockenere Bedingungen angepasst. Weichweizen benötigt mehr Wasser, und wird daher oft auf besseren Böden angebaut.

Die Bestimmung der Transpiration ist für Fragestellungen in der Pflanzenphysiologie wesentlich. Die direkte Messung der Transpiration und der Blattleitfähigkeit wird mit Porometern durchgeführt (z.B. LI-COR 2007). Ein Blatt, das Wasserdampf an die Atmosphäre abgibt, erhöht damit die Luftfeuchtigkeit in der Umgebung. Die Menge des transpirierten Wasserdampfes wird bei der Messung mit einem Steady State Porometer dadurch bestimmt, dass sie durch Zugabe trockener Luft kompensiert wird, und damit die Luftfeuchte trotz Transpiration der Pflanze konstant bleibt. Über die Menge an zugeführter Luft kann die Transpiration berechnet werden.

Tabelle 2.3: Transpirationskoeffizienten wichtiger Kulturpflanzen (nach Günther 2003)

Pflanze	Transpirations- koeffizient (in g H ₂ O / g TM)
Winterweizen	308-321
Sommergerste	218-245
Zuckerrüben .	176-314
Kartoffeln	182-219
Mais	203
Buschbohne .	229
Gurke	430
Weißkohl	240-413
Zwiebel	257

Für agronomische Fragestellungen wird meist die Evapotranspiration als Kenngröße für den Wasserverbrauch eines Kulturpflanzenbestandes bestimmt. Die Evapotranspiration kann direkt mittels Feldlysimetern bestimmt werden. Diese Methode ist aber technisch aufwändig und teuer. Es wurde daher nach Möglichkeiten einer indirekten, leichter durchführbaren Bestimmung gesucht. Allen et al. (in FAO 1998) entwickelten eine Methode zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration von Kulturpflanzenbeständen. Im ersten Schritt wird die Evapotranspiration eines idealisierten Pflanzenbestandes nach dem Penman-Monteith Ansatz (kurz geschnittener; gut mit Wasser versorgter Rasen) berechnet.

$$E_{tp} = \frac{s(Q_s - G) \rho_a c_p \frac{E_s - e}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

E_{tp} .. Evapotranspiration (mm d⁻¹)

s ... Steigung der Kurve des Sättigungsdampfdrucks bei best. Lufttemp. T_m (kPa K⁻¹)

Q_s .. Strahlungsbilanz (MJ m⁻² d⁻¹)

G ... Bodenwärmestrom (MJ m⁻² d⁻¹)

ρ_a ... die mittlere Luftdichte bei konstantem Druck (kg m⁻³)

c_p ... die spezifische Wärmekapazität der Luft (MJ kg⁻¹ K⁻¹)

E_s ... Sättigungsdampfdruck (kPa)

e ... aktueller Dampfdruck (kPa)

r_a ... der aerodynamische Widerstand (s m⁻¹)

γ ... Psychrometernkonstante (kPa K⁻¹)

r_s ... der Oberflächenwiderstand (s m⁻¹)

Als Energiequelle geht in die Berechnung der Evapotranspiration die Strahlungsbilanz (Q_s) ein. Die an der Erdoberfläche absorbierte Sonnenenergie ist der Motor der Verdunstung. Ein Teil dieser eingestrahelten Energie erwärmt den Boden und die Pflanzen, und steht nicht für die Verdunstung zur Verfügung. Der Bodenwärmestrom (G) geht daher negativ in die Berechnung ein. In den Nachtstunden oder bei bedecktem Himmel kann der Bodenwärmestrom nach oben gerichtet sein. G erhält dann ein negatives Vorzeichen und wird zur Strahlungsbilanz addiert [$Q_s - (-)G$].

Die Aufnahmekapazität der Luft für Wasser hängt von ihrer Temperatur und ihrem Feuchtegehalt ab. Das wird durch das Sättigungsdefizit der Luft ($E_s - e$) berücksichtigt. Die Psychrometernkonstante und die Steigung der Kurve des Sättigungsdampfdrucks beschreiben die physikalischen Eigenschaften der Luft.

Einfluss auf die Verdunstung hat auch die Windgeschwindigkeit. Bei Windstille kann die dünne, feuchte Luftschicht über einem verdunstenden Körper (Boden, Pflanzen etc.) nicht abtransportiert werden. Es kommt rasch zu einer Sättigung dieser dünnen Luftschicht, durch die eine weitere Verdunstung behindert wird. Bei bewegter Luft wird die gesättigte Schicht ständig entfernt. Die Verdunstung wird dadurch erhöht. Die Windeffekt geht über den aerodynamischen Widerstand (r_a) in die Berechnung ein.

Die geringere Verdunstung einer Bodenoberfläche im Vergleich zu einer freien Wasseroberfläche, und die Unterdrückung der Transpiration durch die Cuticula und Stomataregulierung der Pflanzen wird durch den Oberflächenwiderstand (r_s) berücksichtigt.

Die Methode zur Berechnung der Evapotranspiration wurde von der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) für Kulturpflanzenbestände weiter adaptiert. Mit Hilfe von Korrekturfaktoren (sogenannte Kc-Faktoren) kann der Einfluss eines bestimmten Pflanzenbestandes (siehe Transpirationskoeffizienten) und die Versorgung mit Wasser aus dem Boden auf die Evapotranspiration berücksichtigt werden. Geringe Bodenwassergehalte hemmen die Verdunstung.

Über die Anpassungsschritte wird die aktuelle Evapotranspiration im Bestand (Etp_{adj} in mm d^{-1}) errechnet. Sie stellt sie einen guten Näherungswert an die tatsächliche Verdunstung dar.

2.4.2 Die physiologische Wirkung von Trockenstress

Durch Wassermangel bedingter Trockenstress hat zahlreiche negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum. Trockenheit tritt häufig in Verbindung mit Hitze auf. Viele Schäden sind daher auf gleichzeitigen Trocken- und Hitzestress zurück zu führen.

Die Pflanze nimmt Nährstoffe mit dem Wasser in gelöster Ionenform auf. Geringe Wasseraufnahme durch die Wurzeln führt daher oft zu einer verringerten Aufnahme von Ionen. Wassermangel und Nährstoffmangel treten daher häufig kombiniert auf.

Anorganische und organische Stoffe werden als Lösung in Xylem und Phloem transportiert. Wassermangel behindert daher die Verlagerung von Stoffen. Das kann bei Getreide zum Zeitpunkt der Kornfüllung z. B. zu Problemen bei der Assimilatverlagerung aus dem Stängel in die Körner führen.

Auf der Ebene der Zellen führt die Austrocknung der Pflanze zu einem Verlust des Turgordrucks. Die Konzentration von gelösten Stoffen im Zellsaft steigt an. Die Teilung und Expansion der Zellen wird behindert. Das Wurzelwachstum verringert sich, weil die Wurzeln bei geringem Zelldruck schlechter in den Boden eindringen können. Spross und Blätter sind in ihrem Höhen- und Flächenwachstum eingeschränkt. In den Zellen wird die Synthese von Stärke und Protein behindert (Geigenberger et al. 2003). Bei starker Dehydrierung der Zellen kommt es zur Plasmolyse, und zu einem Zerfall der Zellorganellen. Als Folge tritt der Zelltod ein.

Äußerlich sichtbares Symptom des Turgorverlusts sind Welkeerscheinungen der Pflanze. Bei Getreide kommt es zu einem Einrollen der Blätter. Der Zelltod wird in Form von Blattnekrosen sichtbar. Die Seneszenz älterer Blätter wird durch Trockenstress beschleunigt.

Die Pflanze schließt bei starkem Trockenstress, wie z. B. bei mittäglicher Hitze, die Stomata (Stockle und Dugas 1992). Dadurch wird zwar die Abgabe von Wasserdampf reduziert, aber auch die

Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Vor allem bei C3-Pflanzen (Weizen, Gerste, Reis, Beta-Rüben, Kartoffel usw.) kann die Assimilation dadurch eingeschränkt werden.

Bei starker Globalstrahlung tritt eine Überlastung des Photosyntheseapparates der Pflanzen (Photoinhibition) ein. Extreme Hitze und Strahlung können zu irreversiblen Schädigungen des Enzymsystems der Pflanzen, Blattnekrosen und Welkeerscheinungen führen. Ebenfalls zu einer Reduktion der Photosyntheseleistung führen geringere Chlorophyllgehalte trockengestresster Pflanzen.

Pflanzen zeigen verschiedene Strategien im Umgang mit Trockenstress. Nutzpflanzen aus den semi-ariden Subtropen wie Mais und Hirsen sind relativ trocken tolerant. Diese C4-Pflanzen weisen eine effizientere Kohlendioxidfixierung auf als C3 Pflanzen. Sie müssen daher die Stomata weniger lange offen halten, und können die Transpiration reduzieren.

Die meisten Gräser wie Weizen oder Gerste versuchen eher Trockenstress zu vermeiden. Sie reifen bereits vor der potentiell trockensten Jahreszeit im Hochsommer und Herbst ab. Das ist eine Anpassung an die klimatischen Bedingungen der Steppe, dem ursprünglichen Lebensraum der Wildgräser aus denen die modernen Getreidearten entstanden sind.

Ertragsphysiologie und Trockenstress im Getreidebau

Die meisten Getreidearten weisen Winter- und Sommerformen auf. Wintergetreide nutzt den – in der gemäßigten Zone – meist kühleren und feuchteren Frühling für das Wachstum. Sommergetreide weist ein verspätetes Wachstum im Frühling auf, und ist daher stärker von Trockenheit gefährdet (Taiz und Zeiger 2006).

Die pflanzenbauliche Bedeutung von Trockenstress bei Getreide hängt stark vom Zeitpunkt des Auftretens ab. Trockenstress hat je nach Entwicklungsstadium der Kulturpflanzen unterschiedliche Auswirkungen auf den Ertrag.

Nach der Abtrocknung im Sommer kommt es im Herbst häufig zu mangelnder Bodenfeuchte. Bei der Aussaat der Wintergetreide kann es daher zu verzögerter Keimung und schlechtem Aufgang kommen. Bei mangelhaften Beständen muss im Frühjahr umgebrochen werden.

Während dem vegetativen Wachstum im Frühling reagieren Getreidepflanzen sehr flexibel auf auftretenden Trockenstress. Brisson et al. (2001) untersuchten die Reaktionen von Winterweizen und Durumweizen im frühjahrstrockenen argentinischen Anbaugebiet. Die Bestockung von Weizen ging während Trockenphasen zurück. Manche Sorten waren aber in der Lage bei späterem Auftreten von Niederschlägen eine zweite Generation von Bestockungstrieben zu bilden. Die Ertragsleistung dieser Sorten ist stabiler.

Weizenpflanzen im vegetativen Stadium reduzieren bei Trockenstress das oberirdische Wachstum. Ältere Blätter werden früher seneszent. Der Blattflächenindex (BFI) bleibt deutlich gegenüber gut wasserversorgten Beständen zurück. Die geringere Bestandeshöhe und Oberfläche der Pflanzen führt zu geringeren Wasserverlusten durch Transpiration. Die geringere Oberfläche limitiert aber auch die Photosynthese und kann den Ertrag reduzieren.

Die Assimilatverteilung in den Pflanzen verschiebt sich zugunsten des Wurzelsystems. Ein größeres Wurzelsystem ermöglicht die Erschließung eines größeren Bodenvolumens. Im Boden vorhandene Nährstoff- und Wasserreserven können besser genutzt werden. Die Pflanze versucht ein Gleichgewicht zwischen der Wasseraufnahme durch das Wurzelsystem und dem Wasserverbrauch durch die Blattfläche herzustellen.

Trockenstress und hohe Temperaturen führen zu einer beschleunigten Entwicklung der Pflanzen, zu einem früheren Abschluss der vegetativen Phase und einer früheren Blüte. Während der Blüte und der Kornfüllung reagieren Getreidepflanzen besonders sensibel mit Ertragsverlusten auf Trockenstress. Während der Abreife werden Assimilate aus Stängeln und Blättern in die Körner verlagert. Den älteren Pflanzenteilen werden Nährstoffe entzogen und sie sterben ab. Diese Verlagerung von Assimilaten wird durch Trockenstress behindert.

Photosynthese findet während der Blüte und Kornfüllung noch hauptsächlich im Fahnenblatt und der Ähre selbst statt. Bei Wassermangel wird die Lebensdauer des Fahnenblatts verkürzt. Die Abreife wird beschleunigt. Es steht daher weniger Zeit zu Photosynthese und Kornfüllung zur Verfügung.

Soja (2005) untersuchte die Korrelation von Niederschlägen während der Vegetationsperiode von Winterweizen mit den Erträgen. In wärmeren Gebieten in Ostösterreich korrelieren besonders die Niederschläge in der ersten Junihälfte stark positiv mit den Erträgen. Dieser Zeitraum fällt oft mit Blüte und beginnender Kornfüllung zusammen. Die Niederschläge während der vegetativen Phase haben geringeren Einfluss auf die Erträge. Eitzinger et al. (2003) führten Pflanzenwachstumssimulationen für den Standort Groß-Enzersdorf durch. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass Winterweizen vor allem während der Kornfüllungsphase mit Ertragsverlusten auf Trockenheit reagiert. Gerstmayr et al. (2000) konnten bei Winterweizen (Sorte Capo) keine Reduktion im Tausendkorngewicht bei mässigem Trockenstress feststellen. Eine Ertragsreduktion entstand durch die verminderte Entwicklung von Ährenstufen. Die Spitzen der Ähren werden nicht mit Assimilaten versorgt, und sind infertil.

2.4.3 Die Züchtung trockenresistenter Sorten

Im Getreidebau entstehen hohe wirtschaftliche Schäden durch Trocken- und Hitzestress. Rajaram (2007) geht davon aus, dass in Entwicklungsländern die Hälfte und in industrialisierten Ländern bis zu 70% der mit Weizen bestellten Flächen von wiederkehrender Dürre betroffen sind.

Bäuerinnen und Bauern und AgrarwissenschaftlerInnen sind daher bemüht Anpassungsstrategien an Trockenstress zu entwickeln. Eine Möglichkeit ist die Züchtung trockenresistenterer Sorten. Einige Züchter versuchen die osmotische Adaption der Getreidepflanzen bei Trockenstress zu verbessern. Der Verlust des Zellurgors kann damit verzögert werden, es kommt zu geringeren Welkeerscheinungen der Pflanzen (Verma et al. 2004). Die Seneszenz der Blätter kann verzögert werden. Verma et al. (2004) versuchen durch Züchtung die Persistenz der Fahnenblatts, das einen wichtigen Beitrag zur Photosynthese leistet, zu erhöhen. Die Erträge sollen damit stabilisiert werden.

Eine andere Strategie sind morphologische Veränderungen der Pflanzen. Es wird vor allem versucht Pflanzen mit größerem Wurzelsystem zu züchten. Dadurch soll die Wasserverfügbarkeit für das Getreide verbessert werden. Der Erfolg solcher Sorten könnte stark von den Bodenverhältnissen abhängen.

2.5 Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wachstum und Ertrag von Nutzpflanzen im Marchfeld

Die Wirkungen von Klima und Wetter auf das Wachstum von Kulturpflanzen sind vielfältig. Dem entsprechend kann auch die Wirkung eines globalen Klimawandels (IPCC 2007) auf die landwirt-

schaftliche Produktion nicht pauschal als negativ oder positiv bewertet werden. Sie ist abhängig von der betrachteten Region und der betroffenen Kulturpflanze. Sozio-ökonomisch spielen die Fähigkeit der Bäuerinnen und Bauern zur Anpassung an den Klimawandel, die Abhängigkeit einer Region von der Landwirtschaft u.a. eine Rolle. Der Mittelmeerraum könnte etwa unter wesentlich trockeneren Bedingungen während der Vegetationsperiode leiden. Die in vielen Ländern (z.B. Griechenland) eher kleinteilige Landwirtschaft könnte weniger in der Lage sein nötige Investitionen in beispielweise Bewässerungsanlagen zu tätigen.

Länder und Regionen in höheren Breitengraden wie Südkandinavien könnten von einer Klimaerwärmung profitieren, indem sich die Produktionsbedingungen verbessern und die landwirtschaftliche Produktion nach Norden (bzw. Süden auf der Südhalbkugel) ausgeweitet werden kann.

Die Untersuchungsregion Marchfeld liegt in einem Übergangsbereich zwischen dem atlantischen Klima Westeuropas und dem kontinentalen Klima Osteuropas. In Publikationen des StartClim Projekts (Kromp-Kolb 2004) wurden regionalisierte Klimaszenarien für Wien veröffentlicht. Diese Szenarien wurden durch Downscaling mittels kanonischer Korrelationsanalyse aus Globalen Zirkulationsmodellen (GCM's) erstellt.

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 2.12) zeigen eine deutliche Zunahme der relativen Häufigkeit von Sommertagen (Tagesmaximum über 25 °C) und Tropentagen (Tagesmaximum über 30 °C) in Wien. Innerhalb der nächsten 30 Jahre kann im Marchfeld mit einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur um 2-4 °C gerechnet werden. Dieses wärmere Klima führt zu einer Erhöhung der potentiellen Evapotranspiration. Kubu et al. (2005) errechneten anhand von Klimamodellen die Veränderung der Verdunstung einer freien Wasseroberfläche (Neusiedler See) in Ostösterreich. Sie ermittelten eine Erhöhung der jährlichen Verdunstung um 23,3% anhand des Szenarios 2030-2050 im Vergleich zur Referenzperiode (1961-1990). So lange im Boden ausreichend Wasser vorhanden ist, wird bei geöffneten Spaltöffnungen die Transpiration der Pflanzen und die unproduktive Evaporation aus dem Boden durch die höhere potentielle Evapotranspiration gesteigert (FAO 1998). Die Bodenvorräte werden rascher erschöpft - das Risiko für Trockenstress in der Region wird daher steigen.

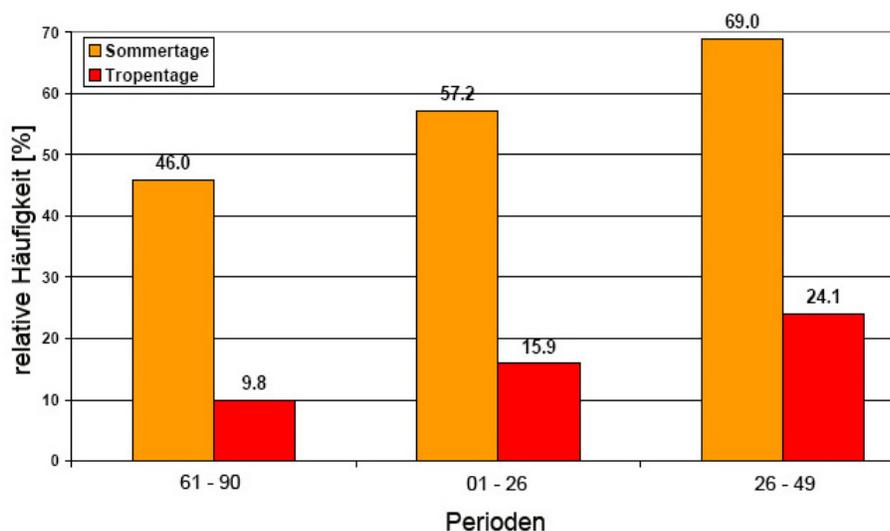


Abbildung 2.12: Relative Häufigkeit von Sommer- bzw. Tropentagen (Tagesmaximum über 25 °C bzw. 30 °C) in Wien in Abhängigkeit zur Monatsmitteltemperatur (aus StartClim2004)

Weiters wird mit einer Erhöhung der Niederschläge während der Wintermonate und einer Verringerung während der Sommermonate gerechnet. Bei einer Verlängerung niederschlagsfreier Phasen während der Vegetationsperiode (siehe Abbildung 2.13) kann es zu häufigeren Trockenphasen kommen. Dies kann zu einer Zunahme der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen negativen Auswirkungen von Trocken- und Hitzestress auf die Pflanzen führen, und das Wachstum behindern. Eine Zunahme der Tropentage könnte zu vermehrtem Hitzestress führen. Die aktuelle Evapotranspiration während der Vegetationsperiode und damit das Produktionspotential könnten abnehmen.

Getreide sind determinierte, annuelle (bzw. winter-annuelle) Arten. Bei diesen Arten ist die Abfolge der Entwicklungsphasen stark von der Photoperiode und von Temperatursummen abhängig. Bei einer Klimaerwärmung ist mit einer beschleunigten Entwicklung dieser Arten zu rechnen. Das Getreide beginnt früher im Jahr zu wachsen, oder wird früher gesät, und reift eher ab. Die Zeit die für bestimmte Entwicklungsphasen (z.B. Kornfüllung) zur Verfügung steht könnte verkürzt werden. Das würde weniger Zeit für Kohlenstoffassimilation (bzw. Assimilatverlagerung) und eine reduzierte Biomasseakkumulation bedeuten. Ein früherer Wachstumsbeginn bedeutet aber auch, dass das Getreide teilweise in einer potentiell feuchteren Jahreszeit wächst. Ob es in der Bilanz zu einer Erhöhung oder Verminderung von Trockenstress kommt soll u. a. in dieser Arbeit geklärt werden.

Eine Erhöhung der Temperaturen (auch in der Nacht) führt zu höheren Atmungsverlusten. Die Nettophotosyntheseraten der Kulturpflanzen werden herab gesetzt (siehe Abbildung 2.14). Eine Erwärmung über ein von der Art abhängiges Optimum hinaus kann sich daher negativ auf den Ertrag auswirken (Linke, 2005).

Die regionalisierten Klimaszenarien zeigen auch eine erhöhte Klimavariabilität. Eine größere Variabilität erhöht das Ertragsrisiko insbesondere auf leichten Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität. Warme, feuchte Jahre mit guten Erträgen können sich mit heißen, trockenen Jahren mit Missernten (wie z.B. 2003) abwechseln.

Der steigende CO_2 -Gehalt der Atmosphäre hat einen fördernden Effekt auf Pflanzenwachstum und Erträge. Gegenwärtig (2007) liegt der CO_2 -Gehalt in der Luft bei rund 380 ppm. Durch Emissionen könnte er bis 2100 auf über 700 ppm ansteigen (IPCC 2007). Bei einer solchen Erhöhung der CO_2 Konzentration in der Luft, verbessert sich die Verfügbarkeit von Kohlenstoff für die Pflanzen

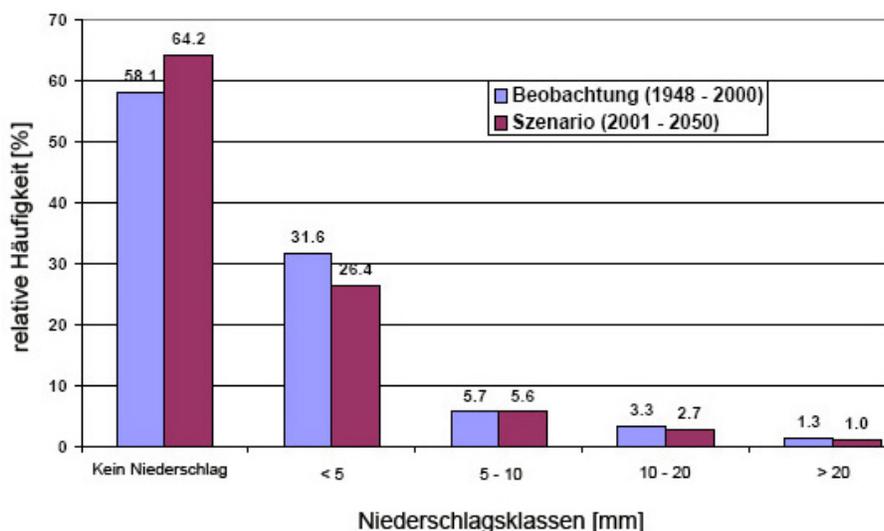


Abbildung 2.13: Relative Häufigkeit der Niederschlagstagesummen [mm] für Wien beobachtet und mittels AnalogszENARIO abgeleitet (aus StartClim2004)

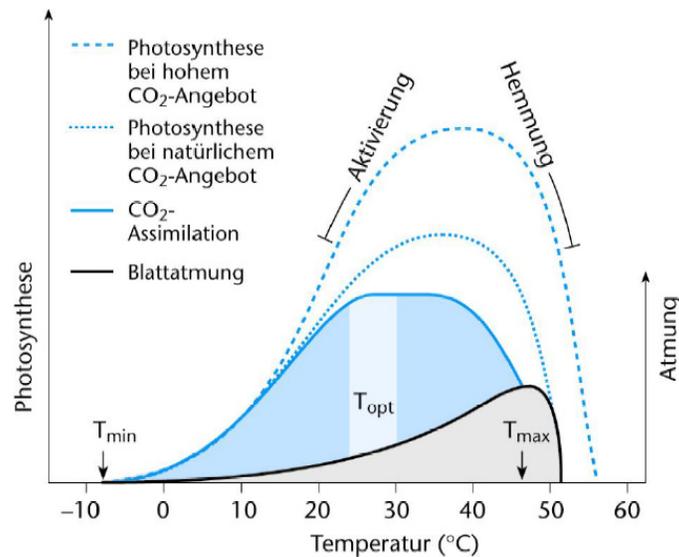


Abbildung 2.14: Schema der Temperaturabhängigkeit von Photosynthese und Atmung (Quelle: Max Planck Institut für Biogeochemie) T_{min}...Temperaturminimum; T_{max}...Temperaturmaximum; T_{opt}...Temperaturoptimum

und die Assimilation wird gefördert. C₃ Pflanzen profitieren besonders von der CO₂-Düngung. Für C₄ Pflanzen (Mais, Hirse usw.) liegt die heutige CO₂-Konzentration schon nahe am physiologischen Optimum. Der Düngungseffekt fällt daher bei diesen Arten geringer aus. Ein höheres CO₂-Angebot ermöglicht den Pflanzen eine raschere Aufnahme des Gases, und damit einen früheren Spaltenschluss. Wasserverbrauch und Transpirationskoeffizient könnten dadurch gesenkt werden. Die Verfügbarkeit von CO₂ wirkt daher in Richtung einer Verringerung des Trockenstress

Dufková et al (2002) errechneten für das Marchfeld im Zuge einer Klimaänderung eine Erhöhung der Winterweizenerträge je nach Szenario um 7% (bei 1,5-fachem CO₂-Gehalt; um 3,5°C erhöhter Jahresmitteltemperatur) bzw. 21% (bei doppeltem CO₂-Gehalt; um 3,5°C erhöhter Jahresmitteltemperatur; um 10% verringertem Niederschlag). Der positive Effekt der CO₂-Düngung überkompensiert bei Weizen nach Dufková et al. (2002) den negativen Effekt der Temperaturerhöhung und der Verringerung des Niederschlags. Bei dieser Studie wurde jedoch eine mögliche Änderung der Klimavariabilität nicht berücksichtigt.

3 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der beschriebenen ökonomischen, sozialen und ökologischen Veränderungen (siehe Kapitel 1.1 und 2.5) werden von betroffenen Bäuerinnen und Bauern, Angehörigen der Landwirtschaftskammern und anderer Institutionen und Unternehmen sowie AgrarwissenschaftlerInnen verschiedene Anpassungsstrategien für den Marktfruchtbau in der Region Marchfeld diskutiert. Die Diskussionen bewegen sich auf politischer (z.B. Preispolitik, GAP), betriebswirtschaftlicher (z.B. Versicherungs- und Genossenschaftswesen, Kostensenkung) und pflanzenbaulich-technischer Ebene.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei der Bewertung von alternativen Maßnahmen des Pflanzenbaus unter den Bedingungen des Klimawandels. Als Referenz wird das Pflanzenwachstum unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) und die heute im Marchfeld im Getreidebau übliche landwirtschaftliche Praxis (Herbstpflugfurche, Verwendung gängiger Sorten, Kulturführung nach ÖPUL) herangezogen. Als nächster Schritt wird untersucht, wie sich das Agrarökosystem unter den Bedingungen des Klimawandels verhält, wenn die heutige landwirtschaftliche Praxis beibehalten wird. Insbesondere soll dabei auf Fragen der Phänologie, des Wasserhaushalts und des wirtschaftlich bedeutenden Kornertrags eingegangen werden.

Weiters soll durch einen Vergleich mit der Referenz überprüft werden, welche Auswirkungen alternative Maßnahmen im Pflanzenbau haben. Dies soll sowohl für gegenwärtige Klimabedingungen als auch für die Klimabedingungen bis 2050 untersucht werden. Für die Beantwortung der Fragestellungen werden Ergebnisse eines Praxisversuchs und von Pflanzenwachstumssimulationen herangezogen.

Die wichtigste Maßnahme, die untersucht werden soll, ist eine Umstellung der Bodenbearbeitung von Pflugfurche auf Minimalbodenbearbeitung und Direktsaat. Die vorliegende Arbeit stellt zu diesem Thema eine Erweiterung und Vertiefung der Diplomarbeit "Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Bodenwasserhaushalt" (Rischbeck 2004) dar. Diese Arbeit führte zum Ergebnis, dass nach Minimalbodenbearbeitung auf einem Tschernosem am Standort Raasdorf während der Hauptwachstumsperiode von Winterweizen vom 27.3. bis zum 17.7.2002 der Bodenhorizont von 0-75 cm im Vergleich zur Variante nach Herbstpflugfurche rund 40% mehr pflanzenverfügbares Wasser enthielt. Die Minimalbodenbearbeitung könne daher Trockenstress bei Winterweizen vermeiden bzw. reduzieren, und sei für den Standort geeignet. Es soll geklärt werden, ob diese Ergebnisse auf die Region Marchfeld, den Zeitraum bis 2050 und auf die Kultur Sommergerste übertragbar sind. Die Wirkung der Bodenbearbeitung soll quantifiziert werden. Auf phytosanitäre Fragen und Maßnahmen des Pflanzenschutzes kann dabei nicht eingegangen werden.

Im Zuge einer Klimaerwärmung kann mit einer Verkürzung der kalten Jahreszeit gerechnet werden (Kromp-Kolb 2004). Damit verändern sich auch die Bedingungen (Bodenfeuchte und Bodentemperatur) für die Saat im Herbst (Winterweizen) bzw. Frühjahr (Sommergerste). Die LandwirtInnen sind zu einem gewissen Ausmaß flexibel bei der Wahl des geeigneten Saattermins. Neben arbeitswirtschaftlichen Kriterien wählen sie den Termin nach den optimalen Keimbedingungen für die Saat. Es kann daher damit gerechnet werden, dass die LandwirtInnen den durchschnittlichen Saattermin entsprechend ihren Fachkenntnissen bei einer Klimaerwärmung verschieben werden. In dieser Arbeit soll die Verschiebung des optimalen Zeitfensters für die Saat ermittelt werden, um den LandwirtInnen eine Entscheidungshilfe dafür zu geben.

Diese Arbeit soll Getreidebäuerinnen und -bauern der Region, die eine Umstellung ihrer bisherigen Praxis überlegen, sowie der Agrarberatung Entscheidungshilfen und Informationen liefern. Eine weiterführende ökonomische Analyse, z.B. der Wirtschaftlichkeit der Minimalbodenbearbeitung, könnte auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauen.

4 Datengrundlagen, Material und Methoden

4.1 Bodenphysikalische Untersuchungen

Um eine Datengrundlage für Feldversuch und Pflanzenwachstumssimulation zu schaffen, wurden am Standort Raasdorf Bodenproben entnommen, und im Bodenlabor analysiert. Am 17.4.2002 wurden für die Analyse der Körnung in Raasdorf in der gepflügten Variante in 30 cm Tiefe vier Proben, in Pflugsohlentiefe (38 cm) Tiefe drei Proben und in 50 cm Tiefe drei Proben entnommen. In der minimal bodenbearbeiteten Variante wurden in 20 cm Tiefe drei Proben und in 50 cm Tiefe ebenfalls drei Proben entnommen. Die Siebung der Proben wurde vom Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW) an der BOKU Wien durchgeführt. Für die Untersuchung der pF-Werte wurden jeweils vier fünf cm hohe Stechzylinder in 30-35 und 50-55 cm Tiefe in der gepflügten Variante entnommen. Weitere jeweils vier Stechzylinder wurden in 20-25 und 50-55 cm Tiefe in der minimal bodenbearbeiteten Variante entnommen. Die Analyse der Proben wurde vom Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen NÖ durchgeführt.

Am 1.7.2003 wurden in Raasdorf in der gepflügten Variante in 10-15 cm Tiefe, in 36-41 cm Tiefe (Pflugsohle) und in 50-55 cm Tiefe jeweils drei fünf cm hohe Stechzylinder für die Bestimmung von pF-Werten, und eine Probe für die Korngrößenanalyse entnommen. In der minimal bodenbearbeiteten Variante wurden in 10-15 cm Tiefe und in 20-25 cm Tiefe jeweils drei fünf cm hohe Stechzylinder und eine Probe entnommen. Die Analyse der Proben wurde vom Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen NÖ durchgeführt.

Am 10.7.2004 wurden in der gepflügten und in der minimal bodenbearbeiteten Variante in 10-15 cm Tiefe, in 20-25 cm Tiefe und in 50-55 cm Tiefe jeweils drei fünf cm hohe Stechzylinder für die Erstellung von pF-Kurven entnommen. Die Erstellung der pF-Kurven wurde am IHLW selbst durchgeführt. Die Ergebnisse der Analysen befinden sich im Ergebnisteil (siehe Kapitel 5.1.2).

4.1.1 Korngrößenverteilung

Die Bestimmung des Grobkornanteils (Korndurchmesser >2 mm) erfolgte durch Trockensiebung. Nach Lufttrocknung der gestörten Bodenproben wurden Körner >2 mm abgetrennt. Diese lagen immer deutlich unter 10% der Gesamtmasse, sodass keine Grobkornverteilung des Bodens vorgenommen wurde.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung des mineralischen Feinbodens (Korndurchmesser <2 mm) erfolgte durch eine Kombination von Nasssiebung und Sedimentationsverfahren nach der ÖNORM L 1061-2 (2002). Die Einteilung bzw. die Abgrenzung der Korngrößenfraktionen des Feinbodens wurde nach ÖNORM L 1050 (1988) vorgenommen.

Im Labor wurde nach dem Handbuch zum Praktikum der landeskulturellen Wasserwirtschaft (Cepuder et al. 2005) gearbeitet, und alle Analysen in mindestens 2-facher Wiederholung ausgeführt. Die Nasssiebung des Feinbodens erfolgte mit einem Siebsatz von 2,0 mm - 1,0 mm – 0,2 mm – 0,125 mm – 0,063 mm und einer eingewogenen und suspendierten Probenmenge von 100 g.

Für das Pipetteverfahren nach Kubiena wurden 20 g Boden suspendiert. Die Sedimentationsgefäße standen in einer Wasserwanne mit einer Wassertemperatur von $21,0 \pm 0,4$ °C. Die Pippetierungen erfolgten nach 20 Sekunden (für 0,2 – 0,063 mm), 4 min 32 s (für 0,063 - 0,020 mm), und nach 50 min 19 s (für 0,020 - 0,006 mm), jeweils 10 cm unter der Wasseroberfläche, und nach 3 h 46 min 25 s (für 0,002 mm) 5 cm unter der Wasseroberfläche.

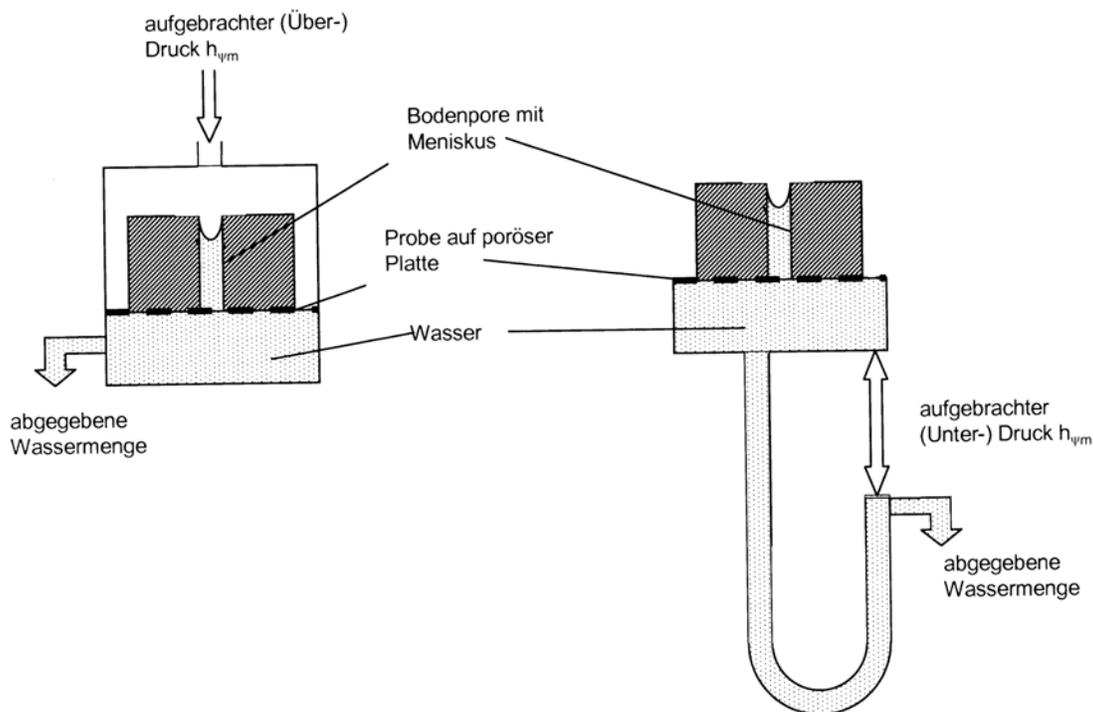


Abbildung 4.1: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wasserspannungs-Wasseranteilskurve (aus Hofmann 2005), links: Drucktopf; rechts: Kapillarimeter

4.1.2 Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung (pF-Kurve)

Für diese Arbeit wurden für die Bodenproben aus 2004 nach ÖNORM 1063 (1988) zwischen 0,01 bar und 15 bar 16 Punkte der Desorptionskurve bestimmt. Die Bestimmung der ersten 8 Punkte erfolgte, in 2-facher Wiederholung mit 200 cm^3 -Zylindern (5 cm hoch) mit dem Kapillarimeter nach Fischer. Weitere acht Punkte wurden in 3-facher Wiederholung ebenfalls mit 200 cm^3 -Zylindern (5 cm hoch), mittels Drucktopf-Apparaturen ermittelt.

Die mittels Kapillarimeter nach Fischer angelegten Saugspannungen lagen bei 0,01 bar, 0,02 bar, 0,03 bar, 0,04 bar, 0,05 bar, 0,075 bar, 0,1 bar und 0,15 bar. Es wurden Standardapparaturen verwendet, die für eine stufenweise Entwässerung von 2-150 cm geeignet sind. Eine mit entlüftetem Wasser gefüllte Glasfilternutsche war durch einen Schlauch mit einem Standrohr verbunden. Durch Senken des Wasserspiegels im Standrohr wurde die erforderliche Saugspannung eingestellt. Um Verdunstungsverluste so gering wie möglich zu halten, waren die Kapillarimeter mit Plastikfolie und einem Glasdeckel abgedeckt. Sie waren während der Versuchsdauer außerdem mit schwarzer Plastikfolie umhüllt, um Algenwachstum in der Anlage zu verhindern.

Die gewünschte Wasserspannung wurde immer wieder nachgestellt, bis kein weiterer Anstieg des Wasserspiegels mehr feststellbar war (siehe Abbildung 4.1). Die abgegebene Wassermenge wurde vom Standrohr abgelesen und im Messprotokoll aufgezeichnet. Bei den verwendeten Standrohren handelte es sich um Messpipetten mit einer Messgenauigkeit von 0,1 ml. Die abgegebene Wassermenge wurde durch Messung des Gewichtsverlusts zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende kontrolliert.

Zur Erstellung der Wasserspannungs-Wasseranteilskurve in einem Bereich von 0,1 bar bis 15,0 bar wurde eine Drucktopf-Apparatur verwendet (siehe Abbildung 4.1). Es wurden gesättigte 200 cm³-Zylinder auf gesättigten Keramikplatten so aufgebracht, dass ein enger Kontakt zwischen Platte und Probe bestand. Danach wurde die erste Druckstufe von 0,1 bar angelegt, und bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes gewartet. War dieser erreicht, wurde die Probe gewogen, abermals eingebaut und die nächste Druckstufe eingestellt. Eine Druckstufe wurde abgeschlossen, wenn innerhalb von 2 Tagen kein Wasser mehr von den Proben abgegeben wurde. Vor Erhöhung zur jeweils nächsten Druckstufe wurden die Proben gewogen, und danach wieder mit gutem Kontakt zur Platte eingebaut. Die Untersuchung wurde mit der niedrigsten Druckstufe (0,1 bar) begonnen, und schrittweise bis zur höchsten Druckstufe (15 bar) durchgeführt. Die ersten vier Druckstufen (0,1 bar, 0,2 bar, 0,5 bar und 1 bar) wurden auf 1 bar Keramikplatten durchgeführt, die fünfte Druckstufe auf 3 bar Keramikplatten. Diese Druckstufen wurden in Niederdrucktöpfen durchgeführt. Die letzten drei Druckstufen wurden in Hochdrucktöpfen bei 5,0 bar, 10,0 bar und 15 bar auf 15-bar Keramikplatten durchgeführt. Nach Beendigung der letzten Druckstufe wurden die Proben bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, und anschließend die Wasseranteile rückgerechnet. Für die Proben aus 2002 und 2003 wurden nur einzelne pF-Punkte im Drucktopf bestimmt. Es wurden die Sättigungspunkte und die Druckstufen 0,06 bar (FK) und 15 bar (PWP) ermittelt.

In Abbildung 4.1 ist ein Schema der Bestimmung der Wasserspannungskurve mittels Kapillarimeter (rechts) und Drucktopf (links) dargestellt.

Die Labormessung der Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung stellt eine Momentaufnahme der physikalischen Eigenschaften eines Bodens, zum Zeitpunkt der Probenentnahme, dar. Böden, die verdichtet (z.B. durch Befahrung) oder gelockert (z.B. durch Pflugarbeit) wurden, können wieder in ihren natürlichen Lagerungszustand zurück kehren. Die sich verändernde Lagerungsdichte beeinflusst die pF-Kurve.

Die ermittelte pF-Kurve muss der Bodenform am Entnahmeort zugeordnet werden. Die Böden können aber kleinräumig heterogen sein. Die Eigenschaften ähnlicher Bodenformen müssen ebenfalls gemessen oder geschätzt werden.

Die pF-Kurve stellt eine Entwässerungskurve dar, bei der Bewässerung des Bodens kommt es zu einer anderen Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung (Hysteresis).

Die pF-Kurven werden anhand von Bodenproben im Labor bestimmt, die aus dem Bodenverband getrennt wurden. Die Randbedingungen der Entwässerung bei der Analyse sind daher anders als im natürlichen Boden. Bei der Interpretation der pF-Werte aus dem Labor müssen diese Einschränkungen berücksichtigt werden.

4.2 Feldversuch in Raasdorf

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde bei Raasdorf im Marchfeld ein Bodenbearbeitungs- und Fruchtfolgeversuch durchgeführt. Dieser Versuch fand in Zusammenarbeit mit der Versuchswirtschaft der Universität für Bodenkultur und der Firma Pöttinger statt. Der Versuch umfasste drei landwirtschaftliche Jahre von Herbst 2001 bis zum Sommer 2004.

4.2.1 Die Eigenschaften des Versuchsstandorts

Das Agrarklima des Standorts entspricht etwa dem in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Agrarklima von Obersiebenbrunn.

Der Bodentyp ist ein Tschernosem (Schwarzerde) der Praterterrasse:

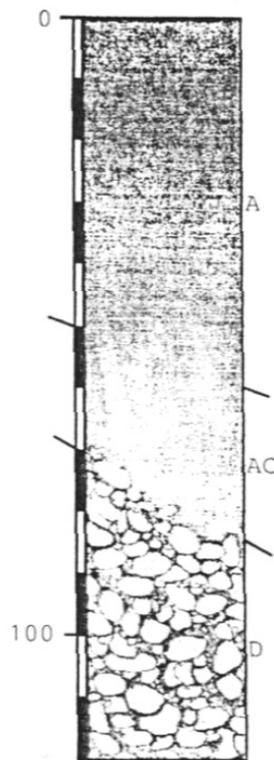


Abbildung 4.2: Bodenprofil eines Tschernosems in Raasdorf (Quelle: Bundesanstalt für Bodenkultur 1993)

Den D-Horizont und Grundwasserträger bilden Schichten aus 5-7 m mächtigem, quartären Donauschotter über tertiärem Tegel. Die Schotteroberkante weist Niveauschwankungen von 1-2 m auf (siehe Abbildung 4.2). Diese Unebenheiten sind im Zuge der Wechselwirkung zwischen Ablagerung und Erosion des Schotterkörpers entstanden.

Dieses Relief wird durch Feinsedimente, die den Schotter bedecken, weitgehend ausgeglichen. Der untere Teil besteht aus schluffigem Feinsand (Silt), einem fluviatilen Feinsediment. Darüber folgt, als letzte Schicht, Löss, ein äolisches Sediment.

Tabelle 4.1: Angaben aus der Bodenkartierung zum Standort Raasdorf nach Bundesanstalt für Bodenkunde und Bodenkartierung 1993 und Rischbeck 2004

Horizonte	
A und AC (A _p)	0 bis 50/150 cm; aus Löss; nach unten hin abnehmender Humusgehalt
D	0-~40 cm; durch Pflugarbeit stark beeinflusster Horizont
	~50-150 cm; Schotterkörper
Lage und Vorkommen Landschaftsraum "Praterterrasse"; eben	
Bodentyp und Ausgangsmaterial	
Tschernosem aus kalkhaltigen Feinsedimenten (Löss) über Schotter; z.T. Sand	
Wasserverhältnisse mäßig trocken; mäßige Speicherkraft; mäßige Durchlässigkeit	
Bodenart und Grobanteil	
A	Lehm/ schluffiger Lehm
AC	schluffiger Lehm/sandiger Lehm
D	Schotter und Kies, stellenweise ab 60 cm lehmiger Sand oder Sand
Humusverhältnisse	
A	mittelhumos (Humus: 3,0 Massenprozent); Mull
AC	schwach humos (Humus: 2,2 Massenprozent); Mull
stark kalkhaltig; alkalisch; nicht erosionsgefährdet	
gute Bearbeitbarkeit; mittelwertiges Ackerland	

Der Löss wurde ortsnahe umgelagert, und ist zu einem geringen Grad mit Flusssediment vermengt. Die Bodenoberfläche ist eben (siehe Tabelle 4.1).

Der Boden hat ein ausgereiftes Profil. Die Schichten sind recht klar von einander getrennt. Aufgrund des kalkreichen Ausgangsmaterials ist der pH-Wert alkalisch.

Wie alle Tschernoseme weist der Boden eine AC-Horizontierung auf. Es gibt keinen klar abgetrennten B-Horizont. Der A-Horizont ist mächtig, schwankt aber in der Tiefe beträchtlich. Der A-Horizont am Standort Raasdorf besteht aus Lehm/schluffigem Lehm. Die größte Kornfraktion ist Schluff mit über 50 Massenprozent. Die jeweiligen Anteile der Fraktionen variieren nach Standort und Tiefe. Der Oberboden ist schon sehr lange den Einflüssen der (wendenden) Bodenbearbeitung ausgesetzt gewesen. Es lässt sich daher bis zu einer Tiefe von etwa 40 cm ein deutlicher, durchmischter und gestörter Pflughorizont (A_p) erkennen. Messungen von Rischbeck (2004) ergaben eine Feststoffdichte von 2,69 g cm⁻³ im Pflughorizont. Unter dem Pflughorizont finden sich häufig verdichtete Pflugsohlen, in denen eine Feststoffdichte von 2,74 g cm⁻³ gemessen wurde.

Nach unten, zum AC-Horizont hin, sinkt für gewöhnlich der Tongehalt ab und der Sandgehalt steigt. Der AC-Horizont schwankt ebenfalls stark in seiner Tiefe. Von geringerer Mächtigkeit sind diese Horizonte, wenn sie über erhabenen Schotterinseln liegen. Die gesamte Mächtigkeit von A und AC-Horizont schwankt am Standort zwischen 50 und 150 cm.

Der Humusgehalt nimmt über die Tiefe hin ab. Dass in 50 cm Tiefe noch Humus zu finden ist, ist vor allem auf die mischende und wühlende Tätigkeit der Bodentiere und -organismen zurück zu führen (z.B. Wühlmäuse). An der Bodenoberfläche beträgt der Humusgehalt etwa 3 Massenprozent (siehe Tabelle 4.1).

4.2.2 Versuchsanlage

Der Versuch besteht aus einer nicht randomisierten Spaltanlage (siehe Abbildung 4.3). Diese setzt sich aus 4 Großteilstücken zusammen. Auf jedem Großteilstück wurde eine andere Fruchtfolge eingehalten:

- 1 Winterweizen nach Vorfrucht Gerste
- 2 Raps nach Vorfrucht Gerste
- 3 Winterweizen nach Vorfrucht Mais
- 4 Sommergerste nach Zwischenfrucht

Die Großteilstücke wurden wiederum in je drei Streifen, die Varianten der Bodenbearbeitung untergliedert:

- A** Konventionell: Stoppelbearbeitung mit dem Grubber, wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug; Saat (Säkombination Kreiselegge mit Scheibenschar Drillmaschine)
- B** Mulchsaat: Stoppelbearbeitung mit dem Grubber, Saat (Sämaschine "Terrasem" mit Kompaktgege)
- C** Minimalbodenbearbeitung (Mulch-Direktsaat): keine Stoppelbearbeitung, Saat (Sämaschine "Terrasem" mit Spatenrollegge und Packerwalze)

Bei allen Varianten verblieb das Stroh der Vorfrucht auf dem Feld.

Die Anlage hatte eine Länge von 120 m und eine Breite von 96 m. Rechts und links wurden Randstreifen von je 12 m Breite angelegt, um Randeffekte in den Parzellen zu vermeiden. Somit ergibt sich abzüglich der Randstreifen eine Versuchsfläche von 8.640 m².

Jedes Großteilstück ging über die gesamte Länge und über eine Breite von 18 m. Die jeweils drei enthaltenen Streifen gingen über eine Breite von je 6 m. Jeder Streifen hatte somit eine Fläche von 720 m².

Die Bedeutung der Fruchtfolge liegt einerseits in der organischen Masse, die die Vorfrucht im Boden und an der Bodenoberfläche als Mulch zurück lässt. Körnermais hinterlässt (bei Verbleib des Strohs auf dem Feld) etwa 3-4 mal mehr Stroh trockenmasse auf dem Feld als Gerste. Das Maisstroh setzt auch mehr von der Nachfrucht nutzbare Nährstoffe frei als Getreidestroh. Die Zwischenfrucht kann die Auswaschung von Nährstoffen im Spätsommer und Herbst verringern, und zur Anreicherung von Humus beitragen. Konkurrenz um Wasser mit der nachfolgenden Hauptfrucht tritt nur dann auf, wenn der Bodenwasserhaushalt über den Winter nicht aufgefüllt wird. Die Fruchtfolge spielt ebenfalls eine Rolle für die Pflanzengesundheit. In Getreide-Getreide oder Mais-Getreide Fruchtfolgen kann es zum vermehrten Auftreten von Fusarium kommen. Die Bewirtschaftungsverfahren stellen von A nach C eine Extensivierung dar (siehe Kapitel 2.3).

Die Erträge der Feldfrüchte (außer Raps) wurden als Mittelwerte (inkl. Standardabweichung) der jeweils drei Wiederholungen angegeben (siehe Kapitel 5.2.5). Mit den Daten wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) durchgeführt. Dabei wurde untersucht, ob die Variante der Bodenbearbeitung (Pflug, Grubber und Mini.) signifikanten Einfluss auf den Ertrag hat. Weiters wurde ein zwei Stichproben F-Test (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) durchgeführt, bei dem die Bodenbearbeitungsvarianten paarweise gegenüber gestellt wurden. Die Analysen wurden mit der Software Excel durchgeführt.

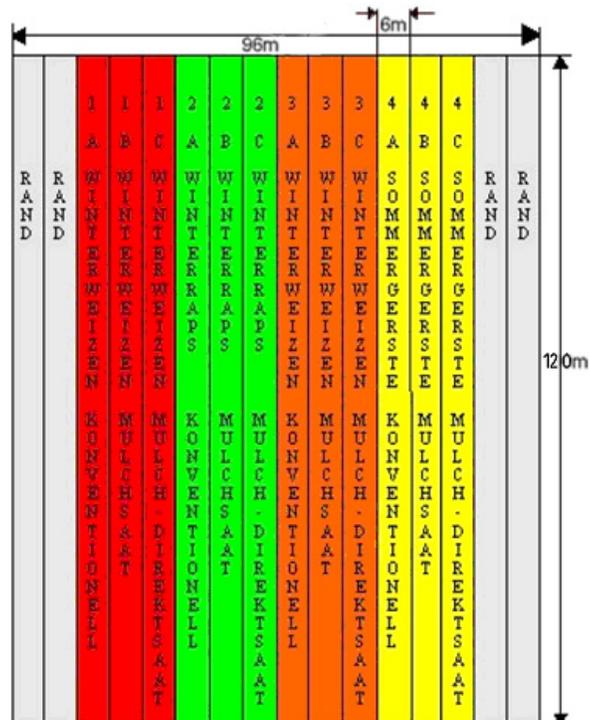


Abbildung 4.3: Schematischer Versuchsplan für Raasdorf

4.2.3 Datenerhebung

Während des Versuchs wurden laufend eine Reihe von agrarmeteorologischen und pflanzenphysiologischen Daten erhoben. In Tabelle 4.3 findet sich eine Auflistung der in Atmosphäre und Boden gemessenen Parameter. Im Boden wurden die Messungen sowohl in der gepflügten als auch in der minimal bodenbearbeiteten (im Jahr 2004 in der gegrubberten) Variante durchgeführt. 2002 und 2003 wurden die Parameter über und unter Winterweizen (Vorfrucht Mais), im Jahr 2004 über und unter Sommergerste (nach Zwischenfrucht) erhoben.

Tabelle 4.3: In Atmosphäre und Boden am Standort Raasdorf gemessene meteorologische Parameter

Parameter	Einheit	Messhöhe bzw. Messtiefe (in m)
Temperatur	°C	2
Strahlungsbilanz	MJ m ⁻² d ⁻¹	2
relative Luftfeuchte	%	2
Niederschlag	mm	0,8
Windgeschwindigkeit	m s ⁻¹	2
Globalstrahlung	MJ m ⁻² d ⁻¹	2
volumetrischer Wassergehalt	%	-0,2; -0,4; -0,6
Bodentemperatur	°C	-0,05;-0,2;-0,4
Wasserspannung	bar	-0,2;-0,4;-0,6
Bodenwärmestrom	MJ m ⁻² d ⁻¹	-0,02

Bei allen Kulturen (Winterweizen nach Mais und Getreide, Sommergerste nach Zwischenfrucht und Raps nach Gerste) wurden die agrarischen Parameter Erntemenge (in kg ha^{-1}); Bestandesdichte (in Pflanzen m^{-2}), Hektolitergewicht (in kg) Tausendkorngewicht (in g) Strohmenge (in kg TM ha^{-1}) erhoben (Arbeiten von Hans-Jörg Schlichtner und Klaus Ofner durchgeführt).

4.2.4 Messtechnik

Die meteorologischen Daten wurden vor Ort mit automatischen, meteorologischen Messstationen aufgezeichnet. Die Datenerfassung erfolgte mit Campbell CR10X Datenloggern (technische Beschreibung des Datenloggers und sämtlicher Sensoren in Rischbeck 2004). Die Lufttemperatur wurde mit Hilfe eines beschatteten Thermocouples gemessen, und alle 15 Minuten aufgezeichnet. Der Niederschlag wurde mit einem Ombrometer, der eine Regenwippe enthält, mittels Pulszählung aufgezeichnet. Für die Messung der Bodenwassergehalte wurden Time Domain Reflectometry (TDR) Sensoren (Typ: CS615 siehe Abbildung 4.4) verwendet. Das Messprinzip dieser Methode ist die Bestimmung der aktuellen Dielektrizitätskonstante des Bodens. Luft hat eine Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = 1,00059$, Wasser eine von $\epsilon_r = 80,1$. Bei Zunahme des volumetrischen Bodenwassergehalts und Verdrängung der Luft steigt die Dielektrizitätskonstante des Bodens entsprechend an. Der TDR Sensor ist mit dem Datenlogger verbunden und besteht aus einem Signalgeber und zwei 30 cm langen Metallstäben. Das Signal läuft entlang der Stäbe und wird am Ende der Stäbe reflektiert. Die Dielektrizitätskonstante des Mediums, das die Stäbe umgibt, bestimmt die Laufzeit des Signals. Der Signalgeber passt die Frequenz an die Laufzeit des Signals an. Ausgegeben wird ein Rechtecksignal ($\pm 0,7 \text{ V}$), das vom Datenlogger über eine Kalibrationsfunktion in einen volumetrischen Wassergehalt umgerechnet und aufgezeichnet wird (technische Beschreibung nach Campbell 2002). Zur Installation der Sensoren wird im zu messenden Boden ein Profil gegraben. Die Metallstäbe des Sensors werden in den entsprechenden Tiefen waagrecht in das Bodenprofil gebohrt. Die Profilgrube mit den Sensoren wird wieder geschlossen, und der Boden vorsichtig rückverdichtet.

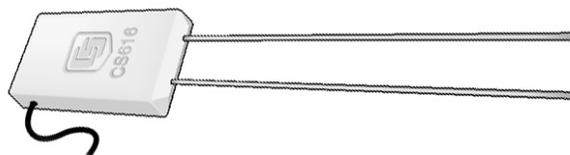


Abbildung 4.4: TDR-Sensor CS616 (äußerlich gleich wie CS615; aus Campbell Scientific 2002)

Die verwendeten Sensoren weisen technisch bedingte, individuelle Ungenauigkeiten auf. Optimal wäre daher eine Kalibration der Sensoren in situ. Dabei werden am Ort der Installation der TDR-Sensoren Bodenproben entnommen, und die Bodenwassergehalte gravimetrisch bestimmt. Die Ergebnisse können mit den TDR-Messungen verglichen werden. Bei wechselnden Standorten der Messung ist eine solche Kalibration aber mit erheblichem Aufwand verbunden.

Die korrekte und vergleichbare Messung des Bodenwassergehalts ist schwierig. Bereits in einem Feld können in geringen räumlichen Abständen verschiedene Bodenformen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften auftreten. Diese Bodenheterogenität muss bei der Wahl der Standorte berücksichtigt werden. Wenn die Bodenwassergehalte in unterschiedlichen Bodenformen gemessen wurden, muss das bei der Interpretation berücksichtigt werden.

4.2.5 Die Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers

Aus der Feldmessung der Bodenwassergehalte wurde das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Wurzelraum berechnet. Dabei wurden folgende Formeln verwendet:

$$w \leq 35 : h = (\theta_{20cm} - \theta_{PWP20})3,5 \frac{w}{100}$$

$$35 < w < 65 : h = (\theta_{20cm} - \theta_{PWP20})3,5 + (\theta_{40cm} - \theta_{PWP40}) \frac{w-35}{100}$$

$$w \geq 65 : h = (\theta_{20cm} - \theta_{PWP20})3,5 + (\theta_{40cm} - \theta_{PWP40}) + (\theta_{60cm} - \theta_{PWP60})6,5 \frac{w-45}{100}$$

h ... pflanzenverfügbare Wassergehalt in $l\ m^{-2}$

w ... Durchwurzelungstiefe in cm

Wenn der aktuelle Wassergehalt in einer Bodenschicht den permanenten Welkepunkt unterschreitet, wird das pflanzenverfügbare Bodenwasser für diese Schicht gleich Null gesetzt. Die Berechnungen wurden für die gepflügte/gegrubberte Variante und die minimal bodenbearbeitete Variante durchgeführt.

Die Durchwurzelungstiefe wurde vereinfacht als lineare Funktion des julianischen Tags berechnet:

$$\text{Winterweizen: } w = 0,55d + 14; w_{max} = 110$$

$$\text{Sommergerste: } w = 0,75d - 45; w_{max} = 110$$

Diese Funktionen stellen Schätzungen dar, sie wurden aus mehrjährigen Simulationen mit DSSAT/CERES (siehe Kapitel 4.3.1) abgeleitet. Sie berücksichtigen den späteren Wachstumsbeginn und die raschere Entwicklung der Sommergerste im Vergleich zum Winterweizen. Die Berechnungen wurden ab Beginn der Feldmessungen bis zum Abreifetermin der Pflanzen durchgeführt.

4.3 Die Simulation des Pflanzenwachstums

Die Durchführung von agrarwissenschaftlichen Feldexperimenten ist zeitaufwändig und kostenintensiv. Darüber hinaus erfordern sie Infrastruktur und Organisation. Diese Ressourcen stehen aus verschiedensten Gründen nicht immer zur Verfügung. Seit den 1970er Jahren werden daher rechnergestützte Simulationsmodelle für das Pflanzenwachstum entwickelt. Mit ihrer Hilfe können Feldexperimente zwar nicht ersetzt, aber reduziert werden. Von relativ einfachen empirischen Modellen haben sich diese zu erklärenden Modellen weiter entwickelt. Die Modelle sind interdisziplinär und versuchen ein möglichst umfassendes Wissen über pflanzenphysiologische und physikalisch-ökologische Vorgänge zu integrieren.

4.3.1 CERES/DSSAT

Aus den zahlreichen verfügbaren Pflanzenwachstumsmodellen wurde für diese Arbeit CERES/DSSAT ausgewählt. Wobei CERES (**C**rop **E**nvironment **R**esource **S**ynthesis) das zugrunde liegende pflanzenphysiologische Modell ist, während DSSAT (**D**ecision **S**upport **S**ystem for **A**grotechnology **T**ransfer) als Benutzeroberfläche und Analysewerkzeug verwendet wird. CERES/DSSAT arbeitet mit einem täglichen Zeitschritt und ist in der Lage Berechnungen in einer großen zeitlichen Skala von Jahren bis Jahrhunderten durchzuführen. Es ist deshalb für langfristige Klimawandelstudien gut geeignet.

Nach Jones (1993) ermöglicht DSSAT dem Benutzer (1) Daten zur Genetik von Nutzpflanzen, Bodenbeschaffenheit und Wetter einzugeben und zu speichern, (2) Daten abzurufen, zu analysieren und darzustellen, (3) Pflanzenwachstumsmodelle (u.a. CERES) zu kalibrieren und zu evaluieren

und (4) Managementalternativen an einem bestimmten Standort zu prüfen. Wenn DSSAT an eine neue Nutzpflanze oder einen neuen Standort angepasst werden soll, geschieht das normalerweise in folgenden Arbeitsschritten:

- 1 Die Durchführung von Feldexperimenten mit einer oder mehreren Nutzpflanzen.
- 2 Das Zusammentragen eines erforderlichen minimalen Datensatzes. Dieser beinhaltet Daten zu Pflanzen, Boden und Wetter. Die Kalibrierung und Validierung des Modells anhand der gesammelten Daten.
- 3 Die Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit dem Modell. Das ermöglicht einen Eindruck über die Reaktionen des Modells auf verändertes Wetter oder Management.
- 4 Die Durchführung der Simulationen mit anderen Böden aus der Region oder historischem bzw. synthetischem Wetter (z.B. für eine Analyse der Folgen eines Klimawandels).
- 5 Die Durchführung von Simulationen mit alternativem Management können über eine Reihe von Jahren simuliert werden, und die Reaktionen statistisch analysiert werden.

Die CERES Modelle für Weizen und Gerste sind ähnlich aufgebaut. Die treibende Kraft hinter der phänologischen Entwicklung dieser determinierten Gräser sind Temperatursummen, die auf der Basis der täglichen Temperaturminima und -maxima berechnet werden. Die Temperatursummen, die erreicht werden müssen, um das Umspringen von einer phänologischen Phase auf die nächste zu erreichen, werden vom Benutzer definiert. Es können damit Sorten aus unterschiedlichen Reifegruppen simuliert werden. Auch die Photoperiode hat Einfluss auf die Phänologie. Sie beeinflusst über die Dauer der vegetativen Phase bzw. den Blühbeginn die Anzahl der Blätter, die gebildet werden.

Die Trockenmasseakkumulation wird in den CERES Modellen als lineare Funktion berechnet. Die unabhängigen Variablen sind die eingestrahlte photosynthetisch aktive Strahlung (etwa die Hälfte der Globalstrahlung) und die Effizienz der Strahlungsnutzung durch die Pflanzen. Die Photosyntheseleistung wird auch über die Blattfläche (BFI) determiniert.

Die aktuelle Evapotranspiration von Kulturpflanzenbeständen kann von DSSAT/CERES nach verschiedenen Methoden berechnet werden. Für diese Arbeit wurde die Methode nach FAO (FAO 1998) verwendet (siehe Kapitel 2.4.1).

Für die Berechnung der Bewegungen des Bodenwassers wird in DSSAT/CERES ein Modell nach der Methode von Ritchie und Otter (1985) verwendet. Das eindimensionale Modell berechnet die täglichen Veränderungen des Bodenwassergehalts einzelner Bodenschichten aufgrund der Infiltration von Regen oder Bewässerungswasser, vertikaler Drainage, ungesättigter Wasserleitung, Evaporation aus dem Boden und der Aufnahme von Wasser durch die Pflanzenwurzeln.

Die Boden wird über seine Oberflächeneigenschaften und die Parameter der Bodenschichten (u.a. pF und k -Werte) in verschiedenen Tiefen beschrieben. Das Bodenwassermodell verwendet einen "tipping bucket"-Ansatz für die Berechnung der Drainage. Erst wenn durch Niederschläge/Bewässerung die höhergelegene Bodenschicht zur Feldkapazität aufgefüllt wurde, beginnt sie Wasser an die tiefergelegene abzugeben. Der kapillare Aufstieg ist eine Funktion des Gradienten des Bodenwassergehalts angrenzender Bodenschichten (Informationen in diesem Kapitel nach Tsuji et al. 1994).

4.3.2 Die Datenbasis der Simulation

Die Datenbasis für die Modellierung des Pflanzenwachstums in dieser Arbeit lieferten einerseits Ergebnisse des durchgeführten Feldversuchs und der Bodenlaboranalysen, andererseits wurden Quellen aus der Literatur herangezogen und entsprechend den Anforderungen der Modellierung aufgearbeitet.

4.3.3 Bodendaten und Klassenbildung

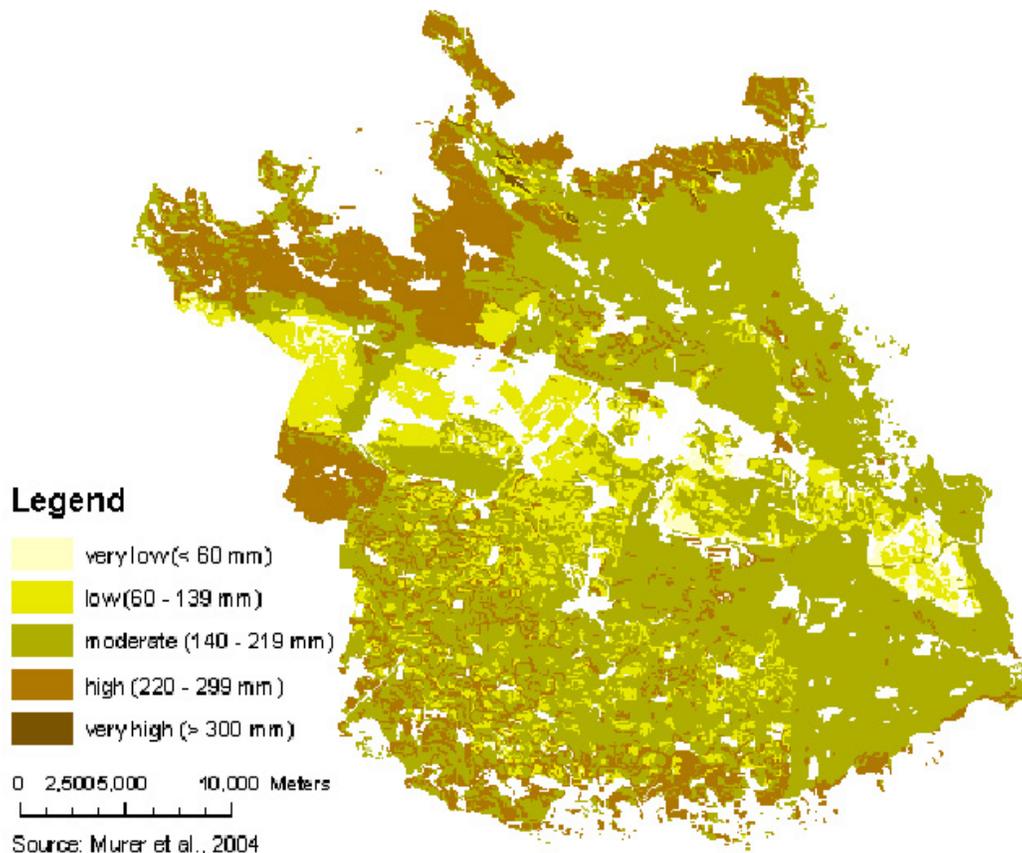


Abbildung 4.5: Die nutzbare Feldkapazität der landwirtschaftlichen Böden im Marchfeld (nach Murer 2005)

Die österreichische Bodenkartierung (Bundesanstalt für Bodenkultur, 1993) unterscheidet im Marchfeld 255 verschiedene Bodenformen. Für jede Bodenform enthält die Kartierung eine detaillierte Beschreibung. Aus dieser Fülle an Informationen wurden die für die Simulation relevanten Daten ausgewählt. Dazu gehören Lage und Ausdehnung der Bodenform (in ha); Anzahl und Mächtigkeit der Bodenhorizonte; Körnung, d. h. Anteil der Sand-, Schluff-, Ton- und Grobkornfraktion (in Massenprozent); Humusgehalte (in Massenprozent); CaCO_3 -Gehalt (in g kg^{-1}) und pH-Werte. Vom Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (IKT Petzenkirchen) wurden Angaben zum Bodenwasserhaushalt übernommen (Murer 2005). Die Parameter Sättigungspunkt (SAT in Volumsprozent), Feldkapazität (FK in Volumsprozent) und permanenter Welkepunkt (PWP

Tabelle 4.5: Klassengrenzen entsprechend der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums

Bezeichnung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
nFKWe (in mm)	<60	60-140	140-220	220-300	>300

in Volumsprozent) und nutzbare Feldkapazität (in mm) wurden vom IKT nach einer Methode der AG Boden (1996) berechnet, und den Bodenformen aus der österreichischen Bodenkartierung zugeordnet.

Die Bodenformen wurden vor einer Berechnung mit DSSAT zu 5 Bodenklassen zusammengefasst. Eine Berechnung mit 255 Bodenformen wäre zu umfangreich gewesen. Als Kriterium für die Klassenbildung wurde die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums herangezogen (siehe Abbildung 4.5). Dieser Parameter ist am semi-ariden, grundwasserfernen Standort Marchfeld wichtig für die Pflanzenentwicklung. Er determiniert wesentlich die Wasserverfügbarkeit für die Nutzpflanzen, und damit auch die Aufnahme der gelösten Nährstoffe. Die Klassengrenzen wurden nach AG Boden (1996) festgelegt (siehe Tabelle 4.5).

Vor der Klassenbildung wurde eine einheitliche Horizontierung festgelegt (Bodentiefe: 0-10 cm, 10-20 cm; 20-40 cm; 40-70 cm; 70-100 cm, 100-150 cm). Entsprechend der Horizontierung aus der Bodenkartierung nicht dieser Einteilung, dann wurden gewichtete Mittel gebildet, z.B.: reicht bei Bodenform x der Horizont b von 10 cm bis 30 cm und der Horizont c von 30 cm bis 50 cm → dann erfolgte die Berechnung des Parameter y für den vereinheitlichten Bodenhorizont von 20 bis 40 cm als $y = 0,5y_b + 0,5y_c$. Die Berechnung eines Parameter y für die Bodenklassen erfolgte ebenfalls als gewichtetes Mittel, wobei für jede Bodenform ein Wichtungsfaktor entsprechend des Anteils der Fläche der Bodenform A_{Bf} an der Gesamtfläche der Klasse A_{Kl} berechnet wurde, und mit dem Parameter der Bodenform multipliziert wurde. Die gewichteten Parameter wurden dann aufsummiert:

$$y = \sum_{i=1}^n \frac{A_{Bfi}}{A_{Kl}} y_{Bfi}$$

Feststoffdichte (BD) und k-Werte wurden mit Hilfe einer PedoTransfer-Berechnung nach Rawls und Brakensiek (1985) bestimmt. Der Faktor für das Wurzelwachstum (SRGF) wurde nach Angaben aus Kutschera (1960) geschätzt.

Die ermittelten Daten wurden in ein für die Simulation mit DSSAT geeignetes Format gebracht. Die Angaben aus der Bodenkartierung wurden für Böden in natürlicher Schichtung und Lagerung ermittelt. Die Minimalbodenbearbeitung ist relativ naturnahe und belässt den Boden in seiner Schichtung und Lagerung (abgesehen von möglichen Schadverdichtungen durch das Befahren). Die ermittelten Bodenklassen wurden daher für die Berechnungen der Kulturführung mit Minimalbodenbearbeitung (Mini.) verwendet. Die Verwendung von integrierter Bodenbearbeitung kann für die Zukunft der Betriebe im Marchfeld als realistischer angesehen werden, als der völlige Verzicht auf den Pflug. Mögliche Langzeiteffekte einer reinen Bewirtschaftung mit Direktsaat (z.B. Veränderungen des Humusgehalts) wurden daher außer Acht gelassen. Rezente Pflugsohlen können daher auch für die Mini-Variante angenommen werden. Die Feststoffdichten für den Horizont von 20-40 cm bzw. 25-40 cm wurden daher in beiden Varianten leicht erhöht.

Tabelle 4.7: Faktoren für die Berechnung der bodenphysikalischen Parameter der Pflugvariante

	SAT	FK	PWP	BD	k-Wert
$f_{\text{Egge}} = \frac{y_{\text{Egge}}}{y_{\text{Mini}}}$	1,15	0,83	0,84	0,85	5
$f_{\text{Pflug}} = \frac{y_{\text{Pflug}}}{y_{\text{Mini}}}$	1,1	0,875	0,885	0,89	2,5

Für die Modellierung des gepflügten und geegten Bodens mussten die Bodenklassen entsprechend modifiziert werden. Für den Oberboden (Egge: 0-5 cm; Pflughorizont bis 25 cm Tiefe) wurden Faktoren für die Parameter SAT, FK, PWP, BD und k-Werte bestimmt (siehe Tabelle 5.4). Die Faktoren basieren auf den Ergebnissen der Bodenlaboranalysen der gepflügten bzw. minimal bodenbearbeiteten Böden. Die Faktoren entsprechen weiters den Überlegungen aus Kapitel 2.3. Pflügen, und noch stärker Eggen, führt zu einer Herabsetzung der Feststoffdichte und einer Erhöhung des Gesamtporenvolumens und der Infiltrierbarkeit. Die nutzbare Feldkapazität wird jedoch herab gesetzt. Die Faktoren für die Durchwurzelung wurden für den Pflughorizont erhöht. Es wurde davon ausgegangen, dass die lockernde Wirkung des Pflugs den Eindringwiderstand für die Wurzeln herab setzt, und damit ihr Wachstum fördert. Der analysierte Boden vom Standort Raasdorf entspricht weitgehend der Bodenklasse 3. Für die anderen Klassen wurde eine ähnliche Wirkung von Pflug und Egge angenommen, daher wurden die Faktoren beibehalten.

Die Werte für den Unterboden (25-150 cm) wurden aus der Mini-Variante unverändert übernommen. Pflugsohlen sind bereits berücksichtigt worden. Für den Unterboden unterhalb 40 cm wurde kein direkter Einfluss der Pflugarbeit angenommen.

4.3.4 Die Charakterisierung der gebildeten Bodenklassen für das Marchfeld

Die fünf für die Simulation gebildeten Klassen (Profile in Abbildung 4.6) fallen weitgehend mit den wesentlichen, landwirtschaftlich genutzten Bodenarten im Marchfeld zusammen.

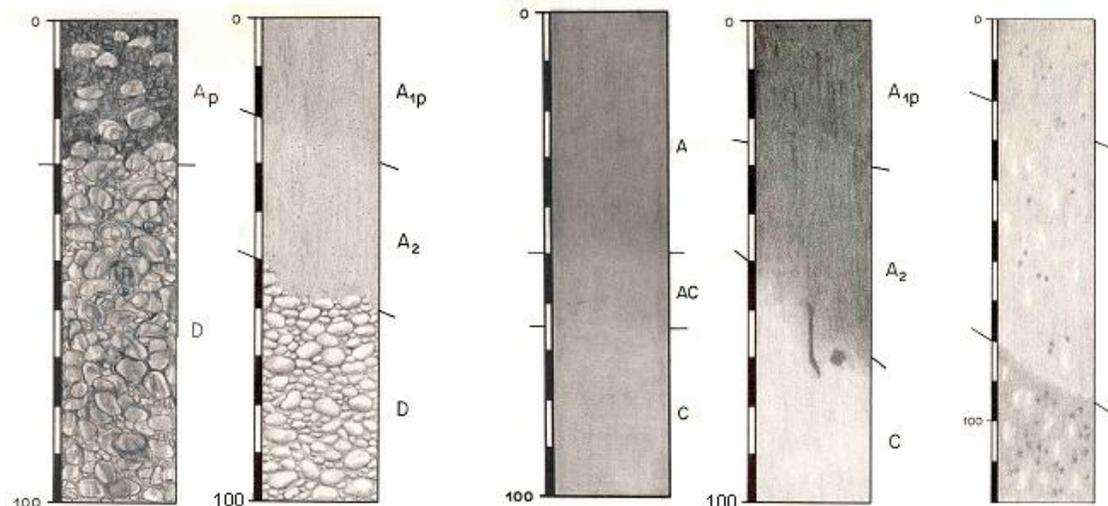


Abbildung 4.6: Repräsentative Bodenprofile für die 5 Bodenklassen (Quelle: Bundesanstalt für Bodenkunde 1993) (von links nach rechts: Klasse 1 bis 5)

- Klasse 1:** Fläche: 1453,7 ha (1,97% der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Marchfeld); sehr geringe nutzbare Feldkapazität; Bodenmächtigkeit: 30 cm; Bodenart: lehmiger Sand; Bodentypen: Paratschernoseme aus Flugsand über Schotter; Lage: südlicher Teil der Gänserndorfer Terrasse (Helmahof bis Schlosshof); meist Forstflächen, die landwirtschaftliche Nutzung ist unbedeutend
- Klasse 2:** Fläche: 11121,0 ha (15,07%); geringe nutzbare Feldkapazität; Bodenmächtigkeit: 50-60 cm; Bodenart: sandiger Lehm; Bodentypen: Paratschernoseme und Tschernoseme über Schotter und Sand; Lage: südlicher Teil der Gänserndorfer Terrasse (Helmahof bis Schlosshof); geringwertige Ackerflächen
- Klasse 3:** Fläche: 47647,6 ha (64,57%); mittlere nutzbare Feldkapazität; Bodenmächtigkeit: 80-120 cm; Bodenart: sandiger Lehm; Bodentypen: graue Auböden, Tschernoseme und Feuchtschwarzerden, Lage: Praterterrasse, Teil der Gänserndorfer Terrasse und Übergangsgebiet zum Hügelland; mittel- bis hochwertige Ackerböden
- Klasse 4:** Fläche: 13533,9 ha (18,34%); hohe nutzbare Feldkapazität; Bodenmächtigkeit: 80-120 cm; Bodenart: lehmiger Schluff; Bodentypen: graue Auböden, Tschernoseme und Lössrohböden, Lage: vor allem Auböden entlang der Donau und im Übergangsgebiet zum Hügelland; mittel- bis hochwertige Ackerböden
- Klasse 5:** Fläche: 39,6 ha (0,05%); sehr hohe nutzbare Feldkapazität ; Bodenmächtigkeit: 150 cm; Bodenart: lehmiger Sand (ab 70 cm sandiger Lehm); Bodentypen: Tschernosemkolluvium; Lage: Nähe Auersthal; mittel- bis hochwertiger Ackerboden (sehr hohe nutzbare Feldkapazität nur aufgrund der großen Bodenmächtigkeit; kann nur bei voll entwickeltem Wurzelsystem genutzt werden)

Für jede der fünf Bodenklassen wurde eine Pflug und eine Mini. Variante im DSSAT-Format erstellt. Die insgesamt 10 Bodenfiles befinden sich im Anhang. Eine Pflugvariante für die sehr seichtgründige Bodenklasse 1 wurde ebenfalls gebildet, um das Pflanzenwachstum an einem extremen Standort simulieren zu können. In der Praxis ist die Anwendung des Pflugs in diesem sehr seichten und steinigen Oberboden aber unrealistisch.

4.3.5 Kalibration und Validierung der Sorten

Für den Standort Fuchsenbigl im Marchfeld (Seehöhe: 149 m; Koordinaten: N 48° 12'; E 16° 45') wurden regionale Sorten von Winterweizen und Sommergerste kalibriert. Für diesen Standort waren eine Reihe von historischen Daten zu Kulturführung und Erträgen verfügbar. In dieser Gemeinde befindet sich ein Betrieb der Landwirtschaftlichen Bundesversuchswirtschaften GmbH an dem Sortenprüfungen durchgeführt werden. Die Daten der Sortenversuche am Standort wurden bis 2002 in Jahresbänden des Bundesamts und Forschungszentrum für Landwirtschaft veröffentlicht (BFL 1988-2002). Ab 2002 übernahm die neu gegründete AGES das Sortenwesen, die Daten sind seither nicht mehr in Buchform erhältlich. Für die Kalibration wurden für Winterweizen und Sommergerste Daten zur Kulturführung (Saatzeitpunkt und -stärke; Vorfrucht; Düngung) und Ergebnisse der Versuche (Erträge; Bestandesdichte, Zeitpunkt des Ähren/Rispenschiebens) verwendet. Es wurden Sorten gewählt, für die ausreichend Daten zur Verfügung standen und die in der Region gängig sind.

Anhand von Bodenlabordaten (siehe Kapitel 5.1.1 und 5.1.2, Rischbeck 2004) aus dem Feldversuch am Standort Raasdorf wurde ein gepflügter, kalkhaltiger Tschernosem modelliert (Daten sie-

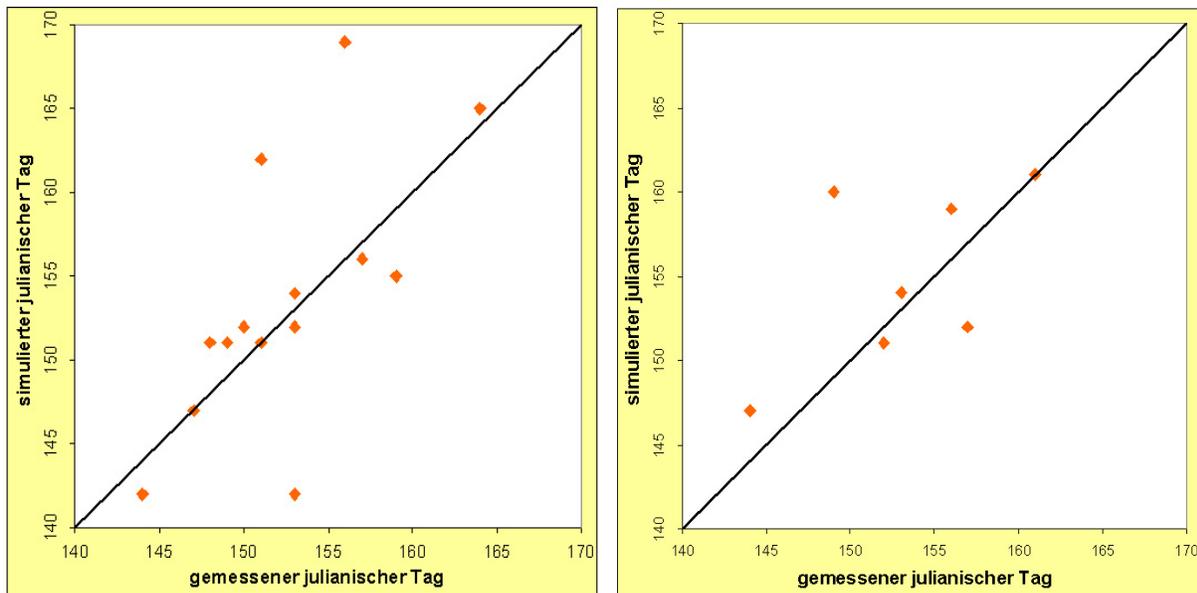


Abbildung 4.7: Kalibrierung des Blühzeitpunktes der Winterweizensorte Capo am Standort Fuchsenbigl (links), Validierung am Standort Obersiebenbrunn (rechts)

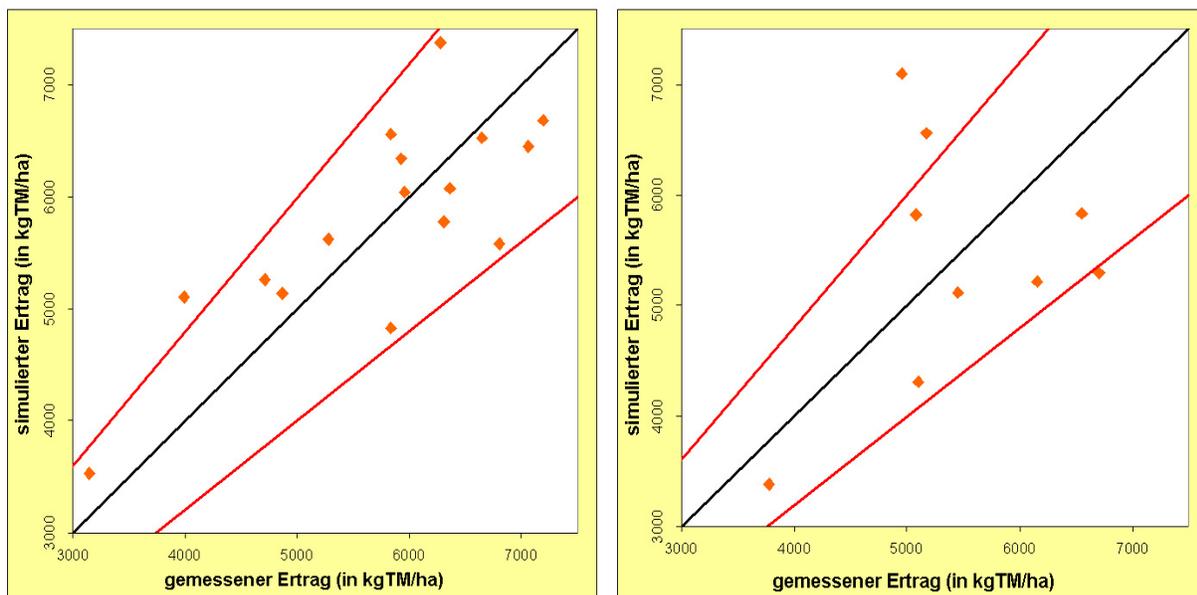


Abbildung 4.8: Kalibrierung des Ertrags der Winterweizensorte Capo am Standort Fuchsenbigl (links), Validierung am Standort Obersiebenbrunn (rechts); rote Linie: Toleranzbereich $\pm 20\%$ Abweichung

he Anhang Abbildung 8.1 Tschernosem Raasdorf Pflug). Dieser Boden ist dem Boden am Standort Fuchsenbigl sehr ähnlich, und wurde für die Kalibrierung verwendet.

Der Wetterdatensatz (Werte auf Tagesbasis: T_{max} (in $^{\circ}\text{C}$), T_{min} (in $^{\circ}\text{C}$), rad (in $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), v (in km h^{-1}) (1988-2006) wurde von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), die am Standort Fuchsenbigl eine Wetterstation betreibt, zur Verfügung gestellt.

Für die unabhängige Validierung wurden für Winterweizen Daten der Landwirtschaftlichen Fach-

schule Obersiebenbrunn (Seehöhe: 151 m; Koordinaten: N 48° 16'; E 16° 41') herangezogen. Als Boden wurde hier die (gepflügte) Bodenklasse 3 verwendet. Die Wetterdaten stammen von einer ZAMG Station in Obersiebenbrunn. Für Sommergerste konnte aufgrund mangelnder Daten keine unabhängige Validierung durchgeführt werden.

Für die Simulation von Winterweichweizen wurde die Sorte Capo gewählt. Die Sorte wurde bereits 1989 zugelassen, und wird von zahlreichen LandwirtInnen im Marchfeld verwendet. Capo ist eine Qualitätsweizensorte (A-Weizen). Qualitätsweizen verfügt über einen hohen Proteingehalt und hohe Proteinqualität und muss gute Backeigenschaften aufweisen. A-Weizen dient der menschlichen Ernährung. Die Sorte Capo weist im Trockengebiet leicht überdurchschnittliche Erträge auf. Capo ist begrannt, und hat eine Wuchshöhe von etwa 108 cm. Die Winterfestigkeit der Sorte ist gut, was sie für das schneearme und frostgefährdete Marchfeld eignet. Capo hat eine relativ geringe Anfälligkeit für Rostpilze, mittlere Anfälligkeit für Mehltau und Fusarium und eine leicht erhöhte Anfälligkeit für Septoria. Capo gehört zu einer mittleren bis frühen Reifegruppe und blüht in Fuchsenbigl um den 3. Juni ($\sigma=5$ d) um reift um den 8. Juli ($\sigma=6,5$ d) ab. Der Durchschnittsertrag in Fuchsenbigl liegt bei rund 5800 kgTM ha⁻¹ ($\sigma=1085$ kgTM ha⁻¹).

Die Kulturführung bei Kalibration und Validierung wurde der landwirtschaftlichen Praxis der Bundesversuchswirtschaft angepasst. Als Vorfrüchte wurden Körnerleguminosen, Luzerne und Sonnenblume gewählt. Gesät wurde um den 14. Oktober bei einer Saatstärke von 350 bis 450 Körnern m⁻² (Reihenabstand: 12 cm; Saattiefe: 3 cm). Stickstoff wurde nach ÖPUL-Vorschrift je nach Vorfrucht auf insgesamt 120 kg Rein-N ha⁻¹ a⁻¹ mit zwei Gaben Ammoniumnitrat aufgedüngt. Die Phosphor- und Kaliumdüngung wurde ebenfalls der Vorfrucht angepasst. Krankheiten und Schädlinge wurden bei Kalibration und Validierung nicht berücksichtigt, daher erfolgten auch keine Pflanzenschutzmaßnahmen. Auf eine Bewässerung wurde ebenfalls verzichtet. Die Bodenbearbeitung erfolgte als Herbstpflugfurche und Saatbettbereitung. Die Kulturführung bei der Simulation erfolgte, abgesehen vom Saattermin, analog.

Die Abbildung 4.7 zeigt die Ergebnisse der Kalibration und Validierung des Blühzeitpunktes des Winterweizens. Die Qualität der Kalibrierung ist ausreichend, die meisten Simulationsergebnisse weichen nicht mehr als 2 Tage von den tatsächlichen Blühzeitpunkten ab. In einer Gesamtmenge von 15 Kalibrationsjahren befinden sich drei "Ausreißer". Die Validierung fällt etwas schlechter aus, in einer Gesamtmenge von 7 Validierungsjahren befinden sich 2 Fehlsimulationen.

Bei der Kalibration der Erträge befindet sich in einer Gesamtmenge von 16 Jahren nur ein Wert, der außerhalb des Toleranzbereichs von $\pm 20\%$ liegt. Die Validierung fällt auch bei den Erträgen schlechter aus, in 9 Werten sind drei "Ausreißer". Das schlechtere Abschneiden der Validierung zeigt die Limitationen des Modells CERES/DSSAT. Das Modell kann nicht für eine exakte Simulation einzelner Jahre heran gezogen werden. Die Aufgabe der Simulation ist es längerfristige Tendenzen des Pflanzenwachstums bei Änderungen der Rahmenbedingungen aufzuzeigen.

Die Parameter der Winterweichweizensorte Capo für DSSAT/CERES wurden wie folgt (Abbildung 4.9) festgelegt:

Tabelle 4.9: Genetische Parameter der Winterweizensorte Capo für DSSAT/CERES

P1V	P1D	P1	P2	P3	P4	P5	G1	G2	G3	PHINT	LT50H	PAR
60	90	240	358	297	95	560	28	42	1.33	95	-18	2,8

Die Parameter werden in der DSSAT-Dokumentation definiert:

- P1V** Tage bei optimaler Vernalisationstemperatur, die erforderlich sind um die Vernalisation abzuschliessen.
- P1D** Prozentuelle Reduktion der Entwicklungsrate (Referenz = optimale Entwicklungsrate) bei einer um 10 Stunden gegenüber der optimalen Photoperiode verkürzten Photoperiode.
- P1** Dauer der Phase vom Ende der Jugendentwicklung bis zum Doppelringstadium.
- P2** Dauer der Phase vom Doppelringstadium bis zum Ende des Blattwachstums.
- P3** Dauer der Phase vom Ende des Blattwachstums bis zum Ende des Ährenschiebens.
- P4** Dauer der Phase vom Ende des Ährenschiebens bis zum Beginn der Kornfüllung.
- P5** Dauer der Kornfüllungsphase (Temperatursumme).
- G1** Anzahl fertiler Blüten pro Einheit Bestandesmasse bei der Blüte (1 g^{-1}).
- G2** Standardkornmasse unter optimalen Bedingungen (mg).
- G3** Standardtrockenmasse eines einzelnen Bestockungstriebes (einschließlich Körner) unter optimalen Bedingungen bei der Reife (g).
- PHINT** Phylochronintervall; das Temperatursummenintervall zwischen dem Erscheinen aufeinander folgender Blattspitzen.
- LT50H** Frosttoleranz bei voller Winterhärte ($^{\circ}\text{C}$).
- PAR** Umwandlungsrate der photosynthetisch aktiven Strahlung in Trockenmasse.

Die ersten beiden Parameter für Capo (Tabelle 4.9 P1V und P1D) determinieren die Sorte als Wintergetreide. Die Sorte ist vernalisationsbedürftig. Die Entwicklungsrate ist während der Winterruhe bei kurzen Tageslängen stark reduziert. Die relativ hohe Kältetoleranz schützt die Sorte vor starker Auswinterung. Die Parameter P1 bis P5 legen die Reifegruppe der Sorte fest. G1 bis G3 sind wesentlich für das Ertragsniveau der Sorte.

Die Sommergerstensorte Magda dient als Futtergerste und ist für den Anbau im Trockengebiet geeignet. Die Sorte stammt aus den Niederlanden und wurde 1990 in Österreich zugelassen. Sie erreicht in Pannonien hohe bis mittlere Erträge. Am Standort Fuchsenbigl liegt der mittlere Ertrag (aus 10 Jahren) bei rund $5770 \text{ kgTM ha}^{-1}$ ($\sigma=962 \text{ kgTM ha}^{-1}$). Magda zeigt geringe Anfälligkeit für Mehltau, aber ist stark bis mittel von *Rhynchosporium* betroffen. Magda gehört einer mittleren Reifegruppe an. Die Blüte tritt um den 10. Juni ($\sigma=5,4$) auf, die Sorte reift um den 5. Juli ($\sigma=4,2$) ab. Die Sorte hat einen mittleren Proteingehalt und ist nicht als Braugerste geeignet.

Die Kulturführung bei Kalibration und Validierung von Magda wurde analog zur landwirtschaftlichen Praxis der Bundesversuchswirtschaft simuliert. Als Vorfrüchte wurden Zuckerrübe, Körnererbse und Sonnenblume gewählt. Gesät wurde um den 14. März ($\sigma=7,8 \text{ d}$) bei einer Saatstärke von 330 bis 430 Körnern m^{-2} (Reihenabstand: 12 cm; Saattiefe: 3 cm). Stickstoff wurde je nach Vorfrucht auf insgesamt $96 \text{ kg Rein-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ mit einer Gabe Ammoniumnitrat aufgedüngt. Die Phosphor- und Kaliumdüngung wurde ebenfalls der Vorfrucht angepasst. Krankheiten und Schädlinge wurden bei Kalibration und Validierung nicht berücksichtigt. Das Getreide wurde nicht bewässert. Die

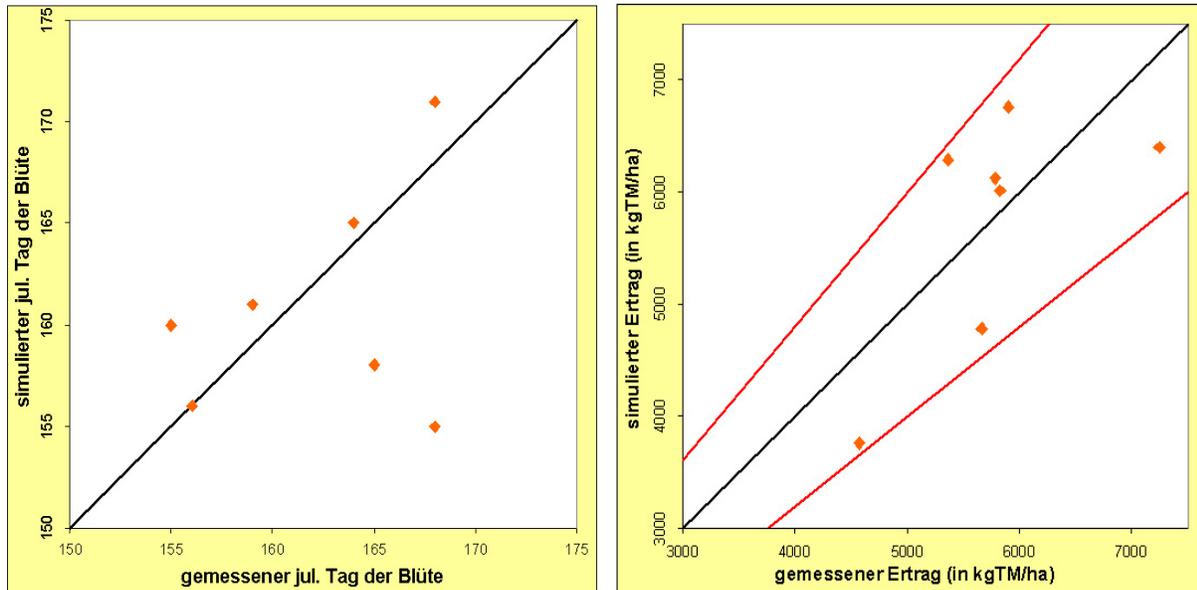


Abbildung 4.9: Kalibration von Blühzeitpunkt und Ertrag der Sommergerstensorte Magda am Standort Fuchsenbigl

Bodenbearbeitung erfolgte als Herbstpflugfurche, die Saatbettbereitung wurde im Frühjahr durchgeführt.

Die Abbildung 4.9 zeigt befriedigende Ergebnisse der Kalibration des Blühzeitpunktes und des Ertrags der Sommergerstensorte Magda. Eine unabhängige Validierung konnte aufgrund mangelnder Daten nicht durchgeführt werden.

Tabelle 4.10: Genetische Parameter der Sommergerstensorte Magda für DSSAT/CERES

P1V	P1D	P1	P2	P3	P4	P5	G1	G2	G3	PHINT	PAR
0	0	560	200	190	120	420	22	40	1,0	75	3,1

Tabelle 4.10 zeigt die genetischen Parameter der Sommergerstensorte Magda für DSSAT/CERES. Bei Sommergerste wurde das Vernalisationsbedürfnis züchterisch beseitigt ($P1V=0$). Die Sorte ist an die Tageslänge im Frühjahr adaptiert. P1 bis P5 determinieren die Reifegruppe von Magda. Das im Vergleich zu Weizen geringere Phylochronintervall zeigt, dass sich diese Kultur rascher entwickelt. Gerste ist biologisch gut an sommertrockene Bedingungen angepasst und reift rascher ab als andere Getreidearten.

4.3.6 Die Erzeugung von synthetischen Wetterdaten

Für die Simulation mit DSSAT sind als Datensätze tägliche Wetterdaten erforderlich. Als minimaler Datensatz werden das tägliche Temperaturmaximum und Temperaturminimum, die tägliche Summe der Niederschläge (in mm) und die tägliche Globalstrahlung (in $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) benötigt.

Für die gegenwärtigen Klimabedingungen, für das Klimaszenario für die Jahre 2015-2035 und für das Klimaszenario 2040-2060 wurden für die Region Marchfeld entsprechende Wetterfiles erstellt. Die Erstellung dieser regionalen Wetterdaten wurde von Martin Dubrovsky vom Institut für atmosphärische Physik in Prag (CZ) durchgeführt (detaillierte Methode siehe Dubrovsky 2005).

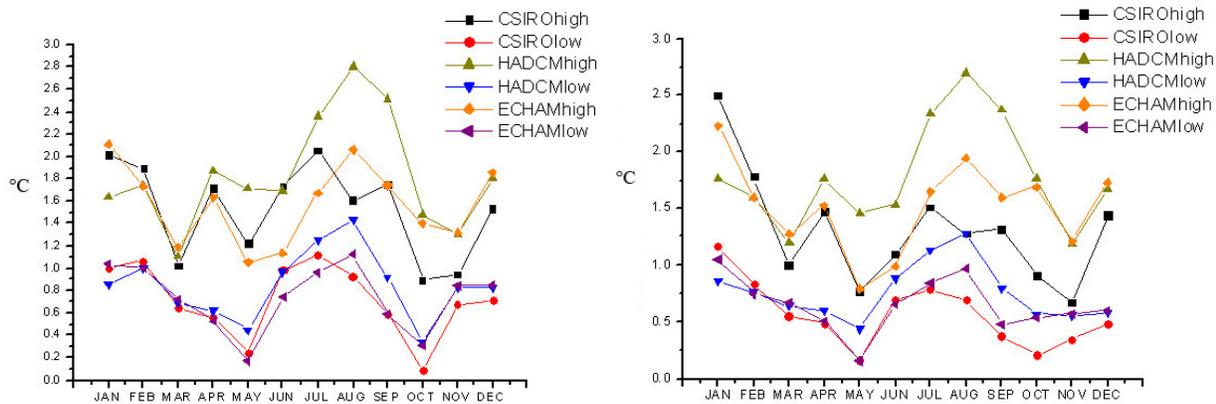


Abbildung 4.10: Veränderung der mittleren monatlichen Temperaturmaxima (links) und -minima (rechts) für die Periode 2015 - 2035 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit den Modellen CSIRO, HadCM3 und ECHAM5

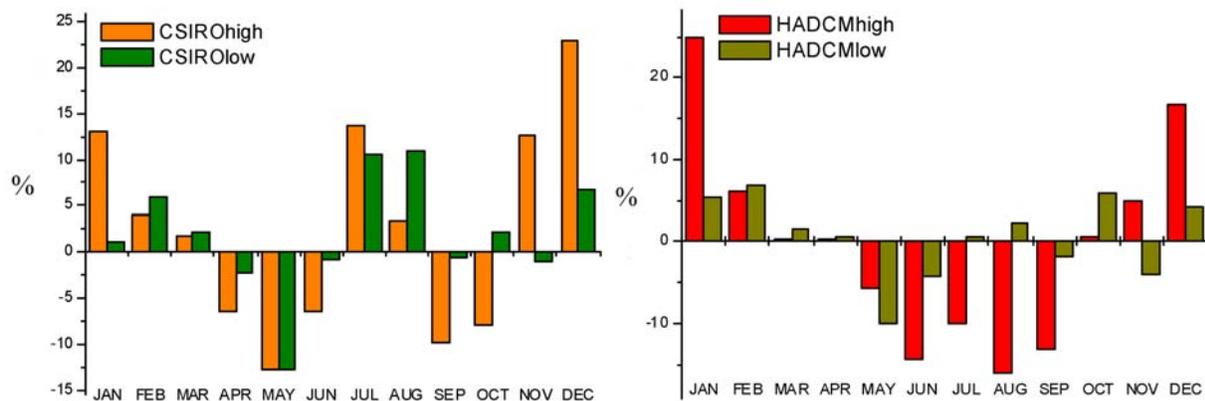


Abbildung 4.11: Relative Veränderung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2015 - 2035 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit den Modellen CSIRO (links) und HadCM3 (rechts)

Die Daten wurden mit dem Wettergenerator Met&Roll (Dubrovsky 1996) erzeugt. Met&Roll ist ein stochastischer Wettergenerator mit einem täglichen Zeitintervall. Der Wettergenerator erfasst die stochastische Struktur von Wetterzeitreihen (Niederschlag, Globalstrahlung, Temperaturmaximum, Temperaturminimum), die als Input von der Software verwendet werden. Anhand der erfassten Struktur wird dann synthetisches (an einem Standort mögliches) Wetter erzeugt. Met&Roll bietet auch die Möglichkeit aufgrund einer Klimaveränderung modifiziertes (potentiell mögliches) zukünftiges Wetter synthetisch zu erzeugen. Dafür werden die Ergebnisse von regionalen Klimaszenarien als Input für die Software verwendet. Die Struktur des simulierten Wetters ändert sich entsprechend.

Für die gegenwärtigen Klimabedingungen wurde ebenfalls eine Erstellung von synthetischem Wetter mit Met&Roll durchgeführt. Dieser Schritt war notwendig, um eine Vergleichbarkeit mit den Klimaszenarien zu gewährleisten, und um die Datengrundlage auszuweiten. Als Datengrundlage für Met&Roll wurden Wetteraufzeichnungen der ZAMG aus Fuchsenbigl aus dem Zeitraum 1971-2005 verwendet.

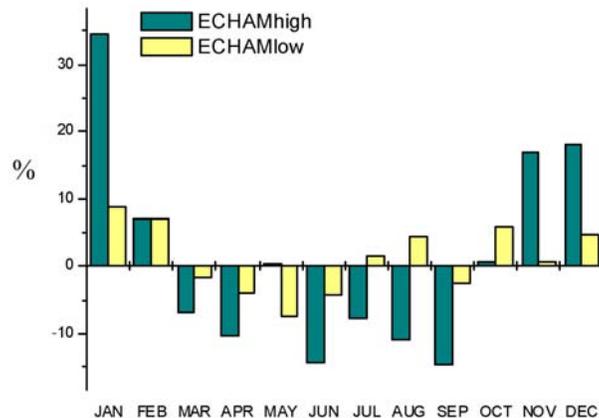


Abbildung 4.12: Relative Veränderung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2015 - 2035 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit dem Modell ECHAM5 (nach Dubrovsky 2007)

Dieser Zeitraum ist damit als Klimareferenzperiode dieser Arbeit definiert. Für die Referenzperiode und für jedes Szenario wurden maximal 99 synthetische (Wetter)jahre, mit der entsprechenden stochastischen Verteilung der Periode, erzeugt.

Das synthetische zukünftige Wetter wurde anhand des globalen Emissionszenarios SRES A2 erstellt. Dieses Emissionszenario wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change veröffentlicht (IPCC 2000). Den Emissionsszenarien des IPCC liegen verschiedene mögliche soziale, ökonomische und ökologische Entwicklungsmöglichkeiten der Menschheit zu Grunde. Das Szenario A2 wird vom IPCC folgendermaßen beschrieben (eigene Übersetzung aus dem Englischen) "Das A2-Emissions- und Handlungsszenario beschreibt eine sehr vielschichtige Welt. Der Grundgedanke ist Eigenständigkeit und der Erhalt lokaler Identitäten. Die Geburtenraten verschiedener Regionen gleichen sich nur sehr langsam aneinander an, was zu einem fortgesetzten Bevölkerungswachstum führt. Die wirtschaftliche Entwicklung ist in erster Linie regional ausgerichtet und das Wirtschaftswachstum pro Kopf und die technologische Entwicklung laufen uneinheitlicher und langsamer ab als in anderen Szenarien." Das Ergebnis dieses Szenarios ist eine Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bis 2025 auf 438 ppm und bis 2050 auf 532 ppm.

Die Konzentrationen an CO₂ und anderer Treibhausgase gehen als Randbedingungen in Klimaberechnungen mit globalen Zirkulationsmodellen (GCM) ein. Die Ergebnisse der GCMs variieren entsprechend der Klimasensibilität mit der sie berechnet werden. Als Klimasensibilität wird die Erhöhung der globalen Jahresmitteltemperatur bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bezeichnet. Um ein größeres Spektrum möglicher Klimaänderungen abzudecken, wurden drei unabhängige globale Zirkulationsmodelle (ECHAM5, HadCM3 und CSIRO) mit jeweils hoher und niedriger Klimasensibilität durchgerechnet.

Alle drei verwendeten GCMs berücksichtigen sowohl die ozeanische als auch die atmosphärische Zirkulation. HadCM und ECHAM werden als Standardmodelle für Europa verwendet. CSIRO wurde von der australischen "Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation" entwickelt. Es berücksichtigt insbesondere die süd pazifische Oszillation (El Niño), und wurde unter anderem für bioklimatologische Fragestellungen entwickelt.

Mit Hilfe der Modelle ECHAM5, CSIRO, und HadCM3 wurden für Rasterpunkte synthetische Wetterdaten für die Perioden 2015 bis 2035 (Szenario 2025) und 2040 bis 2060 (Szenario 2050) erzeugt. Die auf den Szenarien basierenden Daten wurden statistisch mit den Wetterdaten der

Referenzperiode (1971-2005) verglichen. Die Anomalien (ΔT_{max} , ΔT_{min} , $\Delta prec$; Δrad) für die Szenarien 2025 und 2050 wurden ermittelt. Mit Hilfe der Rasterpunkte wurde eine 3-dimensionale Interpolation der Anomalien für die Koordinaten des Marchfelds [E 16,7; N 48,2] durchgeführt (Ergebnisse siehe Kapitel 4.3.3). Die so gewonnenen regionalen Anomalien dienen als Eingabedaten für die Wettersimulation. Anhand dieser Anomalien wurde die stochastische Verteilung der Referenzperiode modifiziert. Der Wettersimulator lieferte als Ausgabe regionalisiertes, synthetisches Wetter für den Standort Fuchsenbigl, das entsprechende Szenario und die zukünftige Klimaperiode. Die Simulationen berücksichtigen nicht die Veränderung der täglichen Klimavariabilität, die im Zuge einer Klimaänderung eintreten kann. Dies stellt eine mögliche Fehlerquelle dar, die sich auch im simulierten Pflanzenwachstum fortpflanzen kann. Das für den Standort Fuchsenbigl ermittelte synthetische Wetter kann als repräsentativ für die ganze Region Marchfeld angesehen werden. Die Höhenlagen der Ackerflächen im Marchfeld weichen lediglich $\sim 35\text{m}$ (Seehöhen: Engelhartstetten: 143m; Wolkersdorf: 178m) voneinander ab. Der langjährige Niederschlagsgradient (IWHW 2007) zwischen West- und Ostseite ist in der ebenen Region ebenfalls sehr gering. Auf eine Interpolation der Wetterdaten in der Fläche wurde daher verzichtet.

4.3.7 Analyse der Klimaszenarien

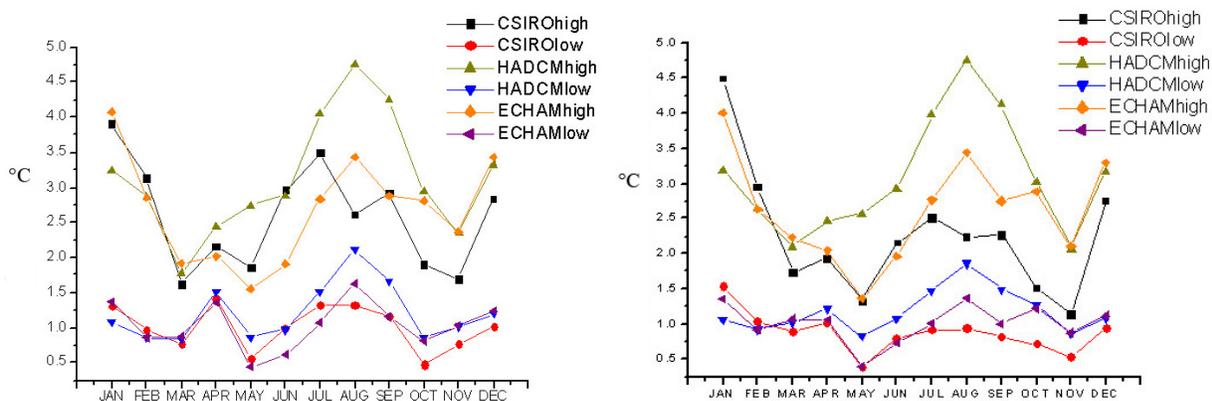


Abbildung 4.13: Veränderung der mittleren monatlichen Temperaturmaxima (links) und -minima (rechts) für die Periode 2040 - 2060 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit den Modellen CSIRO, HadCM3 und ECHAM5 (erstellt von Martin Dubrovsky)

Die Abbildungen 4.10, 4.11, 4.12, 4.14 und 4.15 zeigen die Anomalien der Temperatur und des Niederschlags für das Marchfeld, die mit verschiedenen Klimaszenarien bzw. unterschiedlicher Klimasensitivität für die Zeiträume 2015-2025 (kurz 2025er-Szenario) und 2040-2060 (kurz 2050er-Szenario) berechnet wurden. Die Ergebnisse weisen je nach Berechnung größere Schwankungen in der Intensität der möglichen Klimaänderung auf, es können aber allgemeine Aussagen gemacht werden. Die Klimaänderung fällt jahreszeitlich unterschiedlich aus. Zur stärksten Erwärmung wird es im Sommer und Winter kommen, die Erwärmung in den Übergangszeiten Frühling und Herbst fällt geringer aus. Mit Ausnahme des Modells CSIRO werden in der wärmeren Jahreszeit von März/April bis September/Oktober geringere Niederschlagsmengen, und in der kälteren Jahreszeit höhere Niederschlagsmengen vorausgesagt. Diese Saisonalität der Klimaänderung ist auf eine Veränderung der vorherrschenden Wetterlagen in Mitteleuropa zurück zu führen. Der sommerliche Hochdruckeinfluß in Mitteleuropa wird im Zuge der Erwärmung stärker. Es kommt daher häufiger zu einer Verbindung des atlantischen Azorenhochs mit dem kontinentalen Hoch über Osteuropa. Diese Wetterlage führt in Ostösterreich zu trockenem und heißem Wetter. Bei ver-

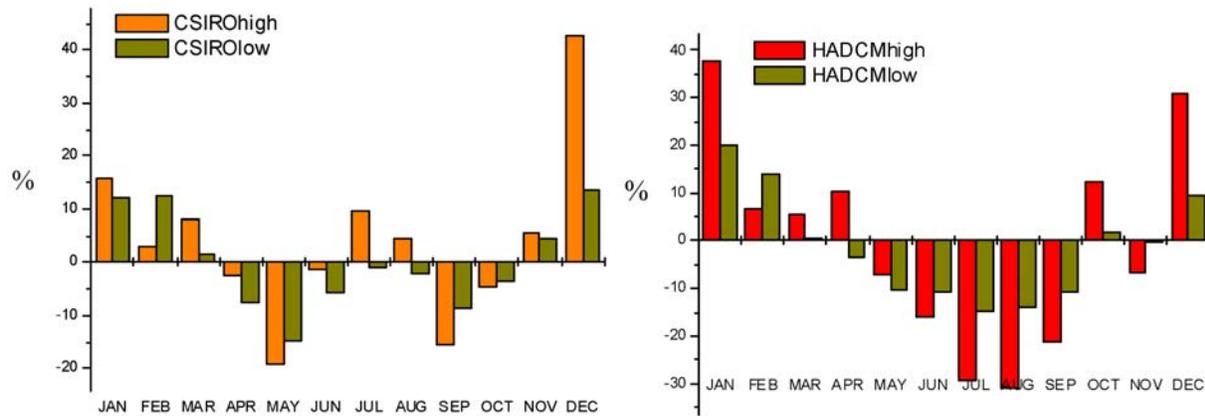


Abbildung 4.14: Relative Veränderung der monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2040 - 2060 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit den Modellen CSIRO (links) und HadCM3 (rechts) (erstellt von Martin Dubrovsky)

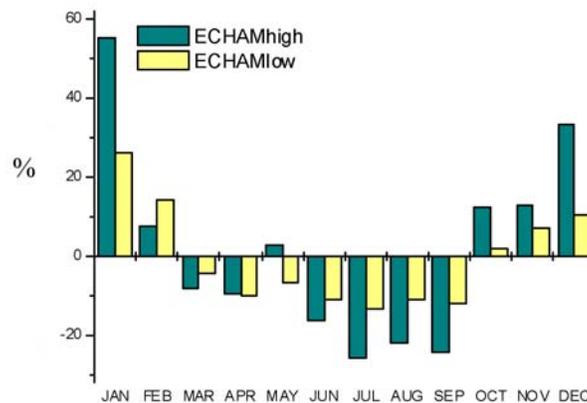


Abbildung 4.15: Relative Veränderung der monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2040 - 2060 im Vergleich zur Referenzperiode, berechnet mit dem Modell ECHAM5 (erstellt von Martin Dubrovsky)

mehrter Hochdruckwetterlage nimmt die Anzahl der frontalen Niederschläge ab. Die Intensität der Niederschläge nimmt aber in Folge eines erhöhten Wasserdampfgehalts der wärmeren Luft zu. Es kann demnach im Sommer vermehrt zu heißen und trockenen Phasen kommen, die von intensiven Niederschlägen unterbrochen werden. Im Winter wird von einer Zunahme und Intensivierung der Frontalniederschläge und einer Erhöhung der Temperatur ausgegangen. Atlantiktiefs mit feucht-kühlem Wetter können die trocken-kalten, polaren Hochs über Ost- und Mitteleuropa zurück drängen. Schneefall wird gegenüber Regen zurück gehen. Im Jahresmittel wird mit einer Reduktion der Niederschläge gerechnet. Die vermehrt feuchten Wetterlagen im Winter, und die vermehrt trockenen im Sommer, erklären auch die Veränderung der täglichen Temperaturminima und -maxima. Im Winter steigen aufgrund vermehrter bedeckter Nächte die Minima stärker an als die Maxima, im Sommer verhält es sich aufgrund vermehrter klarer Strahlungstage umgekehrt.

Die 2025er und 2050er Szenarien zeigen eine ähnliche Saisonalität, es steigert sich vor allem die Intensität der Klimaänderung. Es kommt aber zu einer Ausweitung der warmen Jahreszeit und einer Verkürzung der kalten Jahreszeit und ihrer charakteristischen Wetterlagen (persönliche Mitteilung Formayer, H.).

Im Rahmen des Projekts *reclip:more* (Gobiet et al. 2007) wurden regionalisierte Klimaszenarien für den Zeitraum 2041-2050 für den alpinen Raum erstellt (Kontrollperiode: 1981-90). Die Regionalisierung (*down scaling*) basiert auf dem GCM ECHAM 5. Für die Veränderung der saisonalen Niederschlagsmengen ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Regionalisierung des ECHAM5 HIGH-Szenarios für die Periode 2040-60 (siehe Abbildung 4.15). Bei der Saisonalität der Veränderung der mittleren Temperaturen in einer Höhe von 2 m kommt *reclip:more* zu abweichenden Ergebnissen. Für den Winter wurde die geringste Erwärmung ermittelt, im Herbst käme es zur stärksten Erwärmung. Die Ergebnisse liegen aber innerhalb der Bandbreite der in Abbildung 4.13 gezeigten Werte.

Die Landwirtschaft kann demnach mit einer längeren Vegetationsperiode und einer rascheren Pflanzenentwicklung rechnen. Der Bodenwasserspeicher wird im Winter häufiger aufgefüllt werden, die Schneeschmelze fällt aber geringer aus. Frostschäden an Winterungen können trotz höherer Wintertemperaturen zunehmen, wenn die schützende Schneedecke wegfällt. Der Entwicklungsbeginn der Winterungen kann früher einsetzen, und daher in eine feuchtere Phase fallen. Später zur Zeit der Getreideblüte können Winterungen, aber vor allem Sommerungen, vermehrt von Trockenheit und Hitze betroffen sein. Die Ertragsvariabilität nimmt daher zu.

4.3.8 Ausgabe, Bearbeitung und Darstellung der Simulationsergebnisse

Aus den zahlreichen Ausgabedaten die DSSAT/CERES zur Verfügung stellt, wurden jene ausgewählt, die für die Zielsetzung dieser Arbeit relevant sind. Es sollte ermittelt werden, wie die Faktoren Bodenklasse, Bodenbearbeitung und Klimawandel auf den Pflanzen- und Bodenwasserhaushalt, die Phänologie und den wirtschaftlich bedeutsamen Ertrag der Kulturpflanzen Winterweizen und Sommergerste wirken. Jeder Ausgabeparameter wurde in mindestens 90 Wiederholungen (synthetische Wetterjahre) für jeden Faktor und jede Faktorstufe berechnet. Die Wiederholungen wurden mit Mittelwerten, Standardabweichung und 95%-Konfidenzintervallen zusammengefasst. Die Streuung wurde jeweils in der gleichen Einheit wie der Mittelwert angegeben. Eine über diese beschreibende Statistik hinaus gehende statistische Analyse wurde nicht durchgeführt. Der Einfluss des Zufalls kann bei dem deterministischen, auf Funktionen basierenden Modell CERES als sehr gering angesehen werden. Er beschränkt sich auf die Wahl des "random seeds", des Startwerts für die Simulation. Abweichungen in Höhe und Streuung der Ausgabeparameter sind somit direkte Folge der Faktorstufen. Die Faktoren und Faktorstufen sind:

$$\begin{aligned} & 5 \text{ Bodenklassen} \times 2 \text{ Varianten der Bodenbearbeitung} \\ & \times (12 \text{ Klimaszenarien} + 1(\text{Referenz } 1971\text{-}2005)) \times 2 \text{ Kulturen} \\ & = 260 \text{ Werte pro Ausgabeparameter} \end{aligned}$$

Aufgrund des großen Umfangs und der Ähnlichkeit der Ergebnisse der verschiedenen globalen Zirkulationsmodelle werden nur die Simulationen mit dem Szenario HadCM3 im Ergebnisteil dargestellt. Die Ergebnisse der anderen Modelle (ECHAM5 und CSIRO) befinden sich im Anhang.

Folgende Definitionen, soweit nicht anders gekennzeichnet, nach Tsuji et al. (1994):

Saatzeitpunkt: DSSAT/CERES verfügt über ein Modul zur Bestimmung des optimalen Saatzeitpunkts. Im Modul wird ein Toleranzbereich an möglichen Bodenwassergehalten und Bodentemperaturen eingegeben. Für beide Kulturen wurde der mögliche Bodenwassergehalt mit 10-85% der Feldkapazität angegeben, die Bodentemperatur für die Saat von Winterweizen

beträgt 5-13°C, für Sommergerste beträgt sie 5-12°C. Diese Angaben gelten für die Bodenschicht von 0-10 cm. Der Saatzeitpunkt ist als Jahrestag angegeben. Die Streuung wird in Tagen angegeben.

Blühzeitpunkt: Die Blüte ist mit BBCH 65 festgelegt (Biologische Bundesanstalt 2001). BBCH 65 ist bei Weizen und Gerste erreicht, wenn 50% der Staubgefäße reif sind. Die Werte sind als Jahrestag angegeben. Die Streuung wird in Tagen angegeben.

Reifezeitpunkt: Die Reife ist mit BBCH 87 festgelegt (Biologische Bundesanstalt 2001). BBCH 87 (Gelbreife) ist bei Weizen und Gerste dann erreicht, wenn ein Fingernageleindruck irreversible Druckstellen im Korn hinterlässt. Die Werte sind als Jahrestag angegeben.

Ertrag: Die Berechnung der Erträge in DSSAT/CERES ist komplex, sie werden aber im Wesentlichen von der täglichen Nettoassimilation (und Assimilatverlagerung in die Ernteorgane während der Reife) und der Dauer der phänologischen Phasen determiniert. Stressfaktoren (Nährstoffe, Wasser) wirken ertragsenkend. Die Erträge werden von DSSAT als Korntrockenmasse in kg ha^{-1} ausgegeben, diese Einheit wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit in dieser Arbeit beibehalten. Dies entspricht nicht der üblichen Angabe der Erträge in Agrarstatistiken, die als Kornfeuchtmasse mit standardisierten Wassergehalten (Getreide: 14 Gewichtsprozent H_2O) angegeben werden.

aktuelle Evapotranspiration: Die aktuelle Evapotranspiration, die aktuelle Transpiration und die aktuelle Evaporation werden nach der FAO Methode (FAO 1998, siehe Kapitel 2.4.1) berechnet. Die aktuelle Evapotranspiration wird als Summe während des landwirtschaftlichen Jahres (Saat bis Saat der nachfolgenden Hauptfrucht) in mm angegeben.

aktuelle Transpiration: Transpiration tritt nur während der Vegetationsperiode der Kultur auf. Sie wird zwar formal als Summe des landwirtschaftlichen Jahrs in mm berechnet, stellt aber praktisch die Summe von Saat bis Ernte dar. Sie ist in der aktuellen Evapotranspiration enthalten.

aktuelle Evaporation: Sie wird als Summe des landwirtschaftlichen Jahrs in mm angegeben. Während des Wachstums der Kultur ist sie im Vergleich zur Transpiration eher gering. Sie tritt vor allem nach der Ernte der Hauptfrucht auf, wenn der Boden wenig bedeckt ist. Sie ist in der aktuellen Evapotranspiration enthalten.

Oberflächenabfluss: Der Oberflächenabfluss geht als Verlustgröße in die Wasserbilanz ein. In DSSAT/CERES ist er von der Beschaffenheit der Bodenoberfläche (Textur, Hangneigung und Bodenbearbeitung) abhängig. Im ebenen Untersuchungsgebiet Marchfeld spielt er meist eine untergeordnete Rolle, und tritt meist nur bei Starkniederschlägen auf. Die Interzeptionsverluste werden von DSSAT/CERES nicht ausgegeben. Der Oberflächenabfluss wird als Summe während des landwirtschaftlichen Jahres in mm angegeben.

Drainage: Als Drainage wird in dieser Arbeit die Tiefenperkolation aus dem Bodenprofil in den darunter liegenden Schotterkörper bezeichnet (Grundwasserspende). Drainage aus den simulierten Böden (Bodenklasse 1-4: 100 cm; Bodenklasse 5: 150 cm) tritt meist nur im Winter/Frühjahr und nach Starkniederschlägen auf. Die Drainage wird als Summe während des landwirtschaftlichen Jahres in mm angegeben.

Wassernutzungseffizienz der Pflanze: Die Wassernutzungseffizienz (water use efficiency - WUE) wird je nach Fragestellung auf unterschiedliche Art berechnet. Die Wassernutzungseffizienz der Pflanze (water use efficiency of the plant - WUEP) ist der Quotient aus Ertrag und Transpiration (während des Wachstums der Kulturpflanzen). Die WUEP ist geeignet, um die

Reaktionen der Kulturpflanze auf Veränderungen des Wasserhaushalts, z.B. durch eine Klimaänderung, zu beschreiben. Sie wird in $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ angegeben.

Wassernutzungseffizienz des Bestands: Die WUEF (water use efficiency on field level) ist der Quotient aus Ertrag und Evapotranspiration (während des landwirtschaftlichen Jahres). Die WUEF ist geeignet um Fragestellungen nach dem Wasserhaushalt von Ackernutzungssystemen zu beantworten. Sie wird in $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ angegeben.

Wassernutzungseffizienz nach Ehlers: Die Berechnung der WUE nach Ehlers beinhaltet die Summanden der Wasserbilanz:

$$WUE_{Ehlers} = \frac{\frac{Y}{T}}{1 + \frac{E+A+D}{T}}$$

Y ... Ertrag in kg ha^{-1}
 T ... Transpiration in mm ha^{-1}
 E ... Evaporation in mm ha^{-1}
 A ... Oberflächenabfluss in mm ha^{-1}
 D ... Drainage in mm ha^{-1}

Sie ist ähnlich wie die WUEF zu verwenden, aber gibt den Wasserhaushalt genauer wieder. Sie wird in $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ angegeben. Sie bezieht sich ebenfalls auf die Summe der Wasserverluste während des landwirtschaftlichen Jahrs. (Definition nach Ehlers 1996)

Transpirationskoeffizient: Er ist der Kehrwert der WUEP in l kg^{-1} . Er dient der Bestimmung des Wasserverbrauchs der Kulturpflanzen und kann mit Angaben in der Literatur (siehe Tabelle 2.3) verglichen werden.

Trockenstressfaktor des Wachstums (WFPG): Wird von DSSAT/CERES auf täglicher Basis nach folgender Formel berechnet.

$$WFPG = \frac{\sum W_S D_S \Delta L}{1,5 T_{pot}}$$

W_S ... potentielle Wasseraufnahme der Wurzeln pro Einheit Wurzellängendichte in der Bodenschicht S in $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-1}$
 D_S ... Wurzellängendichte in der Bodenschicht S in cm cm^{-3}
 ΔL ... Mächtigkeit der Bodenschicht in cm
 T_{pot} ... potentielle Transpiration in mm ha^{-1}

Der Trockenstressfaktor stellt somit das Missverhältnis zwischen aktueller und potentieller Transpiration dar. WFPG wird von DSSAT/CERES von von null bis eins ausgegeben, wobei null keine Beeinträchtigung der Photosynthese bedeutet, und eins zur Einstellung der Photosynthese im Modell führt. Die täglichen Werte wurden über die Vegetationsperiode der Kultur aufsummiert. (Definition nach Hoogenboom et al.)

Trockenstressfaktor der Photosynthese (WFPD): Wird sehr ähnlich wie WFPG berechnet und auch zwischen null und eins ausgegeben. Nur die Konstante ist geändert, um den Faktor an die Photosynthese anzupassen. Die Photosynthese reagiert dabei etwas weniger sensibel auf Trockenstress als das Wachstum.

potentielle Evapotranspiration: Sie wird nach der FAO-Methode (FAO 1998, siehe Kapitel 2.4.1) berechnet. Sie wird als Summe des Kalenderjahrs (nicht des landwirtschaftlichen Jahres) in mm angegeben. Es ist daher nur ihr langjähriges Mittel mit der aktuellen Transpiration vergleichbar.

Verhältnis der aktuellen und potentiellen Evapotranspiration: Es wird als Quotient zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration gebildet. Es ist ein einfacher Kennwert für die Aridität einer Region.

Die relativen Änderungen der Kornerträge wurden zusätzlich grafisch mit Hilfe der Software Arc-Map 9.2 dargestellt. Hierfür wurden die Ergebnisse der Simulation den Bodenklassen als Eigenschaften zugeordnet, und als Karte der Region Marchfeld abgebildet.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ergebnisse und Diskussion der bodenphysikalischen Untersuchungen

5.1.1 Korngrößenverteilung

Der Tschernosem aus Löss am Standort Raasdorf entstand aus äolischer Sedimentation über Donauschottern und -sanden. Die Körnungslinie (Abbildung 5.1) zeigt die Zusammensetzung des Lösshorizonts. Im Löss dominiert die Schlufffraktion, da diese vom Wind weit verfrachtet werden konnte. Der Oberboden (siehe Kurve aus 10 cm Tiefe) ist ein lehmiger Schluff bis schluffiger Lehm. Der Tonanteil beträgt 22,6 Massenprozent, der Schluff macht 55,4 Massenprozent und der Sand 22,0 Massenprozent aus. Im Profil lässt sich bis etwa 40 cm Tiefe ein durchmischter Pflughorizont erkennen.

Die Bodenprobe aus 50 cm Tiefe stammt aus dem AC-Horizont. Der Boden in diesem Bereich ist ein schluffiger Lehm und etwas schwerer als der Oberboden. Der Tonanteil beträgt hier 27,6 Massenprozent, der Schluff macht 58,0 Massenprozent und der Sand 14,4 Massenprozent aus. Diese Unterschiede ergeben sich vermutlich aus der geringeren Durchmischung dieses Bodenhorizonts.

Der Boden am Versuchsstandort ist sehr heterogen. An manchen Stellen befinden sich bereits ab etwa 60 cm Tiefe Sande und Schotter. Die Textur ist an diesen "Schotterinseln" wesentlich leichter als an der Entnahmestelle der Proben.

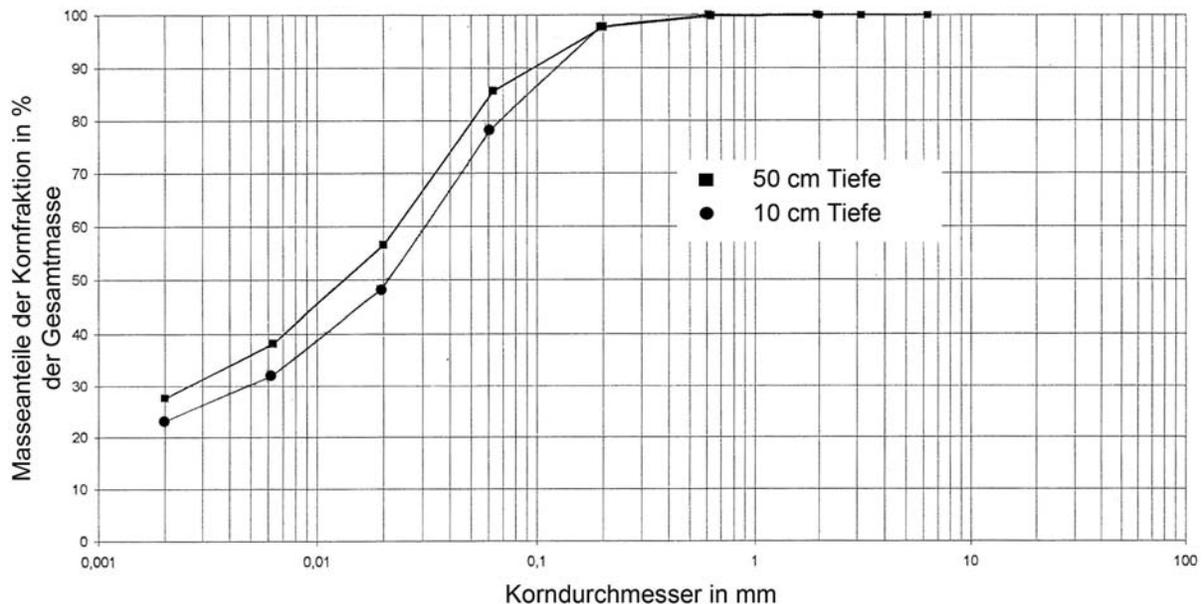


Abbildung 5.1: Körnungslinien am Standort Raasdorf im Ober- und Unterboden

5.1.2 Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung (pF-Kurve)

Die Abbildungen 5.2 und 5.3 und die Tabelle 5.1 zeigen pF-Kurven bzw. pF-Punkte für den Standort Raasdorf, die an Hand von Bodenproben (siehe Kapitel 3.1) während des Feldversuchs von 2002 bis 2004 bestimmt wurden. Der Verlauf der Kurven ist charakteristisch für einen Lössboden. Der Verlauf der Kurven gibt Auskunft über das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven sind Folge der unterschiedlichen Verdichtung der Böden. Die pF-Kurve aus dem Pflughorizont zeigt eine andere Charakteristik als die des minimal bodenbearbeiteten Oberbodens. Das Gesamtporenvolumen wird durch das Pflügen erhöht, was sich in den höheren Sättigungspunkten zeigt. Bei steigender Wasserspannung drängt der gepflügte Boden aber wesentlich stärker. Bereits vor Erreichen der Feldkapazität (pF 1,8-2,5) weist er niedrigere Wassergehalte auf als der natürlich gelagerte Boden. Der Verlauf der Kurven nähert sich dann bis zum Erreichen des permanenten Welkepunkts wieder etwas an. Die Messungen aus 2002 und 2003 ergaben annähernd gleiche permanente Welkepunkte für beide Varianten. Die stärkere Drainage und die Annäherung von FK und PWP im gepflügten Boden bedeuten eine geringere nutzbare Feldkapazität (siehe Tabelle 5.1). Der Oberboden, der von den meisten Kulturpflanzen am stärksten durchwurzelt wird, hat eine schlechtere Wasserversorgung. Die Lockerung durch den Pflug ist durch Absetzung des Bodens reversibel. Die pF-Kurve aus dem Pflughorizont nähert sich daher der natürlichen pF-Kurve im Laufe der Zeit wieder an.

Im Unterboden verlaufen die pF-Kurven annähernd gleich. Der Einfluss des Pflugs reicht nicht bis in diese Tiefe. Die stärkere Verdichtung des Unterbodens zeigt sich am, im Vergleich zum Oberboden, niedrigeren Sättigungspunkt und der erhöhten Feldkapazität.

Tabelle 5.1: Kennwerte des Bodenwasserhaushalts und nutzbare Feldkapazität in Volumsprozent am Standort Raasdorf

Tiefe (in cm)	10-15		20-25		50-55	
	Pflug	Mini	Pflug	Mini	Pflug	Mini
Sättigung	52,4	47,6	52,8	48,0	45,2	46,0
FK (pF 1,8)	30,5	33,8	30,3	33,4	38,3	38,3
FK (pF 2,5)	21,6	24,6	20,6	23,3	28,0	28,7
PWP	11,9	13,4	15,6	16,8	15,4	14,5
nFK (pF 4,2-1,8)	18,6	20,4	14,7	16,6	22,9	23,8

5.2 Ergebnisse und Diskussion des Feldversuchs in Raasdorf

5.2.1 Der Witterungsverlauf während der Versuchsjahre

Tabelle 5.2 und Abbildung 5.4 zeigen den Verlauf von Temperatur und Niederschlägen während der Feldmessungen am Standort Raasdorf im Marchfeld. Im Jahr 2002 kommt es, nach bereits sehr warmen Bedingungen Anfang März, bis Anfang April zu mehreren Kälteeinbrüchen mit Nachtfrost. Ab dann erfolgt bis Anfang Mai eine zügige Erwärmung. Der April bringt mit 58 mm reichlich Niederschläge. Die Monate Mai und Juni fallen warm aus, trotz einer trockeneren Phase im Mai sind auch die Niederschläge in diesen Monaten ausreichend. Der Wetterbedingungen waren demnach zur Zeit des Schoßens und der Blüte günstig. Das Getreidejahr 2002 war insgesamt warm und ausreichend feucht, die Erträge fielen gut aus.

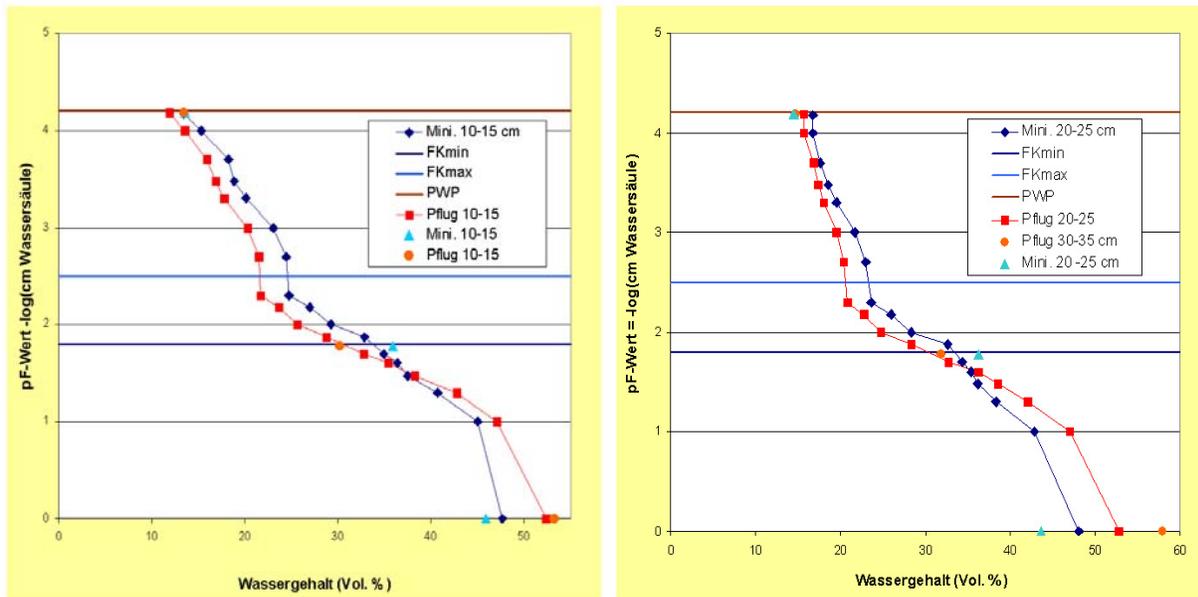


Abbildung 5.2: Druckpotential-Wasseranteilsbeziehung am Standort Raasdorf im Oberboden (links: aus 10-15 cm Tiefe, pF-Kurven aus 2004, pF-Punkte aus 2003; rechts: aus 20-25 cm Tiefe pF-Kurven aus 2004, pF-Punkte: Mini. 20-25 aus 2003, Pflug 30-35 cm aus 2002)

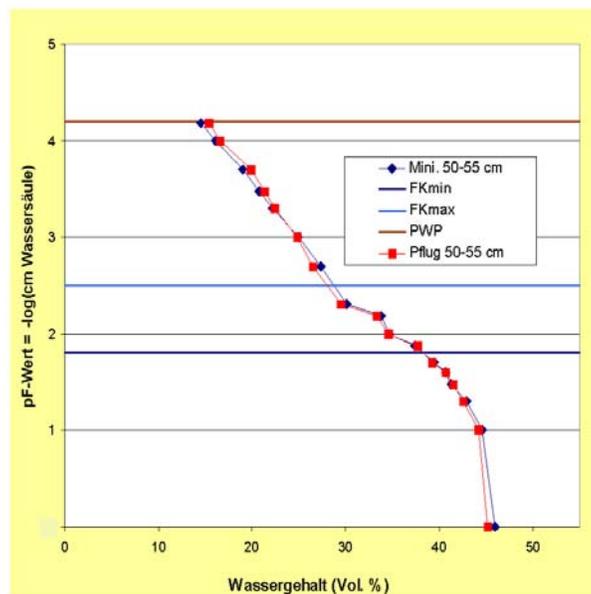


Abbildung 5.3: Druckpotential-Wasseranteilsbeziehung am Standort Raasdorf im Unterboden (50 - 55 cm Tiefe, pF-Kurven aus 2004)

Im Jahr 2003 kam es Anfang April, ähnlich wie im Vorjahr, zu den letzten Nachfrösten. Ab dann erfolgte eine sehr rasche und starke Erwärmung, bereits Anfang Mai kam es zu den ersten heißen Tagen mit Maximumtemperaturen knapp unter 30°C. Mitte Mai brachte eine Kaltfront die letzten nennenswerten Niederschläge (14,3 mm am 13. Mai) nach einem bereits sehr trockenen April.

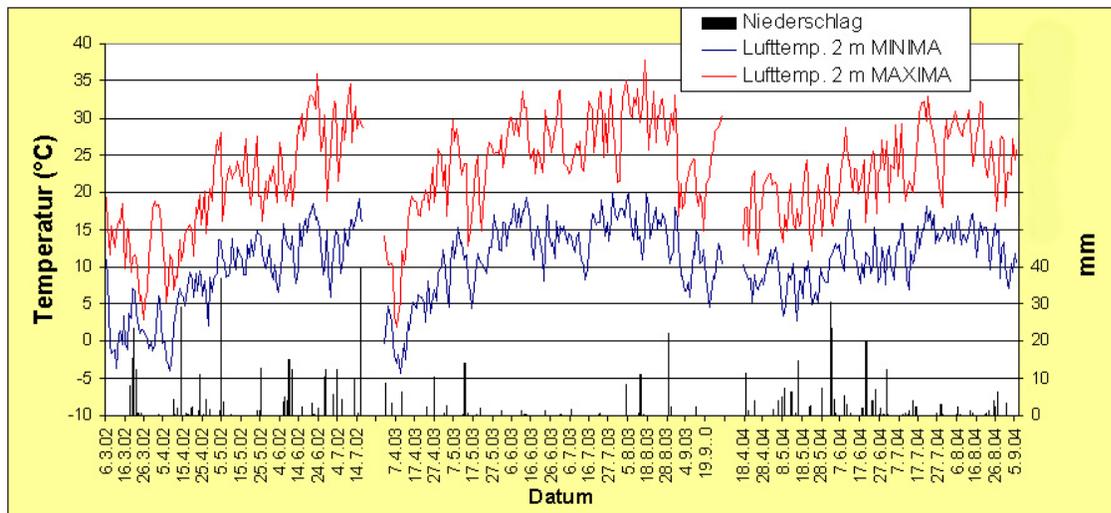


Abbildung 5.4: Temperatur (Tagesminima und -maxima) und Niederschläge (tägliche Summen) von Frühjahr bis Sommer 2002, 2003 und 2004 am Versuchsstandort Raasdorf

Tabelle 5.2: Monatsmittelwerte der Temperatur und Monatssummen der Niederschläge während der Wachstumsperiode von Getreide am Standort Raasdorf

Datum	Nis.	Temp.	Datum	Nis.	Temp.	Datum	Nis.	Temp.
April 02	58	9,6	April 03	31	9,6			
Mai 02	57	17,0	Mai 03	21	17,2	Mai 04	51	13,4
Juni 02	70	19,6	Juni 03	5	21,5	Juni 04	109	17,0
			Juli 03	3	20,9	Juli 04	25	19,6

Es folgte eine 82-tägige (!) Trockenphase fast ohne Niederschläge (im Juni nur 5 und im Juli nur 3 mm) während eines heißen Juni und Juli. Die sehr trockenen und heißen Bedingungen während Blüte und Kornfüllung führten 2003 zu starkem Trockenstress und einer Missernte bei Getreide.

2004 brachte ein warmes Frühjahr mit frühem Wachstumsbeginn und reichlichen Niederschlägen. Der Frühling blieb kühl und sehr feucht, im Mai fielen 51 mm und im Juni 109 mm Niederschlag. Erst im Juli wurde es trockener, was eine zügige Abtrocknung und Ernte erlaubte. Die Bedingungen für das Wachstum der Getreidebestände waren somit günstig. 2004 brachte in Ostösterreich sehr gute, überdurchschnittliche Erträge.

5.2.2 Die volumetrischen Wassergehalte im Ackerboden

Die Abbildungen 5.5, 5.6 und 5.7 zeigen den Verlauf der Bodenwassergehalte am Standort Raasdorf in verschiedenen Tiefen. Im Jahr 2002 und 2003 wurde unter Winterweizen gemessen, im Jahr 2004 unter Sommergerste. Der Verlauf der Kurven zeigt deutlich den Wasserentzug der Pflanzenwurzeln während der Vegetationsperiode. Der Oberboden ist am stärksten durchwurzelt, hier findet auch die stärkste Entnahme von Bodenwasser durch die Pflanzen statt. Die Evaporation spielt im Vergleich zur Transpiration vom Frühjahr bis zur Abreife des Getreidebestands eine geringere Rolle, trägt aber auch zur Abtrocknung an der Bodenoberfläche bei. Die Bodenwassergehalte in Abbildung 5.7 zeigen, dass die Abtrocknung zur Tiefe hin abnimmt. In 10 und 20 cm Tiefe wird die Feldkapazität unterschritten, in 30 cm Tiefe bleiben die Bodenwassergehalte über der Feldka-

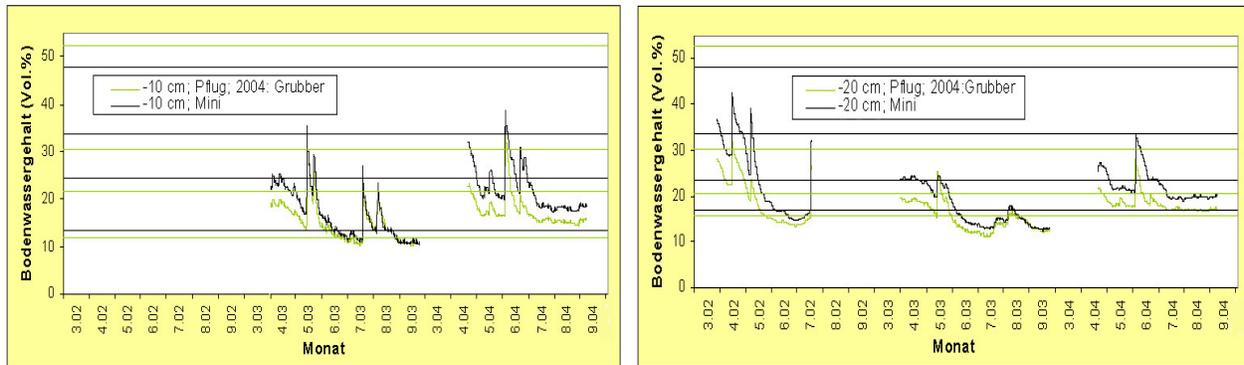


Abbildung 5.5: Bodenwassergehalte im Oberboden unter Winterweizen/Vorfrucht Mais (2002 & 2003) bzw. unter Sommergerste nach Zwischenfrucht (2004); Vergleich der minimal bodenbearbeiteten Variante mit der gepflügten Variante (2002 & 2003) bzw. der gegrubberten Variante (2004); horizontale schwarze Linien (minimal bodenbearbeitete Variante) und grüne Linien (gepflügte Variante) von oben nach unten: Sättigung; obere Grenze der Feldkapazität bei pF 1,8; untere Grenze der Feldkapazität bei pF 2,5; permanenter Welkepunkt (links: Werte für 10-15 cm Tiefe; rechts: Werte für 20-25 cm Tiefe)

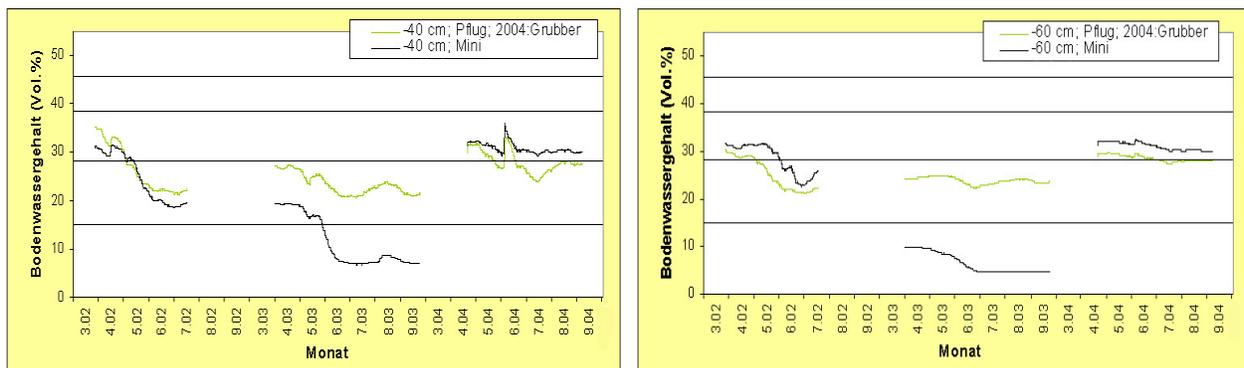


Abbildung 5.6: Bodenwassergehalte im Unterboden unter Winterweizen/Vorfrucht Mais (2002 & 2003) bzw. unter Sommergerste nach Zwischenfrucht (2004); Vergleich der minimal bodenbearbeiteten Variante mit der gepflügten Variante (2002 & 2003) bzw. der gegrubberten Variante (2004); horizontale schwarze Linien von oben nach unten: Sättigung; obere Grenze der Feldkapazität bei pF 1,8; untere Grenze der Feldkapazität bei pF 2,5; permanenter Welkepunkt (alle pF-Werte für den Unterboden sind Mittelwerte für beide Varianten)

pazität. Im Unterboden nimmt die Abtrocknung weiter ab. Dies wird am geringeren Absinken der Bodenwassergehalte in 60 cm Tiefe deutlich. Die Wurzeln dringen auch später in den Unterboden ein, das Absinken der Wassergehalte findet in größerer Tiefe zeitverzögert statt.

Niederschlagsereignisse führen zu einer kurzfristigen Wiederauffüllung des Bodenwasservorrats. Bei stärkeren Niederschlagsereignissen, wie z.B. Gewittern, kommt es zur Bildung einer Befeuchtungsfront, die durch die Makroporen und durch präferentiellen Fluss (z.B. Regenwurmgänge) in den Boden infiltriert. Dabei bleibt Wasser in den seichteren Bodenschichten zurück. Die Front wird daher zur Tiefe hin immer schwächer, und erreicht den Schotterkörper während der Vegetationsperiode meist nicht. Zu einem Durchdringen des Niederschlagswassers bis zum Schotterhorizont und damit zu einer Grundwasserspense kommt es meist nur im Winter und im zeitigen Frühjahr z.B. nach der Schneeschmelze. An Stellen mit einem seichteren Bodenprofil und sandigem Boden (Schotterinseln) kann es auch während der Vegetationsperiode zu Drainage kommen.

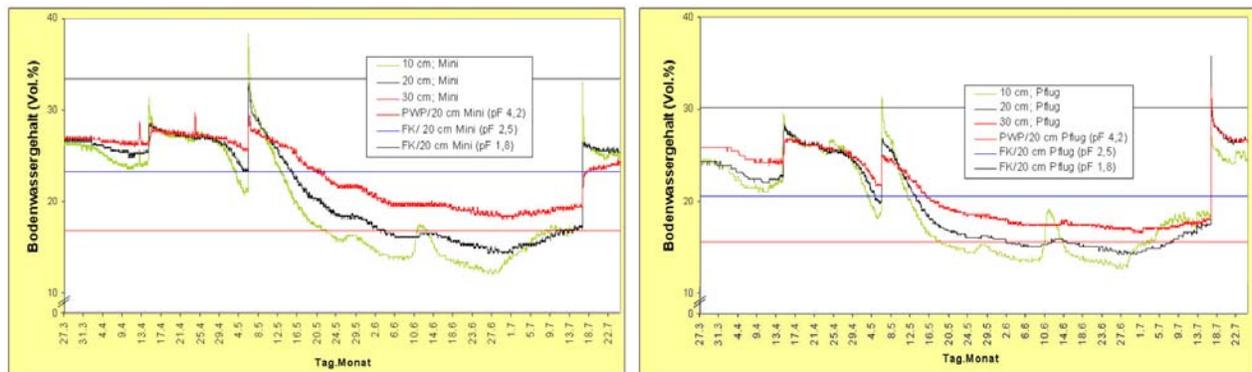


Abbildung 5.7: Bodenwassergehalte (C-Probe Methode) im Oberboden unter Winterweizen/Vf. Mais im Jahr 2002; Vergleich der minimal bodenbearbeiteten Variante (links) mit der gepflügten Variante (rechts) (nach Wagentristl 2002)

Trockene Phasen während der Vegetationsperiode führen zu einer Umkehr des Bodenwasserstroms nach oben, und zu einem kapillaren Aufstieg aus tieferen Bodenschichten entlang des Potentialgradienten.

Im Jahr 2002 beginnt die Abtrocknung etwa bei Feldkapazität. Bis etwa Anfang Mai stand den Pflanzen für das vegetative Wachstum im Oberboden ausreichend Wasser zur Verfügung. Ab diesem Zeitpunkt beginnt, bei höheren Temperaturen und geringen Niederschlägen, eine deutliche Abtrocknung im Oberboden. Die Bodenwassergehalte im Oberboden erreichen den permanenten Welkepunkt. Die Pflanzen sind daher gezwungen, sich aus dem Unterboden mit Wasser zu versorgen. Im Unterboden (siehe Abbildung 5.6) beginnt der Wasserentzug durch die Pflanzenwurzeln daher, je nach Variante, etwa Anfang bis Mitte Mai. Da durch den Bestand noch Wasserreserven aus dem Unterboden genutzt werden konnten, litten die Pflanzen nur während dem Ende der vegetativen Phase und der generativen Phase unter mildem Trockenstress. Die Erträge in diesem Jahr fielen durchschnittlich aus (siehe Tabelle 8.1 im Anhang).

Im Jahr 2003 wurde der Bodenwasserspeicher im Winter aufgrund geringer Niederschläge nicht aufgefüllt. Die Abtrocknung begann in diesem Jahr von einem niedrigeren Ausgangspunkt. Die Niederschläge waren nicht ausreichend, um den Boden nachhaltig zu befeuchten. Der permanente Welkepunkt wurde im Oberboden etwa zur Zeit der Blüte erreicht, und im Verlauf des Juni unterschritten. Auch dem Unterboden konnten die Pflanzen wenig Wasser entziehen. Der Bestand litt daher während der empfindlichen Phase der Blüte und Kornfüllung unter starkem Trockenstress, was zu niedrigen Erträgen führte (siehe Tabelle 8.1 im Anhang).

Die Witterung am Standort Raasdorf war im Jahr 2004 günstig für den Getreidebau. Die reichlichen Niederschläge führten durchgehend zu ausreichender Bodenfeuchte im Oberboden. Der permanente Welkepunkt wurde in diesem Jahr nicht erreicht. Für die generative Entwicklung stand der Sommergerste aufgrund der feuchten Witterung im Juni ein großer Bodenwasservorrat zur Verfügung. Die Niederschläge Anfang Juni drangen bis zu einer Tiefe von 60 cm ein. Im Unterboden kam es zu einer relativ geringen Abtrocknung. Möglicherweise war der Wasserentzug durch die Pflanzenwurzeln in dieser Tiefe gering, da die Pflanzen sich aus dem Oberboden ausreichend mit Wasser versorgen konnten. Das Jahr 2004 brachte für Sommergerste und andere Getreidearten überdurchschnittliche Erträge (siehe Tabelle 8.1 im Anhang).

Die Wassergehaltskurve im Unterboden der Mini.-Variante im Jahr 2003 zeigt den Einfluss der Textur auf den Bodenwassergehalt. Hier waren die Sensoren ab 40 cm in einem sandigen Unterboden

über einer Schotterinsel installiert. Der hohe Anteil an wasserleitenden Grobporen und das relativ geringe Volumen an speicherfähigen Fein- und Mittelporen führten zu einem starken Absinken des Bodenwassergehalts. Die Ursachen sind eine starke Drainage, Entnahmen durch die Wurzeln und auch horizontaler Wassertransport zum umliegenden feinkörnigeren Boden.

5.2.3 Die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen bearbeitetem und unbearbeitetem Ackerboden

Der Verlauf der Bodenwassergehalte der gepflügten bzw. gegrubberten Variante und der minimal bodenbearbeiteten Variante weisen deutliche Unterschiede auf. Besonders im Frühjahr zeigt sich die höhere Feldkapazität des nicht bearbeiteten Bodens in höheren Ausgangswassergehalten im Oberboden (siehe Abbildungen 5.5, 5.7 und 5.8). Die Mini.-Variante weist in jedem Jahr auch während der Vegetationsperiode höhere Wassergehalte auf als der Pflug- bzw. Grubberhorizont. Die Ursache ist der höhere Anteil an Fein- und Mittelporen im ungestörten Boden. Diese Poren halten Wasser gegen die Schwerkraft. Im Oberboden befindet sich auch der Großteil der Wurzelmasse von Getreidearten. Die Pflanzen sind daher in der Mini.-Variante besser mit Wasser versorgt.

Der größere Makroporenanteil des gepflügten/gegrubberten Bodens führt meist zu einer besseren Infiltrierbarkeit. Dies zeigt sich an Hand des meist stärkeren Ausschlagens der Bodenwassergehalte in der Mini.Variante. Bei starken Niederschlägen reichert sich das Wasser in der Mini.-Variante stärker an im Oberboden an. Die C-Probe Messungen im Jahr 2002 zeigen aber, dass das Regenwasser stellenweise auch in der Mini.-Variante gut infiltrieren kann (siehe Abbildungen 5.7 und 5.8).

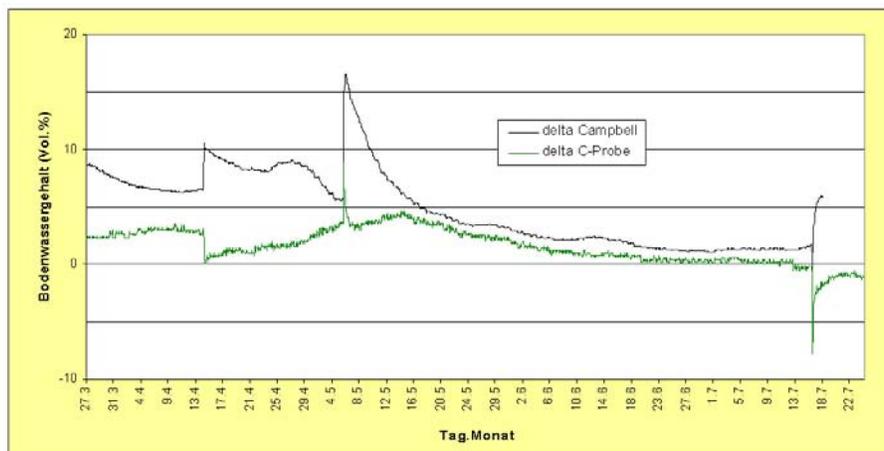


Abbildung 5.8: Differenz der Bodenwassergehalte in 20 cm Tiefe zwischen minimal bodenbearbeiteter und gepflügter Variante ($\theta_{Mini} - \theta_{Pflug}$) im Jahr 2002; Messung mit C-Probe und Campbell Sensoren

Der gepflügte/gegrubberte Horizont dränt im Oberboden meist rascher, es kann aber zu Staunässe über der Pflugsohle kommen. Im Jahr 2002 lag der Wassergehalt in der Pflugsohle in einer Tiefe von 40 cm in der gepflügten Variante über dem der Mini.-Variante (siehe Abbildung 5.6). Die Messung unter der gegrubberten Variante im Jahr 2004 zeigt aber, dass Pflugsohlen sich wieder rückbilden können bzw. nicht überall vorhanden sind.

Tabelle 5.3: Das durchschnittliche pflanzenverfügbare Bodenwasser im Wurzelraum während der Wachstumsperiode von Winterweizen (2002 und 2003) und Sommergerste (2004) und dessen relative Zunahme durch Minimalbodenbearbeitung

Monat	Mini	Pflug	%
April 02	113	87	30
Mai 02	101	63	60
Juni 02	61	44	39
April 03	59	47	26
Mai 03	66	59	12
Juni 03	52	51	1
Mai 04	53	39	36
Juni 04	102	75	36

Die Schwerkraft und vor allem stärkere Niederschläge führen zu einem langsamen Absetzen des gelockerten Pflug- oder Grubberhorizonts. Es kommt zu einer allmählichen Angleichung der Wassergehaltskurven im Oberboden, die Differenz der Bodenwassergehalte nimmt ab (siehe Abbildung 5.8). Der bearbeitete Boden kehrt zu seiner natürlichen Lagerungsdichte zurück.

Auch im Unterboden, der nicht direkt von der Pflugarbeit beeinflusst wird, kann es in den Varianten zu unterschiedlichen Bodenwassergehalten kommen. Wenn den Pflanzen im trockeneren Pflughorizont nicht ausreichend Wasser zur Verfügung steht, durchwurzeln sie den Unterboden intensiver und entziehen diesen Horizonten mehr Wasser. Sichtbar wird das im Jahr 2004 in 40 cm Tiefe und im Jahr 2002 in 60 cm Tiefe (siehe Abbildung 5.6). Die Abtrocknung im Unterboden beginnt unter diesen Umständen auch früher.

Starke Unterschiede der Bodenwassergehalte wie im Unterboden im Jahr 2003 sind auf die Textur und weniger auf die Bodenbearbeitung zurück zu führen. In diesem Jahr wurde der Bodenwassergehalt unter Minimalbodenbearbeitung in einem besonders sandigen Unterboden gemessen. (Ergebnisse und Analyse der anderen meteorologischen Parameter siehe Rischbeck 2004)

5.2.4 Das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Wurzelraum

Abbildung 5.9 zeigt die geschätzte Zunahme der Durchwurzelungstiefe während der Wachstumsperiode der Getreidepflanzen. Die Ausweitung des Wurzelraums hilft den Pflanzen, die im Laufe des Frühlings meist auftretende Abtrocknung des Bodens zu kompensieren. Wenn der Wassergehalt im Oberboden durch die Entnahme der Pflanzen und die Evaporation abnimmt, können die Pflanzen auf die Reserven im Unterboden zurück greifen. Sommergerste beginnt dabei später mit dem Wurzelwachstum, entwickelt das Wurzelsystem aber rascher.

Das Jahr 2002 (siehe Abbildung 5.9 und Tabelle 5.3) entspricht weitgehend einem durchschnittlichen Jahr am Standort Raasdorf. Im März/April steht noch ausreichend Feuchtigkeit zu Verfügung. Im Laufe der Monate Mai und Juni trocknet der Boden ab. Den Pflanzen steht in ihrem Wurzelraum immer weniger Wasser zur Verfügung.

Im Jahr 2003 kommt es praktisch während der ganzen Wachstumsperiode zu einer mangelhaften Wasserversorgung des Bestands. Die Durchwurzelung erschließt zwar den Unterboden, aber auch im Unterboden befindet sich nur wenig pflanzenverfügbares Wasser.

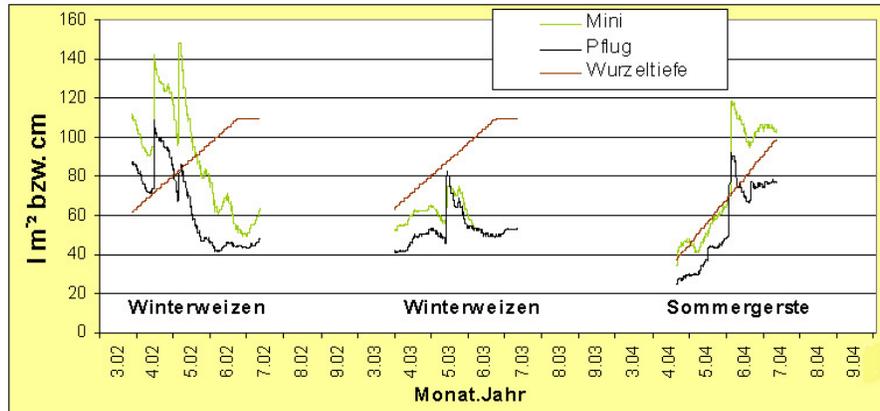


Abbildung 5.9: Das pflanzenverfügbare Wasser im Wurzelraum am Standort Raasdorf bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Anm.: für das Jahr 2003 wurden für den Unterboden der Mini-Variante die Bodenwassergehalte der Pflugvariante herangezogen, um Verzerrungen durch die Textur zu vermeiden)

Das Jahr 2004 ist während der Wachstumsperiode der Sommergerste durchgehend feucht. Im April zeigen sich im Vergleich mit dem Winterweizen im Jahr 2002 wesentlich niedrigere pflanzenverfügbare Wassermengen. Das liegt an der späteren Entwicklung des Wurzelsystems durch die Sommergerste. Später kommt es zu stark zunehmenden Werten des pflanzenverfügbaren Bodenwassers. Die Zunahme ist bei relativ gleichmäßig hohen Wassergehalten im Boden auf die Ausweitung des Wurzelraums zurück zu führen.

Die Varianten der Bodenbearbeitung weisen deutliche Unterschiede in der Wasserversorgung auf. Außer im Trockenjahr 2003 liegen die Werte in der Mini.-Variante durchgehend höher als in der gepflügten (2002) bzw. der gegrubberten (2004) Variante. Die Angleichung der Werte im Juni 2003 liegt am Unterschreiten der permanenten Welkepunkte im Oberboden, und an der Verwendung gleicher Bodenwassergehalte für die Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers im Unterboden.

Im Oberboden findet durch das Absetzen des Pflug/Grubberhorizonts eine Angleichung der Bodenwassergehalte statt. Das pflanzenverfügbare Bodenwasser zeigt in den Jahren 2002 und 2004 aber durchgehend hohe Abstände bis zur Abreife. Das liegt an der früheren und rascheren Erschöpfung der Bodenwasservorräte im Unterboden der gepflügten/gegrubberten Variante. Vermittelt über den Wasserkonsum des Bestandes, hat die Bodenbearbeitung demnach auch indirekten Einfluss auf Bodenhorizonte, die gar nicht mechanisch verändert werden.

Die Unterschiede des pflanzenverfügbaren Bodenwassers in den Varianten liegen in den feuchteren Jahren absolut und relativ höher als im Trockenjahr. Die höhere nutzbare Feldkapazität der Mini.-Variante kann nur bei ausreichenden Niederschlägen aufgefüllt werden. In trockenen Jahren ist aber die Bedeutung des Bodenwassers als limitierender Faktor des Pflanzenwachstums größer. Auch geringe Unterschiede in der Wasserversorgung können bereits ertragswirksam werden (siehe Abbildung 5.11).

5.2.5 Die Erträge der Feldfrüchte

Die jährliche Variabilität der Erträge aus dem Feldversuch am Standort Raasdorf wird in den Abbildungen 5.10 und 5.11 bzw. der Tabelle 8.1 (im Anhang) dargestellt. Sie ist vor allem auf die Variabilität des Wetters in einzelnen Jahren zurück zu führen. Das trockene und heiße Getreide-

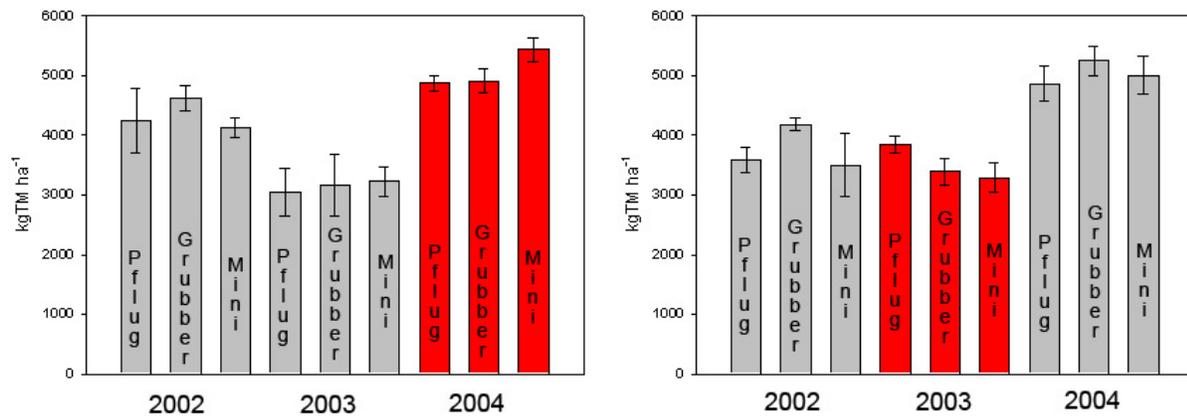


Abbildung 5.10: Kornerträge (Trockenmasse) von Winterweizen nach Mais (links) und nach Getreide (rechts) bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung; rot markierte Erträge weisen signifikante Unterschiede aufgrund der Bodenbearbeitung auf

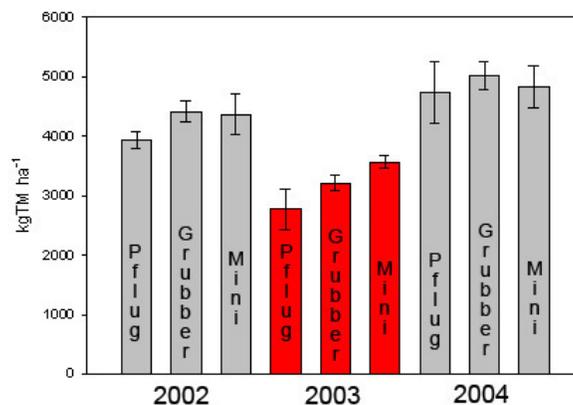


Abbildung 5.11: Kornerträge (Trockenmasse) von Sommergerste nach Zwischenfrucht bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung; rot markierte Erträge weisen signifikante Unterschiede aufgrund der Bodenbearbeitung auf

Jahr 2003 führte zu geringen Trockenmassekornerträgen um $3,3 \text{ t ha}^{-1}$ bei Winterweizen und um $3,2 \text{ t ha}^{-1}$ bei Sommergerste. Das klimatisch günstige Jahr 2004 brachte im Vergleich rund 5 t ha^{-1} Winterweizen und rund $4,8 \text{ t ha}^{-1}$ Sommergerste.

Die Grafiken machen deutlich, dass auch die Varianten der Bodenbearbeitung zu Schwankungen der Erträge führen. Die Varianzanalyse ergab bei jeder Fruchtfolge, in jeweils einem Jahr signifikante Ertragsunterschiede aufgrund der Bodenbearbeitung. Der Sommergersterversuch führte zum klarsten Ergebnis. Im Trockenjahr 2003 schneidet die reduzierte und vor allem die Minimalbodenbearbeitung signifikant besser ab als die Pflugvariante (siehe Tabelle 5.4). Der Verzicht auf die Bodenbearbeitung führt zu einer besseren Wasserversorgung der Pflanzen, und damit zu einer Stabilisierung des Ertrags. Auch der paarweise Vergleich der Varianten der Bodenbearbeitung mit dem t-Test zeigt ein ähnliches Bild (siehe Tabelle 5.4). 2003 führen die Varianten der reduzierten Bodenbearbeitung zu signifikant höheren Erträgen als die gepflügte Variante. In den feuchteren Jahren 2002 und 2004 liegen die Varianten näher zusammen, und es kommt zu keinen signifi-

Tabelle 5.4: Ergebnisse von einfaktorieller Varianzanalyse (inkl. F-Test) und zwei Stichproben t-Test (bei Annahme unterschiedlicher Varianzen) auf Unterschiede im Trockenmasseertrag aufgrund der Intensität der Bodenbearbeitung; * signifikant, n.s. nicht signifikant

	Winterweizen (nach Mais)	Winterweizen (nach Getreide)	Sommergerste (nach Zwischenfrucht)
2002			
ANOVA	n.s.	n.s.	n.s.
Pflug vs. Grubber	n.s.	*	*
Grubber vs. Direktsaat	*	n.s.	n.s.
Pflug vs. Direktsaat	n.s.	n.s.	n.s.
2003			
ANOVA	n.s.	*	*
Pflug vs. Grubber	n.s.	*	n.s.
Grubber vs. Direktsaat	n.s.	n.s.	*
Pflug vs. Direktsaat	n.s.	*	*
2004			
ANOVA	*	n.s.	n.s.
Pflug vs. Grubber	n.s.	n.s.	n.s.
Grubber vs. Direktsaat	*	n.s.	n.s.
Pflug vs. Direktsaat	*	n.s.	n.s.

kanten Unterschieden. Das Bodenwasser ist in diesen relativ feuchten Jahren weniger ausschlaggebend für den Ertrag. Dennoch schneidet auch in diesen Jahren die Pflugvariante gegenüber der reduzierten Bodenbearbeitung schlechter ab. Die reduzierte Bodenbearbeitung mit dem Grubber und die Minimalbodenbearbeitung sind demnach vor Sommergerste im Trockengebiet, und vermutlich auch vor anderen Sommergetreidearten, gut geeignet. Sie führen, bei guter landwirtschaftlicher Praxis, langfristig zu Mehrerträgen gegenüber der konventionellen Bodenbearbeitung.

Bei Winterweizen ist das Ergebnis weniger eindeutig. Der t-Test zeigt für das Jahr 2004 bei Vorfrucht Mais einen signifikant höheren Ertrag bei der Mini. Variante im Vergleich zur gegrubberten und gepflügten Variante. Im Jahr 2003 bei Vorfrucht Getreide kommt es zum gegenteiligen Ergebnis, die Pflugvariante bringt signifikant höhere Erträge als die gegrubberte und die Mini. Variante.

Winterweizen kann die Winterniederschläge besser nutzen als die Sommergerste, weil er nach dem Winter früher mit dem Wachstum beginnt. Da Blüte und Reife früher stattfinden als bei der Sommergerste, fallen sie in eine potentiell feuchtere und kühlere Jahreszeit. Winterweizen ist daher weniger von Trockenstress bedroht als Sommergerste oder Sommerweizen. Die höhere Wasserverfügbarkeit durch die Minimalbodenbearbeitung ist weniger für den Ertrag ausschlaggebend. Dennoch zeigt der Feldversuch, dass die Minimalbodenbearbeitung auch für die Bestellung von Winterweizen geeignet ist. Auch nach Vorfrucht Mais oder Getreide zeigte sich am Versuchsstandort bei Minimalbodenbearbeitung kein ertragsminderndes Auftreten von Krankheiten (*Fusarium*) oder stark erhöhter Unkrautdruck. Die Minimalbodenbearbeitung führte nach Vorfrucht Mais in zwei Jahren (2003 und 2004) zu den höchsten Erträgen. Nach Vorfrucht Getreide führte die reduzierte Bearbeitung mit dem Grubber in den Jahren 2002 und 2004 zu höheren Erträgen als das Pflügen. Bei Ersatz des Pflugs durch reduzierte bzw. Minimalbodenbearbeitung müssen also keine Mindererträge befürchtet werden, häufig führen sie bei Winterweizen sogar zu besseren Ergebnissen.

5.3 Ergebnisse und Diskussion der Pflanzenwachstumssimulation

5.3.1 Ergebnisse und Diskussion der Simulation für Winterweizen

Die Veränderung der Phänologie bei Winterweizen

Abbildung 5.12 zeigt den Einfluss der Klimaänderung auf die Phänologie des Winterweizens. Die Entwicklung des Winterweizens – einer Kulturpflanze mit determiniertem Wachstum – wird beschleunigt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Stadien Blüte und Reife unter dem Einfluss der Klimaerwärmung früher auftreten werden. In Tabelle 5.5 werden die Ergebnisse numerisch zusammengefasst. Die Blüte des Winterweizens verschiebt sich von durchschnittlich 5. Juni auf 24. Mai (2050 HIGH) bis 1. Juni (2025 LOW). Die Reife verschiebt sich im Mittel von 9. Juli auf 24. Juni (2050 HIGH) bis 5. Juli (2025 LOW). Die vegetative Phase, einschließlich der Winterruhe, verkürzt sich bis 2050 um maximal 25 Tage (2050 HIGH). Die generative Phase verkürzt sich um maximal 3 Tage (2050 HIGH). Den Pflanzen steht dementsprechend weniger Zeit für Photosynthese und Assimilation zur Verfügung.

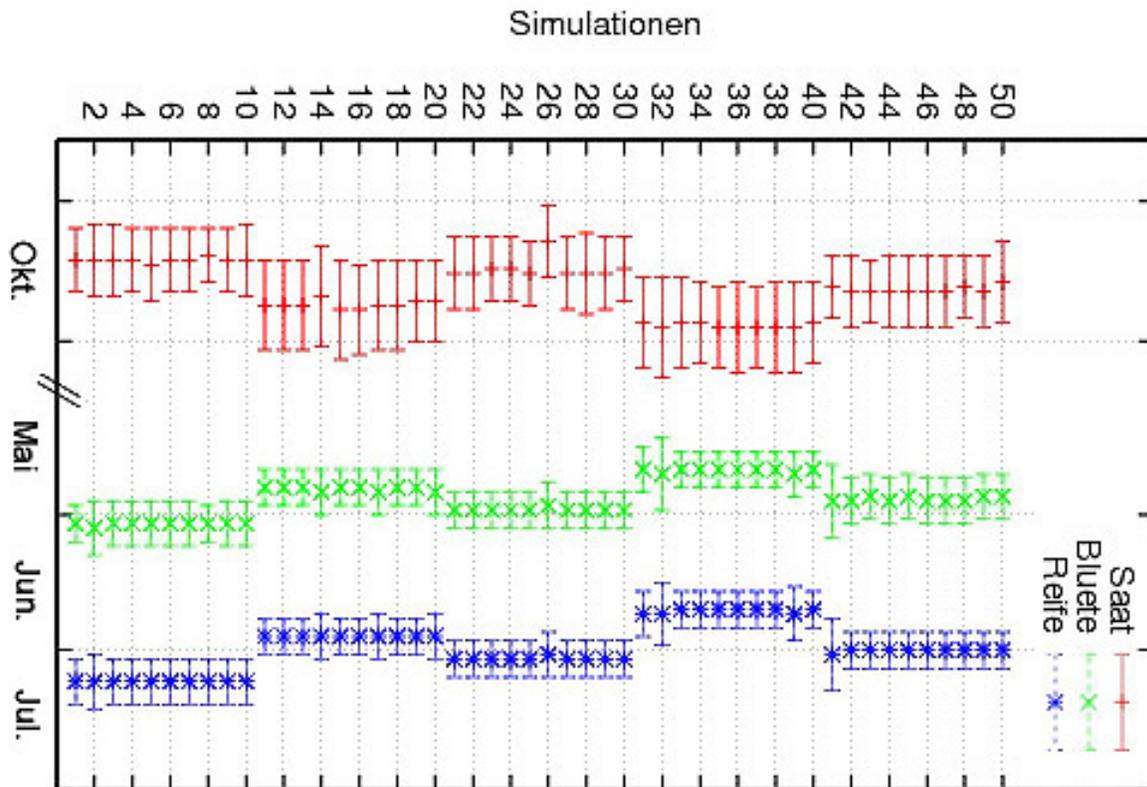


Abbildung 5.12: Die Veränderung der Zeitpunkte von Saat, Blüte und Reife bei Winterweizen unter dem Einfluss der Faktoren Klimawandel (HadCM3), Bodenklassen und Bodenbearbeitung

1-10: Referenz (1971-2005), 11-20: 2025/HIGH, 21-30: 2025/LOW, 31-40: 2050/HIGH, 41-50: 2050/LOW

1: BK1/Pflug, 2: BK1/Mini; 3: BK2/Pflug, 4: BK2/Mini; 5: BK3/Pflug,

6: BK3/Mini; 7: BK4/Pflug, 8: BK4/Mini; 9: BK5/Pflug, 10: BK5/Mini.

41: BK1/Pflug, 42: BK1/Mini; 43: BK2/Pflug, 44: BK2/Mini; 45: BK3/Pflug,

46: BK3/Mini; 47: BK4/Pflug, 48: BK4/Mini; 49: BK5/Pflug, 50: BK5/Mini

Die Simulationen der Faktoren Bodenklasse und Bodenbearbeitung zeigen kaum Einfluss auf die Phänologie. Das Modell berücksichtigt vor allem die Temperatursummen bei der Berechnung der

Tabelle 5.5: Die Veränderung der Phänologie von Winterweizen durch den Klimawandel (Mittelwerte aus allen Bodenklassen und Varianten der Bodenbearbeitung)

Szenario	Saat Tag	Saat Stabw. d	Blüte Tag	Blüte Stabw. d	Reife Tag	Reife Stabw. d	vegetativ inkl. Winterruhe d	generativ d	Wachstumsperiode inkl. Winterruhe d
1971-2005	14. Okt	7,8	5. Jun	5,1	9. Jul	5,4	234	34	268
2025 HIGH	23. Okt	10,5	28. Mai	4,6	29. Jun	4,5	217	32	249
2025 LOW	16. Okt	8,1	1. Jun	4,9	5. Jul	4,8	228	34	262
2050 HIGH	28. Okt	10,1	24. Mai	5,8	24. Jun	4,8	208	31	239
2050 LOW	20. Okt	8,2	30. Mai	5,5	2. Jul	5,1	222	33	255

phänologischen Phasen. Auf die Phänologie realer Pflanzen haben Wasser- und Nährstoffversorgung, vermittelt über die Bodeneigenschaften, beobachtbaren Einfluss. Auf trockenen und schlecht nährstoffversorgten Böden reift Winterweizen rascher ab, als auf landwirtschaftlich hochwertigen Böden. Dieses Phänomen ist vor allem in Trockenjahren gut zu beobachten. Die Beschleunigung des Wachstums durch Mangel, die physiologische Notreife, beschränkt sich aber auf eine wenige Tage frühere Totreife des Winterweizens. Sie spielt im Vergleich zu den Temperatursummen nur eine untergeordnete Rolle für die Phänologie.

Die Anpassung des Saattermins von Winterweizen an den Klimawandel

Abbildung 5.12 und Tabelle 5.5 zeigen auch die Berechnung des optimalen Saattermins durch CERES/DSSAT. Der Saattermin für Winterweizen soll so gewählt werden, dass die Pflanzen einerseits genug Zeit, Wärme und Feuchtigkeit vor dem Winter zum Keimen und für die beginnende Bestockung haben. Auf der anderen Seite sollen die Pflanzen sich auch nicht zu weit entwickeln, um nicht ihre Winterfestigkeit zu verlieren. Ein ausreichend warmer und feuchter Boden und eine gute Sätechnik ermöglichen ein rasches Auflaufen der Körner. Weiters soll bei der Saat, wie bei jeder Befahrung, darauf geachtet werden, Bodenverdichtungen durch das Befahren des feuchten Bodens zu vermeiden.

Im Zuge des Klimawandels verändern sich die Bedingungen bei der Herbstaussaat von Winterweizen. Boden und Luft bleiben im Durchschnitt der Jahre im Herbst länger warm. Die geringeren Niederschläge im Sommer und Frühherbst führen zu trockeneren Bodenverhältnissen. Eine Anpassung des Saattermins durch die Bäuerinnen und Bauern wird notwendig.

Die Simulation ermittelt im Herbst eine Verschiebung des durchschnittlichen Saattermins um höchstens 14 Tage von 14. Oktober auf 28. Oktober (2050 HIGH). Im Herbst muss Winterweizen später gesät werden, sonst würden sich die Pflanzen vor dem Winter zu weit entwickeln, und anfällig für Frost werden. Die LandwirtInnen müssen auch länger auf günstige Bodenfeuchte für den Aufgang warten. Die Zunahme der Streuung des Saattermins zeigt die zunehmenden Schwierigkeiten bei der Wahl des geeigneten Zeitpunkts.

Die Faktoren Bodenklasse und Bodenbearbeitung zeigen bei der Simulation einen gewissen Einfluss auf die Berechnung der Saattermine (siehe Abbildung 5.12). Die gepflügten Böden (Simulationen mit ungeraden Ordnungszahlen) können teilweise später bestellt werden, als die entsprechenden minimal bearbeiteten Böden (Simulationen mit geraden Ordnungszahlen). Auch in der Praxis spielen Textur und Bodenbearbeitung eine Rolle. Leichtere Ackerböden sind meist trockener und wärmer. Die Herbstsaat kann daher auf diesen Böden etwas später erfolgen als auf den schwereren Standorten.

Die Herbstpflugfurche führt zu einem Abtrocknen und zu einer Erwärmung des Oberbodens. Sie kann damit bei ohnehin meist trockenen Bedingungen im Herbst die Keimung erschweren.

Der Wasserhaushalt bei Winterweizen

Die Analyse des Wasserhaushalts im System Boden-Pflanze-Atmosphäre hat für das Marchfeld besondere Bedeutung, da das pflanzenverfügbare Bodenwasser den wesentlichen limitierenden Faktor für den Regenfeldbau in der Region darstellt.

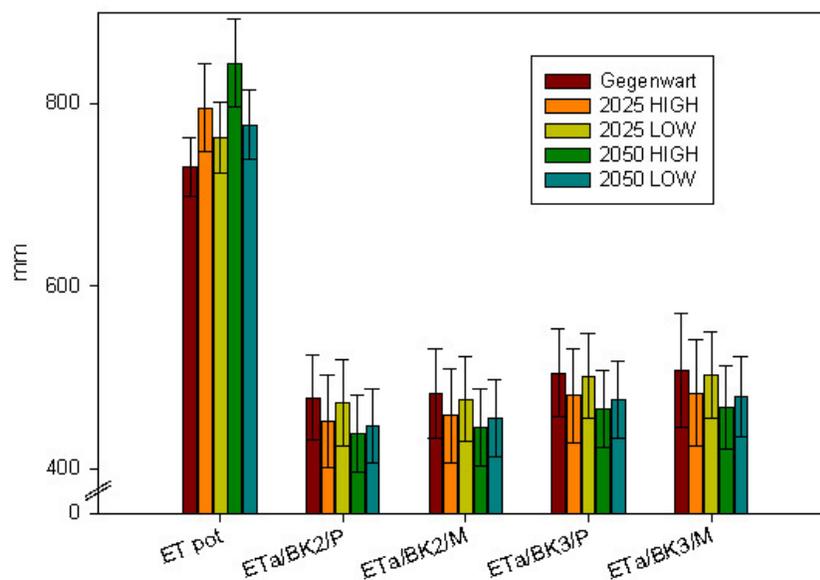


Abbildung 5.13: Gegenüberstellung von potentieller und aktueller Evapotranspiration bei Winterweizen

In der Abbildung 5.13 wird die potentielle Evapotranspiration E_{pot} der aktuellen Evapotranspiration E_{akt} gegenübergestellt. E_{pot} ist nur von den Klimabedingungen abhängig und kann daher mit allen Bodenklassen verglichen werden. Unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) macht E_{akt} (Bodenklasse 2) 65% von E_{pot} aus. Die Klimabedingungen der Region Marchfeld können daher als semi-arid bezeichnet werden.

Der Klimawandel führt zu Verschiebungen von E_{pot} und E_{akt} . Aufgrund der Erhöhung der Lufttemperaturen und der damit verbundenen Steigerung des Sättigungsdefizits der Luft kommt es zu einer Zunahme der potentiellen Evapotranspiration. Im extremsten Szenario 2050 HIGH (HadCM3) erhöht sich E_{pot} um rund 16% von gegenwärtig 730 mm a^{-1} auf 844 mm a^{-1} . Die Standardabweichung von E_{pot} verändert sich kaum, was aber aufgrund der fehlenden Änderung der

Klimavariabilität in der Modellierung wahrscheinlich eine Unterschätzung darstellt. Im selben Zeitraum verringert sich E_{akt} (Bodenklasse 2) von gegenwärtig 478 mm a^{-1} auf 438 mm a^{-1} . Die Ursache dafür liegt vor allem in der Abnahme der Niederschläge während der warmen Jahreszeit. Das aus Boden und Pflanzen für die Verdunstung zur Verfügung stehende Wasser geht zurück. Die Zunahme der Niederschläge während der kalten Jahreszeit kann das nicht kompensieren, da im Winter und Frühjahr nur ein geringer Teil der jährlichen Verdunstung anfällt. Das Verhältnis von E_{akt} (Bodenklasse 2) zu E_{pot} verengt sich im Szenario 2050 HIGH auf 60%. Die Bedingungen werden demnach arider. Die Zunahme der Aridität fällt – je nach Szenario – unterschiedlich stark aus.

Die sandige und seichtgründige Bodenklasse 2 unterscheidet sich von der schluffigen und tiefgründigen Bodenklasse 3 hinsichtlich E_{akt} . Beide Böden erhalten die gleiche Menge an Niederschlägen und sind den gleichen atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt. Die höhere nutzbare Feldkapazität der Bodenklasse 3 führt aber zu geringerer Drainage und höheren Wassergehalten im Oberboden. Bodenklasse 3 gibt daher mehr Wasserdampf an die Atmosphäre ab, die aktuelle Evapotranspiration dieses Bodens liegt höher als bei Bodenklasse 2.

Die Simulation ergibt kaum Unterschiede von E_{akt} für die Varianten der Bodenbearbeitung. Das Modell scheint hier den Einfluss der Bodenbearbeitung zu unterschätzen. Aufgrund der Ergebnisse der Feldversuche kann mit einem Einfluss der Bodenbearbeitung auf E_{akt} gerechnet werden. Die erhöhte Wasserverfügbarkeit im minimal bearbeiteten Oberboden, kann zu einer Erhöhung der Transpiration und auch der Evaporation führen. Die Mulchschicht kann, je nach Dichte, die Evaporation unterdrücken.

Detaillierte Auskunft über den Bodenwasserhaushalt geben die Abbildungen 5.14 und 5.15, die die Verlustgrößen aus der Wasserbilanzgleichung zeigen.

Die Bodenklassen haben klaren Einfluss auf die Bewegung des Bodenwassers. Die Drainage aus den geringwertigen landwirtschaftlichen Bodenklassen 1 und 2 führt zu einer Grundwasserspende und stellt einen hohen unproduktiven Wasserverlust dar. In den tiefgründigeren Böden (Klasse 3-5) sind die Verluste durch die Drainage gering. Die fallenden Niederschläge werden überwiegend wieder verdunstet. Da es vor allem während der kalten Jahreszeit trotzdem zu einer Drainage aus diesen Böden kommt, findet keine Versalzung statt.

Der Oberflächenabfluss ist in jeder Bodenklasse marginal. Das liegt an dem ebenen Relief im Marchfeld. Die Wassererosion stellt daher in dieser Region keine Gefahr dar.

Die Evaporation hat in allen Bodenklassen den mit Abstand größten Anteil an der Wasserbilanz. Die Evaporation findet vor allem nach der Ernte des Winterweizens statt. Weil nach der Hauptfrucht keine Zwischenfrüchte simuliert werden, und der Anbau der nachfolgenden Hauptfrucht erst im Oktober stattfindet, liegen die Äcker rund 3 Monate brach. Die während dieser Zeit auftretende Abtrocknung des Bodens bedeutet einen unproduktiven Wasserverlust. Die Evaporation variiert nur leicht zwischen den Bodenklassen. Relativ zu den anderen Fraktionen der Wasserbilanz fällt die Evaporation auf den besseren landwirtschaftlichen Böden etwas geringer aus. Besser entwickelte Pflanzenbestände führen auf diesen Böden zu einer Unterdrückung der Evaporation. Die Evaporation der Brache nach der Ernte liegt hingegen auf feuchteren Böden höher.

Die Transpiration der Kultur Winterweizen nimmt mit der Qualität der landwirtschaftlichen Böden eindeutig zu. Sie steigert sich (Simulation: 1971-2005/Pflug) von 18% in Bodenklasse 1 auf 38% der Wasserbilanz in Bodenklasse 3. Die Steigerung der nutzbaren Feldkapazität bis zu einer Höhe von etwa 140 mm hat demnach unter den Niederschlags- und Klimabedingungen im Marchfeld Einfluss auf die Transpiration. Eine weitere Steigerung der nutzbaren Feldkapazität kann vom Winterweizenbestand nicht mehr in eine Erhöhung der Transpiration umgesetzt werden.

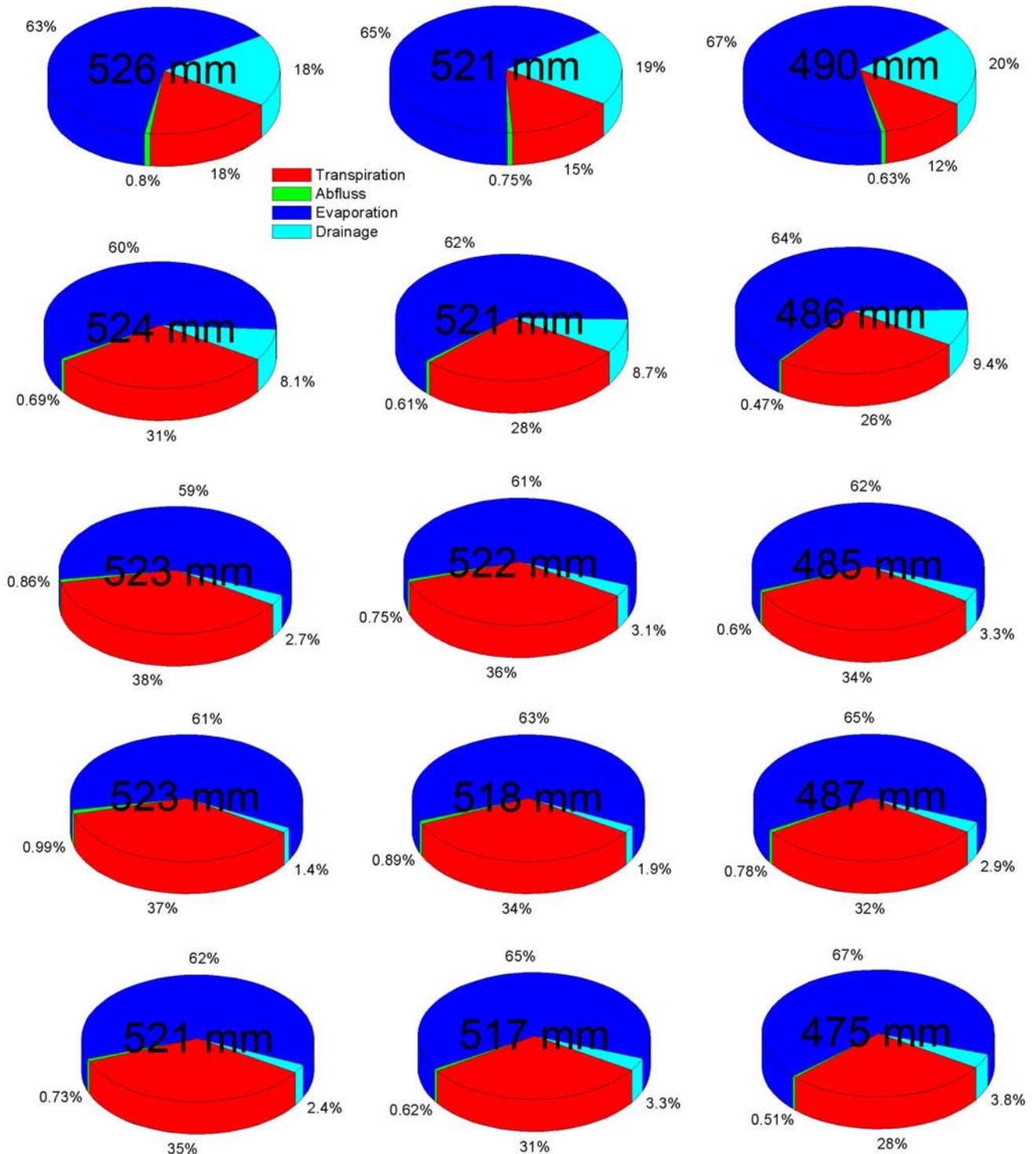


Abbildung 5.14: Jährliche (Summe von Saat bis zur nächsten Saat) relative Wasserbilanzen für Winterweizenbestand bei Herbstpflugfurche (Zeile 1-5: Bodenklassen 1-5; Spalte 1-3: 1971-2005, 2025 LOW, 2050 HIGH)

Der Verzicht auf den Pflug führt zu einer Verringerung der unproduktiven Wasserverluste aus dem Boden. Vor allem in den schlechteren Bodenklassen wird die Drainage durch die Minimalboden-

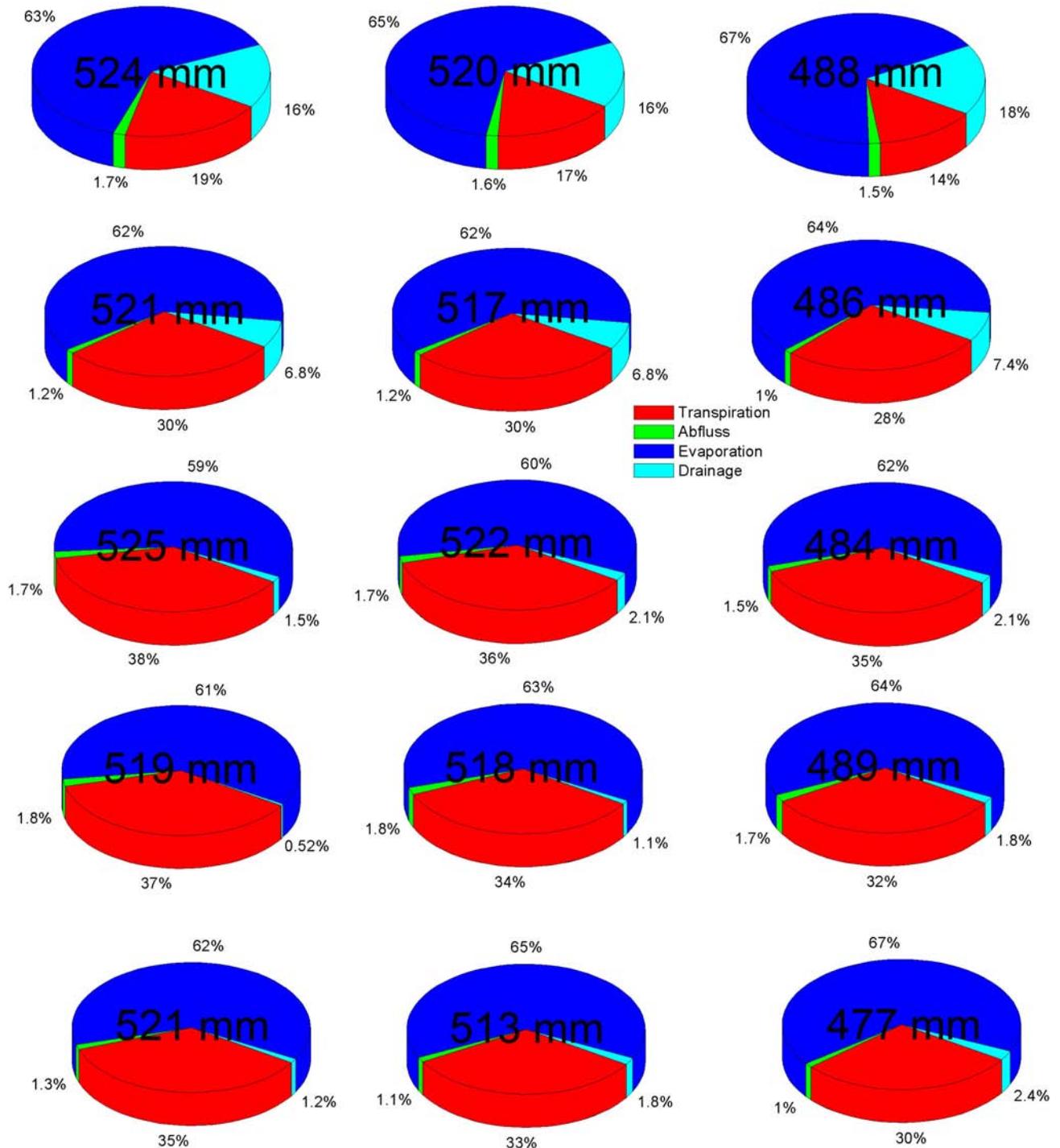


Abbildung 5.15: Jährliche (Summe von Saat bis zur nächsten Saat) relative Wasserbilanzen für Winterweizenbestand bei Minimalbodenbearbeitung (Zeile 1-5: Bodenklassen 1-5; Spalte 1-3: 1971-2005, 2025 LOW, 2025 HIGH)

bearbeitung deutlich reduziert. Die veränderte Porengrößenverteilung und die damit verbundene bessere Absorption von Niederschlägen im Oberboden führt zu einem geringeren Eindringen der

Befeuchtungsfront. Mehr Wasser wird vom Boden gegen die Schwerkraft gehalten, weniger geht aus dem Bodenprofil verloren. Die Wasserspeicherfähigkeit des gesamten Profils wird erhöht (siehe Messungen des Bodenwassergehalts in Kapitel 5.2.2).

Viele Simulationen zeigen bei Minimalbodenbearbeitung auch eine leichte Zunahme der Transpiration. Der Bestand ist in der Lage die höheren Bodenwassergehalte im Oberboden zu nutzen. Die Evaporation kann bei höherem Wassergehalt des Oberbodens ebenfalls zunehmen, solange sie nicht durch eine bessere Bestandesentwicklung oder Mulchschicht unterdrückt wird. Evaporation und Transpiration speisen sich im Wesentlichen aus der selben Quelle: dem frei verfügbaren Wasser im Boden, das nicht versickert. Aufgabe der Kulturführung ist es die unproduktive Evaporation möglichst zu Gunsten der produktiven Transpiration zu unterdrücken. Mulchen und der Verzicht auf die Grundbodenbearbeitung kann dazu einen Beitrag leisten.

Die Simulation zeigt eine leichte Zunahme des Oberflächenabflusses bei Minimalbodenbearbeitung. Dies weist auf eine geringere Regenverdaulichkeit und Infiltration des dichteren, ungepflügten Bodens hin. Hofmann (2005) ermittelte im Gegensatz dazu in Feldversuchen bei Minimalbodenbearbeitung eine Verringerung der Wassererosion in Hanglagen in nördlichen Weinviertel. Sie führte dies auf Eigenschaften der Mulchschicht zurück, die in der Lage sei, die Fließgeschwindigkeit des Wassers herab zu setzen, die Infiltration zu verbessern und den Boden zu befestigen.

Bei Betrachtung der Folgen des Klimawandels zeigt sich wie bei der aktuellen Evapotranspiration (siehe Abbildung 5.13) die Abnahme der Bilanzsumme durch den Rückgang der Niederschläge. Der Klimawandel führt aber auch zu relativen Verschiebungen der Wasserbilanz. Die Drainageverluste nehmen in Folge der ansteigenden Niederschläge während der kalten Jahreszeit zu. Im Sommer und Herbst ist aufgrund der trockeneren Verhältnisse eher mit einer Abnahme der Drainage zu rechnen, die aber kaum ins Gewicht fällt. Der Oberflächenabfluss, der vor allem bei Starkniederschlägen (z.B. Gewitter im Sommer) auftritt, nimmt etwas ab. Dies ist vermutlich eine Folge der simulierten besseren Regenverdaulichkeit des trockeneren Bodens. Ehlers (1992) ermittelte bei einem Gewitterniederschlag von 18,1 mm auf einem trockenen, gepflügten Boden einen Oberflächenabfluss von 6,3% der Regenmenge. Auf demselben, aber bereits befeuchteten, Boden kam es 6 Tage später bei einem Gewitterniederschlag von 16,5 mm zu einem Oberflächenabfluss von 14,7%. Bei Festbodenmulchwirtschaft mit Zinkenrotor und 50% bis 70% Haferstroh an der Bodenoberfläche reduzierte sich der Oberflächenabfluss auf 0,5% (Boden trocken) bzw. 0,6% (Boden feucht).

Das Verhältnis zwischen Evaporation und Transpiration verschiebt sich in Folge des Klimawandels zugunsten der Evaporation. Die frühere Abreife des Winterweizens und die spätere Saat bedeuten eine längere Brachezeit. Die Wachstumsperiode des Winterweizenbestands wird verkürzt. Zusammen mit der Erwärmung in Spätsommer und Herbst führt das zu einer relativen Zunahme der Evaporation. Ein weiterer Faktor, der in die Simulation der Transpiration durch CERES/DSSAT eingeht und im Zuge des Klimawandels eine Rolle spielt, ist die CO₂-Düngung der Pflanzen. Sie ermöglicht einen sparsameren Wasserkonsum des Getreides und damit gleichfalls eine Abnahme der Transpiration.

Der Trockenstress, dem die Pflanzen während ihres Wachstums ausgesetzt sind, nimmt mit zunehmender nutzbarer Feldkapazität ab. Dies zeigt der Vergleich der Werte der verschiedenen Bodenklassen in Tabelle 5.6. Dabei spielen sowohl Textur als auch die Bodenmächtigkeit eine Rolle. Die Bodenklasse 5 weist eine leichtere Textur als die Bodenklassen 3 und 4 auf, dennoch liegt der simulierte Trockenstress in dieser Bodenklasse niedriger. Der Winterweizen ist offenbar in der Lage, vor dem Auftreten trockenerer Phasen tiefere Bodenschichten zu durchwurzeln und damit die größere Bodenmächtigkeit der Bodenklasse 5 (150 cm) für die Wasserversorgung zu nutzen. Der Trockenstressfaktor weist eine hohe Streuung auf. Der Grund dafür liegt vor allem in der Nieder-

Tabelle 5.6: Trockenstressfaktor für das Wachstum (WFGD) bei Winterweizen

	BK 1	BK 2	BK 3	BK 4	BK 5
Szenario	Pflug	Pflug	Pflug	Pflug	Pflug
1971-2005	25,3	15,2	10,8	7,0	1,4
St.abw.	8,7	9,3	10,1	9,1	3,4
2025 HIGH	22,3	15,1	11,7	6,3	0,7
St.abw.	10,2	10,3	10,7	8,6	2,1
2025 LOW	24,1	14,6	10,2	5,8	1,5
St.abw.	11,1	10,9	10,8	8,3	3,0
2050 HIGH	18,7	10,5	8,4	3,9	0,2
St.abw.	9,8	8,8	9,4	6,0	0,5
2050 LOW	22,6	12,4	8,0	3,2	0,4
St.abw.	11,1	9,8	9,6	6,5	1,2

schlagsvariabilität: neben trockenen Jahren mit starkem Trockenstress, treten feuchte Jahre auf, in denen es überhaupt nicht zu Wassermangel kommt.

Hinsichtlich des Klimawandels führt die Simulation des Trockenstressfaktors für Winterweizen zu einem überraschenden Ergebnis. Der Trockenstress bei Winterweizen nimmt in Folge der Klimaerwärmung ab! Die Abnahme erfolgt sogar am stärksten bei den Klimaszenarien mit hoher Klimasensitivität. Diese Abnahme ist vor allem Folge der früheren Abreife der Kultur. Die Pflanzen entgehen damit der im Sommer und Herbst zunehmenden Trockenheit und schließen ihre Entwicklung in einer potentiell feuchteren Jahreszeit ab. Eine Rolle spielen auch die im Winter zunehmenden Niederschläge. Der Bodenwasserspeicher wird im Winter regelmäßiger aufgefüllt, und kann im Frühling die Trockenheit besser abpuffern. Wie bei der Transpiration spielt auch beim Trockenstress die CO₂-Düngung eine Rolle. Der geringere Wasserbedarf der Pflanzen führt zu einem reduzierten Auftreten von Trockenstress.

Die in Abbildung 5.23 für die gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) gezeigten Transpirationskoeffizienten von Winterweizen bewegen sich im bzw. leicht über dem von Günther (2003) in Praxisversuchen ermittelten Bereich (308 - 321 l kg⁻¹). Die Bodenklasse 1 zeigt deutlich niedrigere Transpirationskoeffizienten als die nachfolgenden Bodenklassen. Auf leichten Böden mit schlechter Wasserversorgung sind die Pflanzen zu einem sparsameren Umgang mit der Ressource Wasser gezwungen. Die Transpirationskoeffizienten liegen daher niedriger.

Wie bei anderen relevanten Faktoren des Pflanzenwachstums (z.B. N-Versorgung) gilt auch für Wasser das Gesetz des abnehmenden Grenzertragsnutzens (beschrieben von Mitscherlich 1903; aus Krüger 1987). Zunehmende Wasserverfügbarkeit führt zu abnehmender Effizienz der Wassernutzung und immer geringeren Ertragszuwächsen. Wenn in feuchten Jahren oder durch Bewässerung kein Trockenstress auftritt, kann die Pflanze "Luxuskonsum" betreiben und die Spaltöffnungen offenhalten obwohl die CO₂-Versorgung bereits ausreichend ist.

Anders als die Transpirationskoeffizienten verhalten sich die Evapotranspirationskoeffizienten. Spengler (1988) ermittelte für Winterweizen auf einem leichten DecksandLöss über Kiessandbraunerde einen Evapotranspirationskoeffizienten (Evapotranspiration von Aufgang bis Ernte; bezogen auf die Gesamttrockenmasse!) von 427 l kg⁻¹, während er für Löss-Schwarzerde (ähnlich dem Marchfelder Tschernosem) 322 l kg⁻¹ berechnete. Nach Günther (2003) nimmt zwar die Evapotranspiration auf leichteren Böden ab, die Erträge gehen aber noch stärker zurück. Die Effizi-

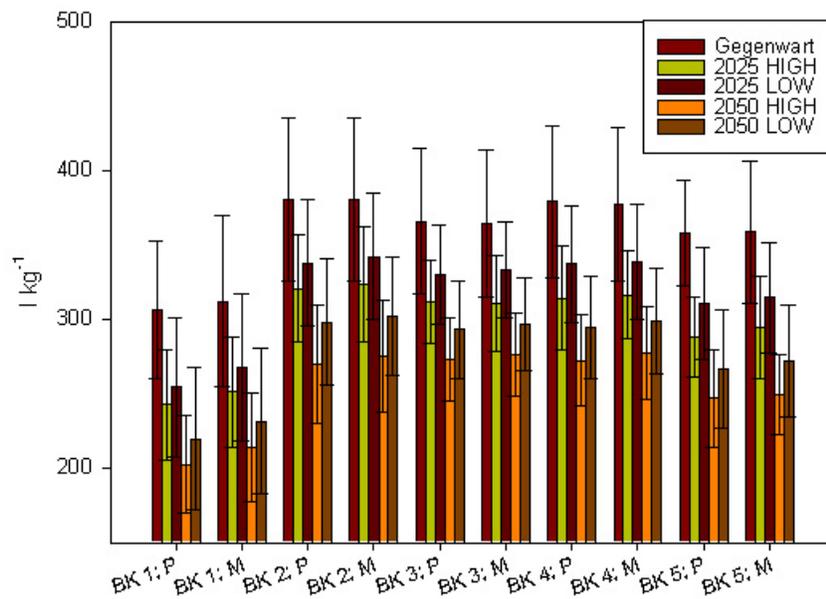


Abbildung 5.16: Simulierte Transpirationskoeffizienten von Winterweizen auf verschiedenen Bodenklassen (BK1-5) und bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (M: Minimalbodenbearbeitung; P:Herbstpflugfurche)

enz der Wassernutzung geht also auf Böden mit geringerer nutzbarer Feldkapazität zurück. Auf schlechten landwirtschaftlichen Böden kommt es aufgrund meist schütterer Bestände zu einer erhöhten Evaporation. Das Verhältnis zwischen produktiver Transpiration und unproduktiver Evaporation ist auf diesen Böden ungünstiger.

Die Simulationen zeigen für den gepflügtem Boden meist geringfügig niedrigere Transpirationskoeffizienten als bei Minimalbodenbearbeitung. In der Praxis könnten diese Unterschiede sogar noch größer sein. Der Effekt ist der Gleiche wie bei leichten Böden: die Pflanzen sind gezwungen, sparsamer mit dem Wasser umzugehen. Der Klimawandel führt zu einem eindeutigen Absinken der Transpirationskoeffizienten in allen Simulationen. Diese Effizienzsteigerung ist zu großen Teilen auf den Effekt der CO_2 -Düngung bei der Kulturpflanze Winterweizen zurück zu führen. Die Klimawirkung ohne Einfluss von CO_2 wird deutlich wenn die Ergebnisse der Simulationen mit hoher und niedriger Klimasensitivität verglichen werden (HIGH and LOW 2025: 438 ppm CO_2 ; HIGH and LOW 2050: 525 ppm CO_2). Hier zeigen die HIGH-Szenarien niedrigere Transpirationskoeffizienten als die etwas milderen LOW-Szenarien. Dies spricht für trockenere Bedingungen und einen sparsameren Umgang der Kulturpflanzen mit dem Wasser aus dem Boden. Dieses Ergebnis steht aber im Widerspruch zu den Ergebnissen des Trockenstressfaktors, der für die HIGH-Szenarien geringeren Trockenstress anzeigt als für die LOW-Szenarien. Hier erscheinen die Ergebnisse plausibler zu sein, die als trockenere Bedingungen für das Pflanzenwachstum bei einer extremeren Klimawärmung interpretiert werden können.

Die Veränderung des Ertragspotentials bei Winterweizen

Das Pflanzenwachstum ist sowohl vom Wetter bzw. Klima als auch von den Bodenverhältnissen abhängig. Der Boden determiniert über seine Speicherfähigkeit und Wassernachlieferung, wieviel

Tabelle 5.7: Einfluss der Faktoren Bodenklasse, Bodenbearbeitung und Klimaänderung (Szenario HadCM3) auf die mittleren simulierten Erträge bzw. Standardabweichungen (in kg ha⁻¹) von Winterweizen

Szenario	Bokla. 1		Bokla. 2		Bokla. 3		Bokla. 4		Bokla. 5	
	Pflug	Mini								
1971-2005	3037	3227	4303	4438	5370	5449	5066	5053	5092	5100
St.abw.	684	716	802	844	953	1095	890	986	676	687
2025 HIGH	2875	3119	4383	4506	5674	5729	5275	5457	5342	5400
St.abw.	754	743	796	953	975	1271	939	892	649	910
2025 LOW	3019	3218	4401	4534	5664	5715	5291	5304	5251	5325
St.abw.	774	767	961	1031	992	1001	989	1070	808	829
2050 HIGH	2911	3143	4736	4913	6071	6117	5674	5705	5430	5509
St.abw.	727	732	809	877	1066	1222	755	855	760	908
2050 LOW	3157	3351	4615	4825	5998	6046	5707	5749	5484	5538
St.abw.	721	703	801	872	953	1057	753	843	641	832

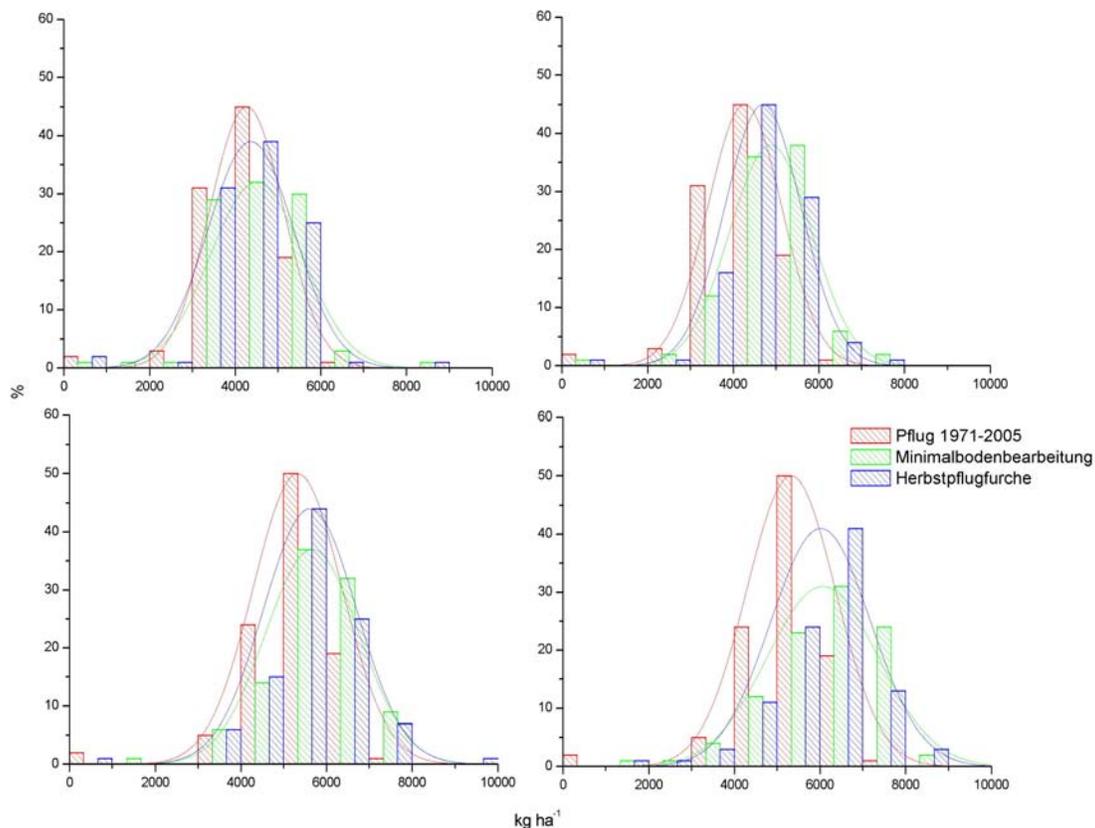


Abbildung 5.17: Histogramme und Normalverteilungen der Winterweizenerträge (TM) im Marchfeld; Zeile 1: Bodenklasse 2; Zeile 2: Bodenklasse 3; Spalte 1: Szenario 2025 LOW; Spalte 2: Szenario: 2025 HIGH

der gefallenen Niederschläge dem Bestand letztendlich aktuell zur Verfügung steht. Die Kationenaustauscherkapazität des Bodens ist entscheidend für die Nährstoffversorgung des Bestands.

Im Marchfeld herrschen aufgrund sowohl äolischer als auch fluviatiler Sedimentation meist sehr heterogene Bodenverhältnisse vor. Die Bedeutung der Bodenheterogenität lässt sich bereits in einzelnen Schlägen beobachten, in denen Tschernoseme oder Auböden von fluviatilen Sandablagerungen durchzogen werden. Die sandigen Streifen und Stellen führen im Vergleich zu den umliegenden Böden zu erkennbar schlechterem Pflanzenwachstum und Erträgen. Diese Bodenheterogenität wurde bei der Simulation durch die Bildung von Bodenklassen berücksichtigt. Die Ergebnisse der Erträge in Abbildung 5.18, 5.19 und Tabelle 5.10 zeigen einen deutlichen Einfluss der Bodenklassen auf die Erträge. Die sandigen und seichtgründigen Bodenklassen 1 und 2 führen gegenüber den tiefgründigeren schluffigen Tschernosemen, Auböden und Feuchtschwarzerden der Klassen 3 bis 5 zu Mindererträgen. Bei den schlechteren landwirtschaftlichen Böden im Marchfeld stellt die nutzbare Feldkapazität den limitierenden Faktor für das Pflanzenwachstum (von Winterweizen) dar. Auf diesen Böden kommt es aufgrund der geringen Wasserspeicherfähigkeit zu größeren Wasserverlusten durch Drainage. Sie enthalten einen geringeren Anteil an Mittelporen, die den Pflanzenwurzeln Wasser bereitstellen können. Die schütterten Bestände können auch zu einer erhöhten Evaporation aufgrund geringerer Beschattung der Bodenoberfläche führen. Die raschere Abtrocknung dieser Böden kann Trockenstress während der besonders empfindlichen Phasen der Blüte und Kornfüllung mit sich bringen.

Auf den besseren landwirtschaftlichen Böden geht die Bedeutung der nutzbaren Feldkapazität als limitierender Faktor der Erträge zurück. Die Steigerung der nFK von 140 - 220 mm (BK 3) auf >300 mm (BK 5) führt zu keiner Steigerung der Erträge mehr. Auch auf diesen Böden stellt Wasser einen wesentlichen limitierenden Faktor dar, die Bedeutung ergibt sich aber eher über die Menge der fallenden Niederschläge und die Niederschlagsvariabilität. Vereinfacht dargestellt wird die Vergrößerung des Speichervolumens nutzlos, wenn es nicht regelmäßig aufgefüllt wird.

Auf den besseren Böden gewinnen aber auch andere Faktoren an Bedeutung. Die leichten Mindererträge der Klassen 4 und 5 gegenüber der Klasse 3 können nicht auf die Wasserversorgung des Bestands zurück geführt werden. Auf diesen Böden wird die Nährstoffverfügbarkeit stärker ertragsbeeinflussend. Die Bodenklassen 4 und 5 weisen im Vergleich zu Klasse 3 niedrigere Humusgehalte auf. Humus setzt bei der Mineralisierung zusätzliche Nährstoffe frei und hat positive Eigenschaften als Ionenaustauscher. Die positiven Effekte des Humusgehalts auf die nutzbare Feldkapazität wurden bereits bei der Klassenbildung berücksichtigt.

Ob der Klimawandel zu einer Erhöhung der Ertragsvariabilität bei Winterweizen und damit zu einem größeren ökonomischen Risiko für die Bäuerinnen und Bauern der Region führt, kann an Hand der Simulationen nicht eindeutig geklärt werden. 26 von 40 der Simulationen, die den Klimawandel berücksichtigen, zeigen eine deutliche Steigerung der Standardabweichung gegenüber der Referenz. Auch die abgebildeten Histogramme und Normalverteilungen zeigen für die wirtschaftlich bedeutende Bodenklasse 3 eine Zunahme der Ertragsvariabilität bei voranschreitendem Klimawandel (siehe 5.17). Einige Simulationen ergeben aber auch sinkende (12) oder stagnierende (2) Standardabweichungen. Zu beachten ist dabei, dass die verwendeten Klimaszenarien eine mögliche Veränderung der Klimavariabilität nicht berücksichtigen. Verbesserte Szenarien könnten hier zu anderen Ergebnissen führen.

Die Ertragsvariabilität steht in Zusammenhang mit dem Ertragsniveau und damit auch mit der Bodenfruchtbarkeit. So zeigt sich mit zunehmender nutzbarer Feldkapazität von Bodenklasse 1 bis Bodenklasse 3 ein Ansteigen der Streuung der Erträge. Das höhere Ertragspotential der Bodenklasse 3 führt zu einer größeren Differenz der Durchschnittserträge mit den Erträgen schlechter Jahre (siehe Histogramm 5.17).

Der Verzicht auf den Pflug hat unter den Klima- und Bodenbedingungen im Marchfeld, ohne Berücksichtigung des Pflanzenschutzes, positiven bis indifferenten Einfluss auf den Ertrag von Winterweizen. Die wesentliche Ursache für die Ertragssteigerung liegt in der Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität. Die nutzbare Feldkapazität ist vor allem bei trockenen Boden- und Klimabedingungen der limitierende Faktor für das Wachstum der Kulturpflanzen. Davon leitet sich ab, dass der Ertrag vor allem unter solchen Umständen positiv auf die Minimalbodenbearbeitung reagiert. Unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) führt die Simulation bei Bodenklasse 1 zu einer Ertragssteigerung von 6,3%, auf Bodenklasse 2 um 3,1% und auf Bodenklasse 3 um 1,5%, auf Bodenklasse 4 und 5 stagnieren die Erträge. Aus pflanzenbaulicher Sicht ist die Minimalbodenbearbeitung also vor allem für die trockenen bis mäßig trockenen Standorte geeignet. Da aber die Minimalbodenbearbeitung auch auf besseren Böden im Marchfeld nicht zu Ertragsverlusten führt, ist sie aus ökonomischer Sicht aufgrund des kostensenkenden Potentials (soweit das ohne tiefergehende agrarökonomische Analyse festgestellt werden kann) vor Winterweizen für die gesamte Region geeignet.

Der Klimawandel führt zu einer weiteren Marginalisierung der schlechtesten landwirtschaftlichen Böden im Marchfeld. Vor allem die extremeren Klimaszenarien 2025 HIGH (-5,3%) und 2050 HIGH (-4,1%) führen bei Beibehaltung der Pflugwirtschaft zu Ertragsverlusten auf den Paratschernosen der Bodenklasse 1. Auf diesen Böden überwiegen die negativen Effekte der zunehmenden Aridität durch den Klimawandel.

Aber bereits auf der nur geringfügig speicherfähigeren Bodenklasse 2 überwiegen die positiven Effekte des Klimawandels in der Region, und es kommt zu klaren Ertragssteigerungen (2025 HIGH: 1,8 bis 2050 HIGH: +10,0%). Diese Tendenz gilt auch für alle anderen Bodenklassen. Zu den höchsten Ertragssteigerungen kommt es auf den besseren Bodenklassen 3 (2025 LOW: 5,4% bis 2050 HIGH: +13,0%) und 4 (2025 HIGH: 4,1% bis 2050 LOW: +12,7%) die in geringerem Ausmaß von zunehmender Aridität betroffen sind.

Allgemein wird die durch den Klimawandel verstärkte Aridität im Marchfeld abgepuffert durch eine beschleunigte Entwicklung und Abreife des Winterweizens in einer potentiell feuchteren und kühleren Jahreszeit. Der negative Effekt der verkürzten Wachstumsperiode des Winterweizens wird durch eine CO₂-Düngung überkompensiert. Der dominierende Einfluss des CO₂-Effekts wird klar wenn die HIGH und LOW Szenarien verglichen werden. Die reine Erwärmung und Verminderung der Niederschläge ohne CO₂-Zunahme hätte negative Auswirkungen auf den Ertrag.

Die Abbildungen 5.18 und 5.19 zeigen die flächenhafte Bedeutung der, mit Ausnahme der Bodenklasse 1, Ertragszuwächse durch die Veränderung von Klima und Atmosphäre. Da die Klassen 3 und 4 auch einen Großteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche ausmachen, fallen die relativ hohen Ertragszuwächse dieser Klassen stärker ins Gewicht.

Wie die Ertragskarten zeigen, führt auch die Minimalbodenbearbeitung (bei Festlegung der gegenwärtigen Praxis der Grundbodenbearbeitung und heutigen Klimabedingungen als Referenz) zu Ertragssteigerungen bei Berücksichtigung des Klimawandels. Im Gegensatz zu den gegenwärtigen Bedingungen führt die Minimalbodenbearbeitung bereits ab den 2025er Szenarien auch auf den Bodenklassen 4 und 5 zu Ertragssteigerung. Die zunehmende Aridität steigert demnach die Bedeutung der Minimalbodenbearbeitung und anderer Massnahmen zur besseren Wasserversor-

gung der Kulturen. Die schlechteren Böden auf denen die Ertragssteigerungen besonders deutlich sind, haben im Marchfeld nur geringen Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (Bodenklasse 1: 1,97%; Bodenklasse 2: 15,07%). Ähnlich wie die Bodeneigenschaften führt auch die Minimalbodenbearbeitung durch die Steigerung des Ertragspotentials zu einer meist deutlichen Steigerung der Ertragsvariabilität bei Winterweizen siehe Abbildung 5.17.

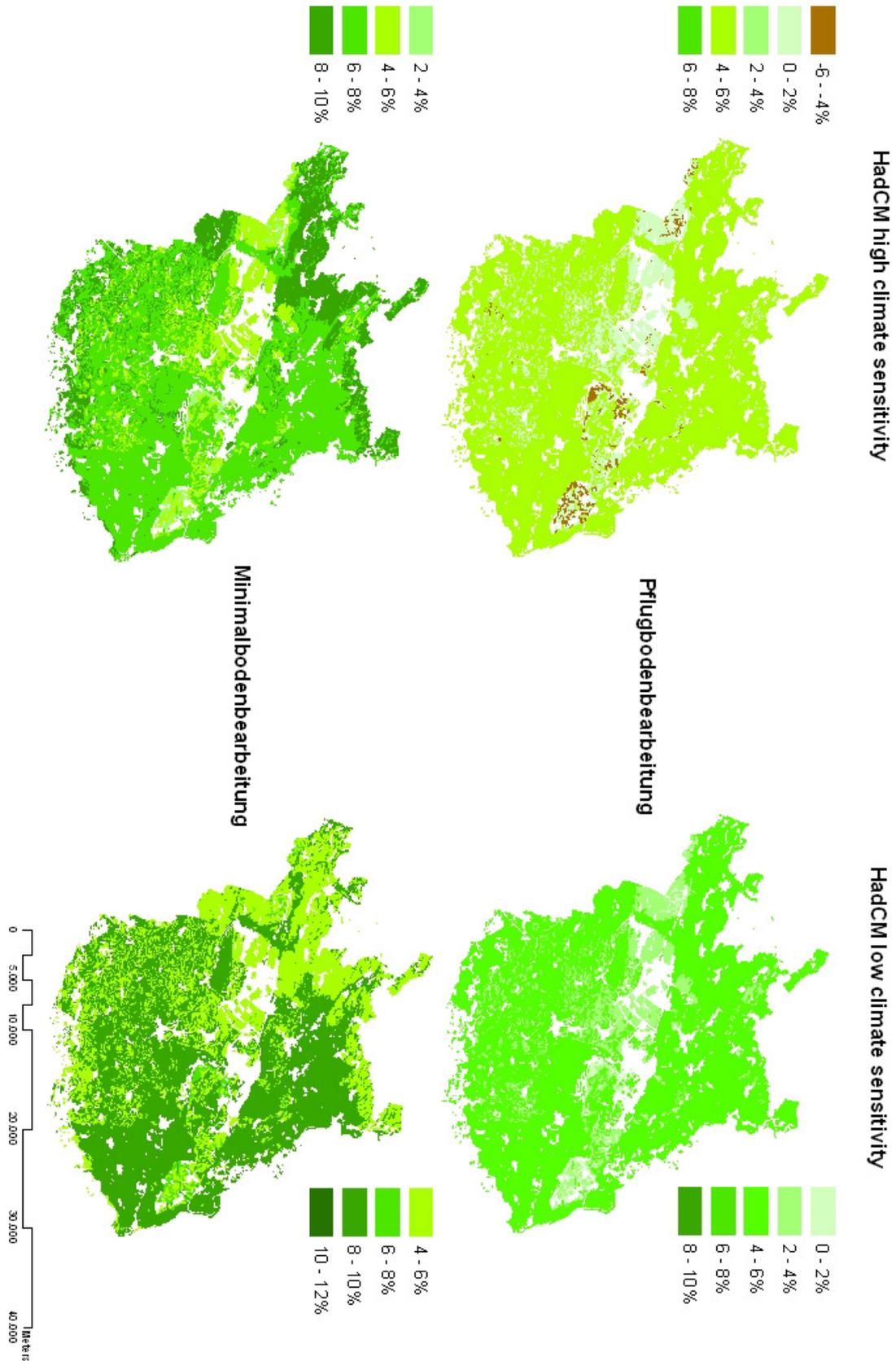


Abbildung 5.18: Relative Ertragsänderung der Winterweizensorte Capo für das HadCM3 Szenario 2025 im Marchfeld (Referenz: Herbstpflugfurche, Kulturführung nach ÖPUL, Klima: 1971-2005)

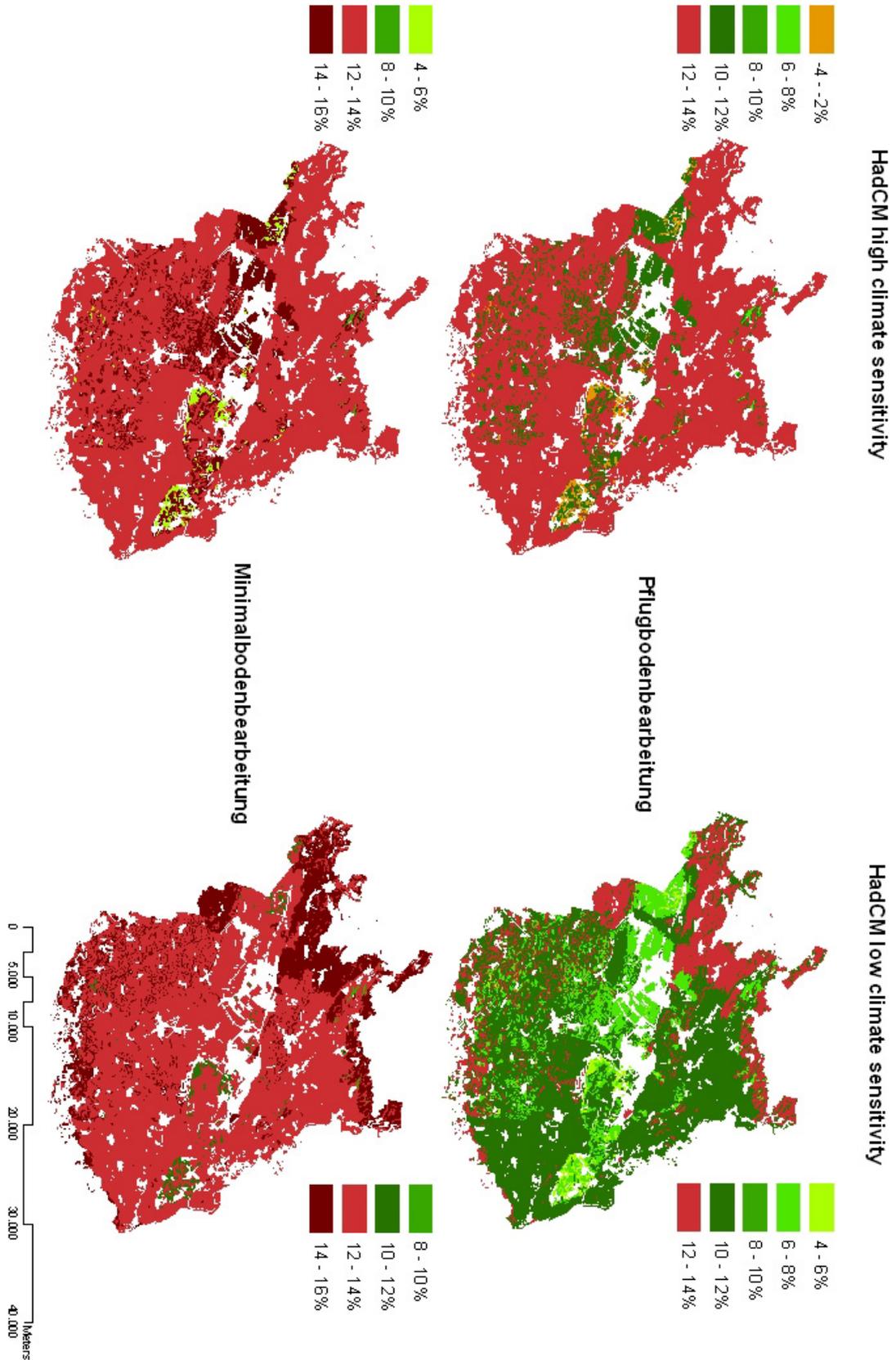


Abbildung 5.19: Relative Ertragsänderung der Winterweizensorte Capo für das HadCM3 Szenario 2050 im Marchfeld (Referenz: Herbstpflugfurche, Kulturführung nach ÖPUL, Klima: 1971-2005)

5.3.2 Ergebnisse und Diskussion der Simulation für Sommergerste

Die Veränderung der Phänologie bei Sommergerste

Die Zusammenfassung der phänologischen Daten der Kultur Sommergerste (siehe Tabelle 5.8 und Abbildung 5.20) zeigt eine deutliche Reaktion auf den Klimawandel. Die Blüte verschiebt sich im Durchschnitt vom 10. Juni je nach Szenario auf Anfang Juni bzw. Ende Mai. Auch die Reife findet früher statt. Sie verschiebt sich im Durchschnitt vom 8. Juli auf Ende Juni bzw. Anfang Juli. Die generative Entwicklung wird beschleunigt. Sie verkürzt sich je nach Szenario um ein bis drei Tage und geht von durchschnittlich 28 Tagen auf mindestens 25 Tage zurück.

Auch die Dauer der vegetativen Entwicklungsphase wird durch die Klimaveränderung reduziert. Sie geht im Durchschnitt von 88 Tagen auf 82 Tage (Szenario: 2050 HIGH) um maximal 6 Tage zurück. In Summe kommt es zu einer Verkürzung der Wachstumsperiode der Sommergerste um zwei (2025 LOW) bis zu neun Tagen (2050 HIGH).

Bei Beibehaltung der gegenwärtigen Saattermine käme es zu einer noch stärkeren Verkürzung der Wachstumsperiode. Diese Verkürzung hätte negative Auswirkungen auf den Ertrag. Die Bäuerinnen und Bauern der Region werden daher darum bemüht sein, die Saattermine im Zuge einer Erwärmung im Frühjahr vorzulegen. Der frühest mögliche Saattermin wird dabei vor allem von den Wetterbedingungen im Frühjahr bestimmt. Die Gerstensaart braucht nach Geisler 1988 zur Keimung eine minimale Bodentemperatur von 2-4°C, die optimale Keimtemperatur liegt bei 20-25°C. In der Praxis findet die Saat bei Bodentemperaturen statt, die etwas über dem Minimum bei etwa 6-8°C liegen. Damit sollen Schädigungen der Keimlinge durch Fröste verhindert werden, Geisler gibt für wachsende Gerste eine Kältetoleranz bis -4°C an. Ein Problem für die Saat im Frühjahr ist die häufig auftretende Bodennässe z.B. bei später Schneeschmelze. Sie erschwert das Befahren und führt zu einem Verschmieren der Säschare. Der Oberboden muss daher bei der Saat bereits ausreichend abgetrocknet sein.

Die Klimaveränderung führt zu einer früheren Erwärmung des Oberbodens im Frühjahr. Die Keimbedingungen werden daher rascher erreicht und die Saat kann vorverlegt werden. Die Klimaszenarien zeigen aber auch eine Zunahme der Niederschläge in der kalten Jahreszeit. Häufigere feuchte Bodenbedingungen im März können die Saat im Gegenzug behindern und verzögern. Unter Berücksichtigung von Bodentemperatur und -feuchte ergaben die Simulationen in der Bilanz eine Vorverlegung der Sommergerstensaart um durchschnittlich zwei (Szenario: 2025 LOW) bis sieben Tage (2050 HIGH) auf Anfang März.

Tabelle 5.8: Die Veränderung der Phänologie von Sommergerste durch den Klimawandel (Mittelwerte aus allen Bodenklassen und Varianten der Bodenbearbeitung)

Szenario	Saat Tag	Saat Stabw. in d	Blüte Tag	Blüte Stabw. in d	Reife Tag	Reife Stabw. in d	vege- tativ in d	gene- rativ in d	Wachstums- periode in d
1971-2005	14. Mär	11,6	10. Jun	8,9	8. Jul	8,5	88	28	116
2025 HIGH	10. Mär	14,6	1. Jun	6,9	28. Jun	6,5	83	27	110
2025 LOW	12. Mär	12,4	7. Jun	7,3	4. Jul	6,8	87	27	114
2050 HIGH	7. Mär	11,0	28. Mai	7,3	22. Jun	6,6	82	25	107
2050 LOW	12. Mär	11,9	5. Jun	7,9	2. Jul	7,5	85	27	112

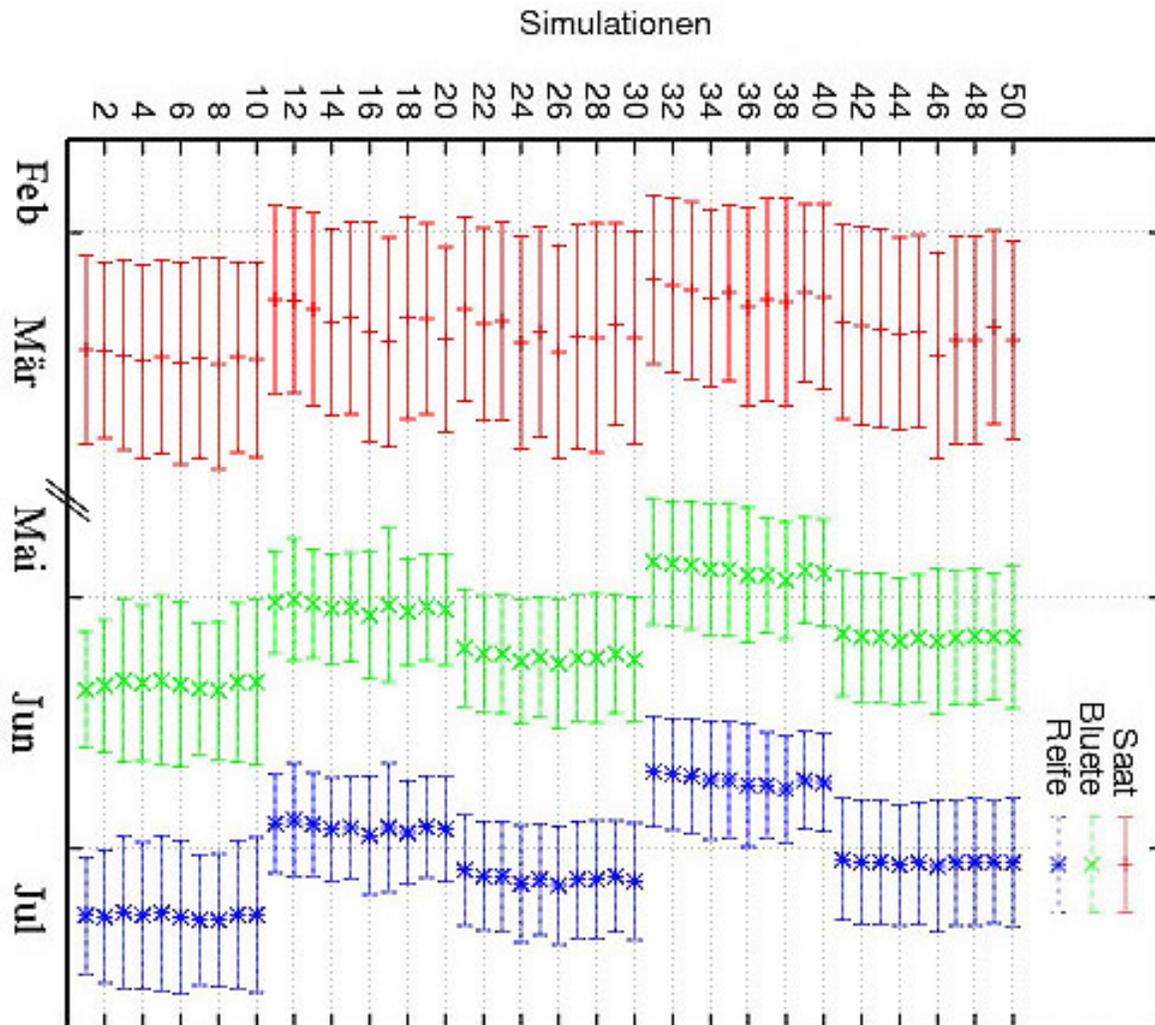


Abbildung 5.20: Die Veränderung der Zeitpunkte von Saat, Blüte und Reife bei Sommergerste unter dem Einfluss der Faktoren Klimawandel (HadCM3), Bodenklassen und Bodenbearbeitung

1-10: Referenz (1971-2005), 11-20: 2025/HIGH, 21-30: 2025/LOW, 31-40: 2050/HIGH, 41-50: 2050/LOW

1: BK1/Pflug, 2: BK1/Mini; 3: BK2/Pflug, 4: BK2/Mini; 5: BK3/Pflug,

6: BK3/Mini; 7: BK4/Pflug, 8: BK4/Mini; 9: BK5/Pflug, 10: BK5/Mini.

41: BK1/Pflug, 42: BK1/Mini; 43: BK2/Pflug, 44: BK2/Mini; 45: BK3/Pflug,

46: BK3/Mini; 47: BK4/Pflug, 48: BK4/Mini; 49: BK5/Pflug, 50: BK5/Mini

Die größere Streuungen der berechneten Saattermine gegenüber den Streuungen beim Termin der Herbstsaat zeigen aber die größeren Schwierigkeiten im Frühjahr (siehe Tabellen 5.12 und 5.20).

Sommergerste braucht zur Auslösung der Ausbildung der Blütenanlagen keinen Vernalisationsreiz, der Wechsel vom vegetativen zum generativen Wachstum wird von der Tageslänge determiniert. Eine Vorverlegung der Saat bedeutet, dass das Wachstum bei kürzeren Tageslängen stattfindet. Dadurch kommt es in der Jugendentwicklung der Langtagspflanze Sommergerste zu einer Betonung des vegetativen Wachstums und einer stärkeren Bestockung.

Die Bodenverhältnisse haben über die Wachstumsbedingungen Einfluss auf die Wahl des Saattermins. In Abbildung 5.20 zeigt sich, dass die automatischen Saattermine bei Bodenklasse 1 etwas früher liegen als in den anderen Bodenklassen. Unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-

2005) wurde für die Klasse 1 (nach Herbstpflugfurche) der 14. März als durchschnittlicher Saattermin berechnet, auf den anderen Bodenklassen findet die Saat (nach Herbstpflugfurche) durchschnittlich einen Tag später statt. Sandige Böden neigen im Frühjahr aufgrund guter Infiltration weniger zur Vernässung als schluffige Böden. Die Wärmeleitfähigkeit der leichten Böden ist geringer, sie erwärmen sich daher rascher an der Oberfläche und geben weniger Wärmeenergie an tieferliegende Bodenschichten ab. Günstige Saatbedingungen werden daher früher erreicht. In der Praxis könnten die Unterschiede im Saattermin größer ausfallen als in der Simulation. Bei der Saat der Winterungen im Oktober fallen die Bodenunterschiede aufgrund der besseren Bedingungen für die Saat weniger ins Gewicht.

Auch die Bodenbearbeitung zeigt in der Simulation leichte Auswirkungen auf die Wahl des Saattermins. Auf Bodenklasse 3 und 4 verspätet sich die Saat nach Minimalbodenbearbeitung im Vergleich zum gepflügten Boden um durchschnittlich einen Tag. Grund dafür ist die stärkere Vernässung der minimal bearbeiteten Böden. Das Risiko eines späteren Saattermins im Frühjahr ist ein möglicher Nachteil, der beim Verzicht auf den Pflug in Kauf genommen werden muss.

Der Wasserhaushalt bei Sommergerste

Die Abbildungen 5.21 und 5.22 geben Auskunft über den Bodenwasserhaushalt bei Anbau von Sommergerste.

Die Ergebnisse bei Drainage und Oberflächenabfluss sind ähnlich wie bei Winterweizen. Die Drainage ist in erster Linie von der Bodenbeschaffenheit abhängig. Mit zunehmender Bodenmächtigkeit und Bodenschwere nehmen die Drainageverluste ab. Der Oberflächenabfluss hat mengenmäßig kaum Bedeutung.

Die Evaporation stellt bei Betrachtung der Jahressumme auch bei Sommergerste die mit Abstand größte Fraktion der Wasserverluste dar. Evaporation fällt bei Sommergerste aufgrund der späten Jugendentwicklung und des späten Bestandesschlusses zum Teil bereits im Frühjahr an. Den Großteil der Jahressumme der Evaporation macht aber die Verdunstung aus der Brache nach Ernte der Sommergerste aus.

Die Transpiration nimmt bei Steigerung der nutzbaren Feldkapazität bis zur Bodenklasse 3 zu und stagniert dann bei Bodenklasse 4 und 5. Die Sommergerste kann die zusätzliche nutzbare Feldkapazität nicht produktiv nutzen.

Winterungen haben gegenüber Sommerungen im Frühjahr einen Entwicklungsvorsprung. Sommerungen haben eine spätere Jugendentwicklung und blühen später als Winterungen. Da Gerste eine kürzere Kornfüllungsphase als Weizen hat (simulierte Dauer der Kornfüllung bei gegenwärtigem Klima für WW: 34 d, für SG: 28 d), holt die Sommergerste nach der Blüte rasch auf, und reift je nach Sorte sogar etwas früher oder gleichzeitig mit Winterweizen ab. Der Bestandesschluss und damit eine starke Unterdrückung der Evaporation erfolgt somit bei Sommergerste später, das Feld wird aber etwa zur gleichen Zeit geräumt. Die Evaporation fällt daher bei Sommergerste bei den meisten Simulationen höher aus als bei Winterweizen. Wie die im Literaturteil angeführten Transpirationskoeffizienten zeigen, ist Gerste als Kultur sparsamer bei der Nutzung von Wasser als Weizen. Bei einer kürzeren Wachstumsdauer und ähnlich hohen Erträgen wäre bei Sommergerste im Vergleich zu Winterweizen mit einem geringeren Transpirationsverbrauch zu rechnen. Die Simulation gibt das für die besseren Bodenklassen 3, 4 und 5 wieder. Im Widerspruch dazu gibt die Simulation bei den schlechteren Bodenklassen 1 und 2 für Sommergerste eine höhere Transpiration aus. Es findet bei der Simulation wahrscheinlich eine Überschätzung der Transpiration der Sommergerste statt. Die Höhe der Transpiration ist aber auch stark sortenabhängig.

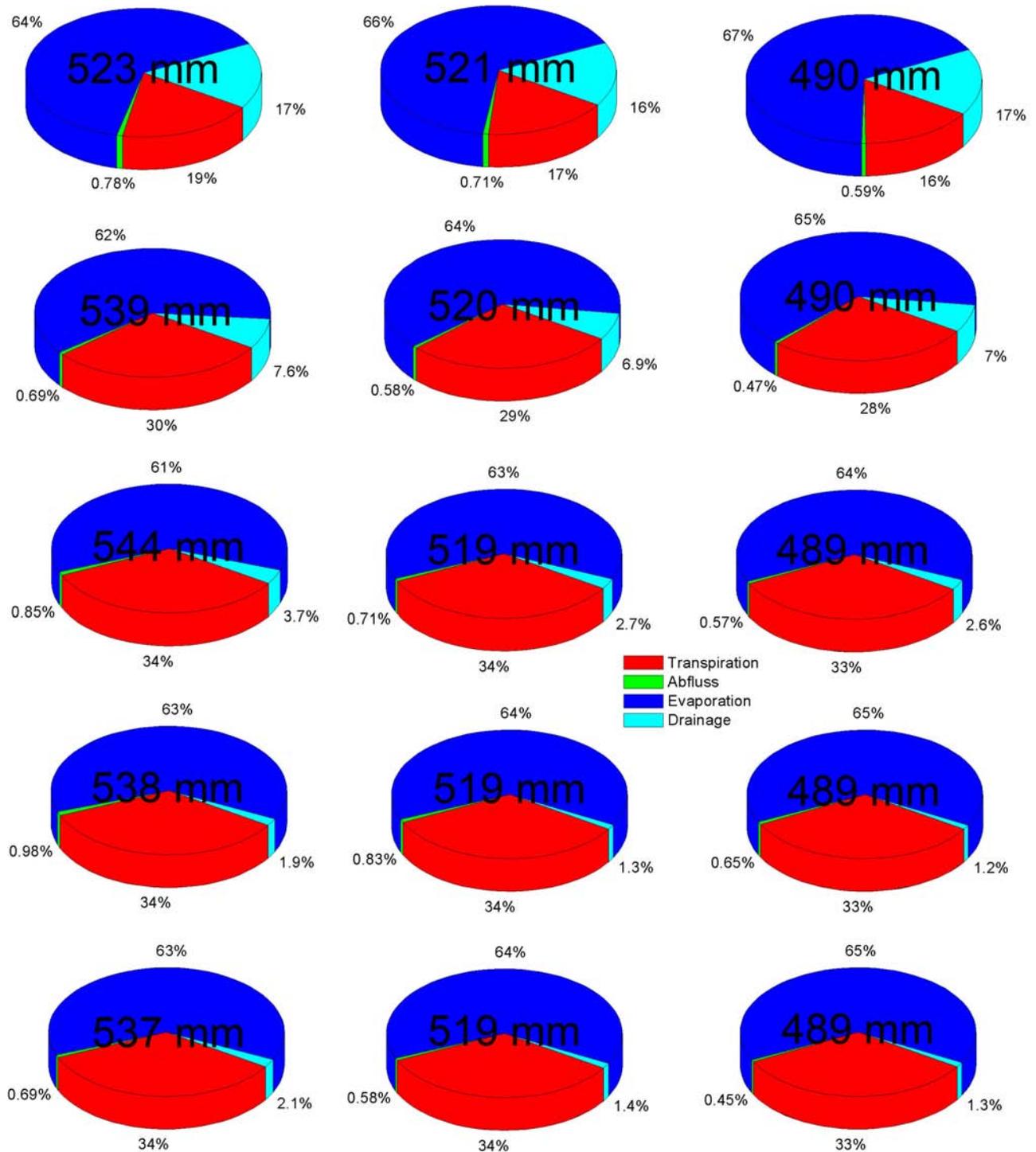


Abbildung 5.21: Jährliche (Summe von Saat bis zur nächsten Saat) relative Wasserbilanzen für Sommergerstenbestand bei Herbstpflugfurche (Zeile 1-5: Bodenklassen 1-5; Spalte 1-3: 1971-2005, 2025 LOW, 2050 HIGH)

Ein fragwürdiges Ergebnis liefert beim Vergleich mit Winterweizen auch die Berechnung der Drainage. Sie fällt bei Sommergerste durchgehend niedriger aus als bei Winterweizen. Zu rechnen

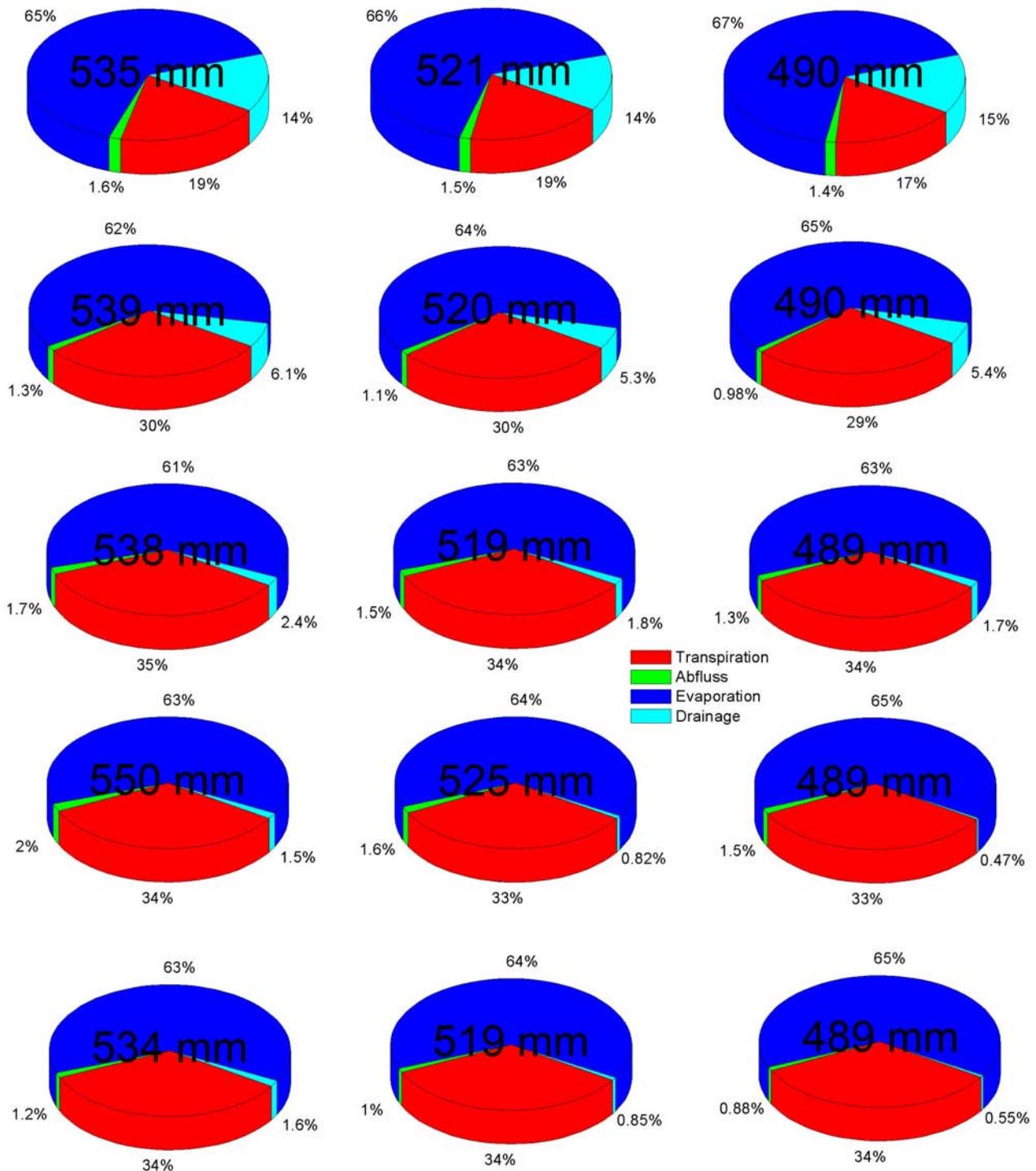


Abbildung 5.22: Jährliche (Summe von Saat bis zur nächsten Saat) relative Wasserbilanzen für Sommergerstenbestand bei Minimalbodenbearbeitung (Zeile 1-5: Bodenklassen 1-5; Spalte 1-3: 1971-2005, 2025 LOW, 2050 HIGH)

wäre eher mit dem Gegenteil, die im Frühjahr eher einsetzende Transpiration bei Winterweizen sollte zu geringeren Drainageverlusten führen. So beschreibt Dietrich (2000) in der Auswertung

Tabelle 5.9: Trockenstressfaktor für das Wachstum (WFGD) bei Sommergerste

	BK 1	BK 2	BK 3	BK 4	BK 5
Szenario	Pflug	Pflug	Pflug	Pflug	Pflug
1971-2005	28,0	15,8	12,1	9,4	5,4
St.abw.	8,6	9,2	9,2	9,1	6,4
2025 HIGH	29,2	19,1	16,0	13,1	8,9
St.abw.	10,1	10,9	11,3	11,2	7,9
2025 LOW	29,6	18,5	15,3	12,3	8,7
St.abw.	10,3	11,1	11,6	10,6	8,0
2050 HIGH	28,1	18,8	16,3	13,8	9,6
St.abw.	9,8	10,1	11,1	11,3	8,4
2050 LOW	30,8	19,3	16,0	12,7	8,8
St.abw.	10,7	11,0	11,4	11,3	8,4

eines Feldversuchs im Eferdinger Becken eine Reduktion der Sickerwassermenge durch eine Winterbegrünung mit Grünroggen.

Die Minimalbodenbearbeitung zeigt bei Sommergerste ähnliche Wirkungen auf den Wasserhaushalt wie bei Winterweizen. Die Drainage wird deutlich reduziert, und die Transpiration durch die bessere Verfügbarkeit und den höheren Wasserverbrauch der Pflanzen etwas erhöht.

Der Trockenstressfaktor (siehe Tabelle 5.9) zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Bodenklasse bzw. der nutzbaren Feldkapazität. Von Klasse 1 auf Klasse 2 fallen die Werte stark ab, der weitere Abfall bis zur Bodenklasse 5 ist schwächer und praktisch linear.

Der Klimawandel führt bei Sommergerste bei allen Szenarien und Bodenklassen zu einem Anstieg des Trockenstressfaktors. Die Betroffenheit der Sommergerste durch Trockenheit nimmt mit voranschreitendem Klimawandel weiter zu. Die größte Steigerung der Werte tritt beim Vergleich der gegenwärtigen Bedingungen (1971-2005) mit den Szenarien für 2025 auf. Die weitere Steigerung bis 2050 fällt weniger stark aus. Der Klimawandel führt auch zu einer Erhöhung der Streuung des Trockenstressfaktors. Die Trockenheit während der Sommergerstenjahre wird demnach stärker variieren. Die Zunahme der Streuung kann bei Veränderung der Niederschlagsvariabilität noch stärker ausfallen.

Die Sommergerste weist eine relativ späte Jugendentwicklung und Blüte auf. Sie kann daher nur wenig von der zusätzlichen Feuchtigkeit aus dem Winter profitieren. Die Vorverlegung der Saattermine und die frühere Blüte und Reife der Kultur puffern den zunehmenden Trockenstress etwas ab. Dieser Puffereffekt wird mit voranschreitendem Klimawandel etwas stärker. In der Bilanz ist die Sommergerste aber mit zunehmend warmen und trockenen Bedingungen konfrontiert. Dies zeigt den Unterschied zum Winterweizen, der in der Bilanz im Zuge des Klimawandels unter geringerem Trockenstress leiden wird.

Die simulierten Transpirationskoeffizienten für Sommergerste fallen höher aus als die von Günther (2003) experimentell bestimmten Werte. Günther geht von 218 bis 321 l kg⁻¹ aus, die Simulation ergibt für gegenwärtige Klimabedingungen Werte von 322 (Bodenklasse 1, Pflug) bis 385 l kg⁻¹ (Bodenklasse 5, Pflug). Diese Abweichung ergibt sich aus den hohen Werten, die von CERES/DSSAT für die Transpiration bei Sommergerste simuliert werden.

Der Einfluss der Bodenklasse auf die Wassernutzung ergibt bei Sommergerste ein relativ klares Bild. Die Transpirationskoeffizienten steigen bei zunehmender nutzbarer Feldkapazität an, der

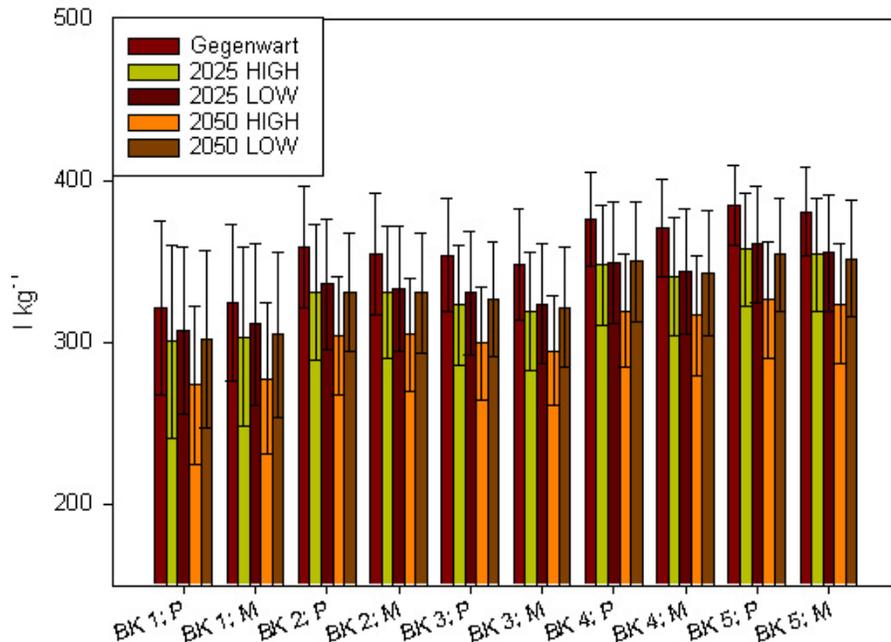


Abbildung 5.23: Simulierte Transpirationskoeffizienten von Sommergerste auf verschiedenen Bodenklassen (BK1-5) und bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (M: Minimalbodenbearbeitung; P:Herbstpflugfurche)

größte Sprung erfolgt dabei von Bodenklasse 1 auf Bodenklasse 2. Die Steigerung der Wasserverfügbarkeit führt auch bei Sommergerste zu einer längeren Öffnung der Stomata, und damit zu einem erhöhten Wasserkonsum. Da die Sommergerste stärker von Trockenheit betroffen ist als Winterweizen, spielt die Bodenbeschaffenheit und die nutzbare Feldkapazität eine im Vergleich größere Rolle für das Pflanzenwachstum.

Der Einfluss der Bodenbearbeitung wird durch die Simulation der Transpirationskoeffizienten nicht gut wiedergegeben. Die Werte für die Minimalbodenbearbeitung liegen unter den Werten der gepflügten Variante. Dies ergibt sich aus den durch die Minimalbodenbearbeitung gesteigerten Erträgen bei Stagnieren der simulierten Transpiration. Zu erwarten wäre eher ein gegenteiliges Verhalten. Höhere Erträge gehen auch mit gesteigerter Transpiration einher. Durch die bessere Wasserverfügbarkeit bei pflugloser Bearbeitung, müssten die Transpirationskoeffizienten bei Minimalbodenbearbeitung höher liegen.

Der Klimawandel führt zu einem deutlichen Absinken der Transpirationskoeffizienten, im extremsten Szenario 2050 HIGH um rund 15%. Die Transpirationskoeffizienten in diesem Szenario entsprechen dann etwa den von Günther (2003) experimentell ermittelten.

Die Veränderung des Ertragspotentials bei Sommergerste

Auch bei Sommergerste zeigt sich ein starker Einfluss der Bodenklasse auf das Ertragsniveau. Die Bodenfruchtbarkeit der Paratschernoseme und leichten Tschernoseme der Bodenklasse 1 und 2 ist geringer als die der Tschernoseme, Auböden und Feuchtschwarzerden der Klassen 3, 4 und 5. Auch für die Sommergerste ist auf den geringwertigen landwirtschaftlichen Böden die nutzbare Feldkapazität der wesentliche limitierende Faktor. Auf den besseren landwirtschaftlichen Böden gewinnen andere Faktoren wie Niederschlagsvariabilität und -menge und biologische und chemische Eigenschaften des Bodens an Bedeutung (siehe Kapitel 5.3.1.3).

Das Ertragsverhalten der Sommergerste weist aber darauf hin, dass die Wasserversorgung über die nutzbare Feldkapazität des Bodens für diese Kultur relativ größere Bedeutung hat als für Winterweizen. So kommt es bei einer Steigerung der nutzbaren Feldkapazität durch Minimalbodenbearbeitung bei Sommergerste bei gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) auf allen Bodenklassen zu Ertragssteigerungen. Bei Winterweizen führen die Simulationen der Minimalbodenbearbeitung nur auf den Bodenklassen 1, 2 und 3 zu höheren Erträgen. Mit Ausnahme der Bodenklasse 1 reagiert die Sommergerste auch stärker positiv auf die Minimalbodenbearbeitung (siehe Tabelle 5.11) als Winterweizen. Gerste ist zwar biologisch trockenresistenter als Weizen (siehe Transpirationskoeffizienten), die Sommerung ist aber aufgrund der späteren Entwicklung auch stärker von Trockenheit betroffen als Winterweizen.

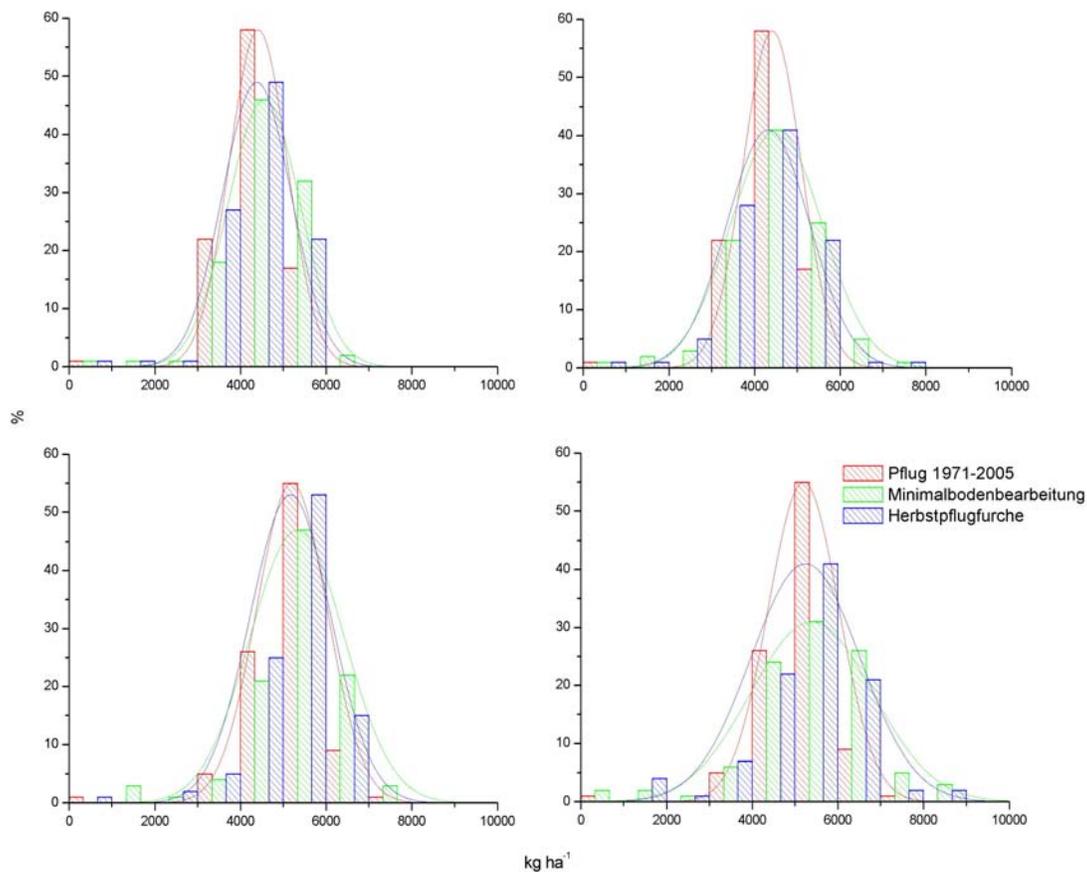


Abbildung 5.24: Histogramme und Normalverteilungen der Sommergerstenerträge (TM) im Marchfeld; Zeile 1: Bodenklasse 2; Zeile 2: Bodenklasse 3; Spalte 1: Szenario 2025 LOW; Spalte 2: Szenario 2025 HIGH

Sommergerste weist im Großteil der Simulationen eine niedrigere Ertragsvariabilität auf als Winterweizen (Vergleiche Abbildung 5.24 mit 5.17). Die Umweltbedingungen sind aufgrund der kürzeren Vegetationsperiode und der Saat im Frühjahr für die Sommerung homogener als für die Winterung. Beispielsweise fallen Auswinterungsschäden weg, die bei Winterungen zu Ausfällen führen können. Die Simulation gibt das reale Ertragsverhalten der Kulturen richtig wieder. Am Standort Fuchsenbigl beträgt die aus 10 Versuchsjahren berechnete Standardabweichung der Erträge von Sommergerste $\sigma=962 \text{ kg ha}^{-1}$, die Standardabweichung von Winterweizen (aus den selben Versuchsjahren berechnet) erreicht $\sigma=1190 \text{ kg ha}^{-1}$.

Die späte Jugendentwicklung und Blüte und die stärkere Einwirkung von Trockenstress ist auch

Tabelle 5.10: Einfluss der Faktoren Bodenklasse, Bodenbearbeitung und Klimaänderung (Szenario HadCM3) auf die mittleren simulierten Erträge bzw. Standardabweichungen (in kg ha⁻¹) von Sommergerste

Szenario	Bokla. 1		Bokla. 2		Bokla. 3		Bokla. 4		Bokla. 5	
	Pflug	Mini								
1971-2005	3016	3204	4453	4636	5246	5385	4942	5002	4805	4876
St.abw.	630	574	562	588	693	730	555	623	484	503
2025 HIGH	2751	2955	4244	4433	5175	5368	4876	4966	4779	4862
St.abw.	757	729	726	762	929	1101	888	972	553	618
2025 LOW	2925	3111	4415	4590	5211	5366	4967	5023	4843	4898
St.abw.	743	730	726	769	853	1030	632	748	449	485
2050 HIGH	2750	2940	4357	4546	5286	5428	4932	5032	4825	4937
St.abw.	875	893	915	1018	1219	1378	993	1116	570	645
2050 LOW	2789	2996	4346	4532	5224	5410	4953	5010	4858	4864
St.abw.	796	792	767	810	907	1004	799	909	507	541

Tabelle 5.11: Relative Ertragsänderungen (%) bei Ersetzen des Pflugs durch Minimalbodenbearbeitung unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) bei Winterweizen und Sommergerste

Kultur	BK 1	BK 2	BK 3	BK 4	BK 5
Winterweizen	6,3	3,1	1,5	-0,3	0,2
Sommergerste	4,9	4,1	2,7	1,2	1,5

der Grund, warum der Klimawandel bei Sommergerste auf den meisten Bodenklassen zu Ertragseinbußen führt. Der ertragsreduzierende Faktor der zunehmenden Aridität überwiegt die Pufferwirkung von CO₂-Düngung und Vorverlegung der Wachstumsperiode. Überraschend ist, dass die milderen 2025er Szenarien zu größeren Ertragsverlusten führen als die extremeren 2050er Szenarien. Auch fällt das Szenario 2050 HIGH geringfügig besser aus als das 2050 LOW Szenario. Die deutliche Vorverlegung des Saattermins im 2050 HIGH Szenario um durchschnittlich eine Woche gegenüber der Referenz führt zu einer besseren Nutzung der zunehmenden Winterniederschläge durch die Kultur auf der Bodenklasse 3. Der Klimawandel führt auf den Paratschernosen zu besonders starken Einbrüchen der Erträge, auf den besseren Böden kann die Trockenheit besser abgepuffert werden. Auf den schlechtesten landwirtschaftlichen Böden im Marchfeld ist eine weitere – landwirtschaftliche – Nutzung mit einem erhöhten Risiko verbunden. Es ist daher über eine alternative Nutzung dieser Standorte z.B. für Energieholz nachzudenken. Diese Böden machen aber zum Glück nur einen sehr geringen Anteil an der gesamten agrarischen Nutzfläche aus.

Bei Sommergerste führt der Klimawandel auch zu einem deutlichen Anstieg des Ertragsrisikos. Die Standardabweichung der Erträge erhöht sich bei allen (mit nur einer Ausnahme) Simulationen (siehe Tabelle 5.10 und Abbildung 5.24). Das ökonomische Risiko beim Anbau dieser Kultur steigt demnach an.

Die Abbildungen 5.25 und 5.26 zeigen, dass die Minimalbodenbearbeitung dazu beitragen kann die Ertragsverluste bei Sommergerste durch den Klimawandel zumindest auf den Bodenklassen 3; 4 und 5 zu verhindern. Die Sommergerstenerträge könnten bei einer technischen Umstellung insgesamt sogar leicht gesteigert werden. Die Verwendung der Minimalbodenbearbeitung steigert auf fast allen (abgesehen von Bodenklasse 1) Böden jedoch auch die Ertragsvariabilität. Die Erhöhung

der Streuung ist aber meistens eine Folge von ertragssteigernden Massnahmen und daher kein Argument gegen deren Anwendung. Gesteigerte Erträge in vielen Jahren stehen in stärkerem Kontrast zu sehr trockenen Jahren, in denen auch die Minimalbodenbearbeitung eine Missernte nicht abwenden kann. Insgesamt ist eine Umstellung der Bodenbearbeitung vor Getreide, bei Beachtung der Risiken, aus pflanzenbaulicher Sicht unter den Klima- und Bodenbedingungen im Marchfeld als positiv zu bewerten.

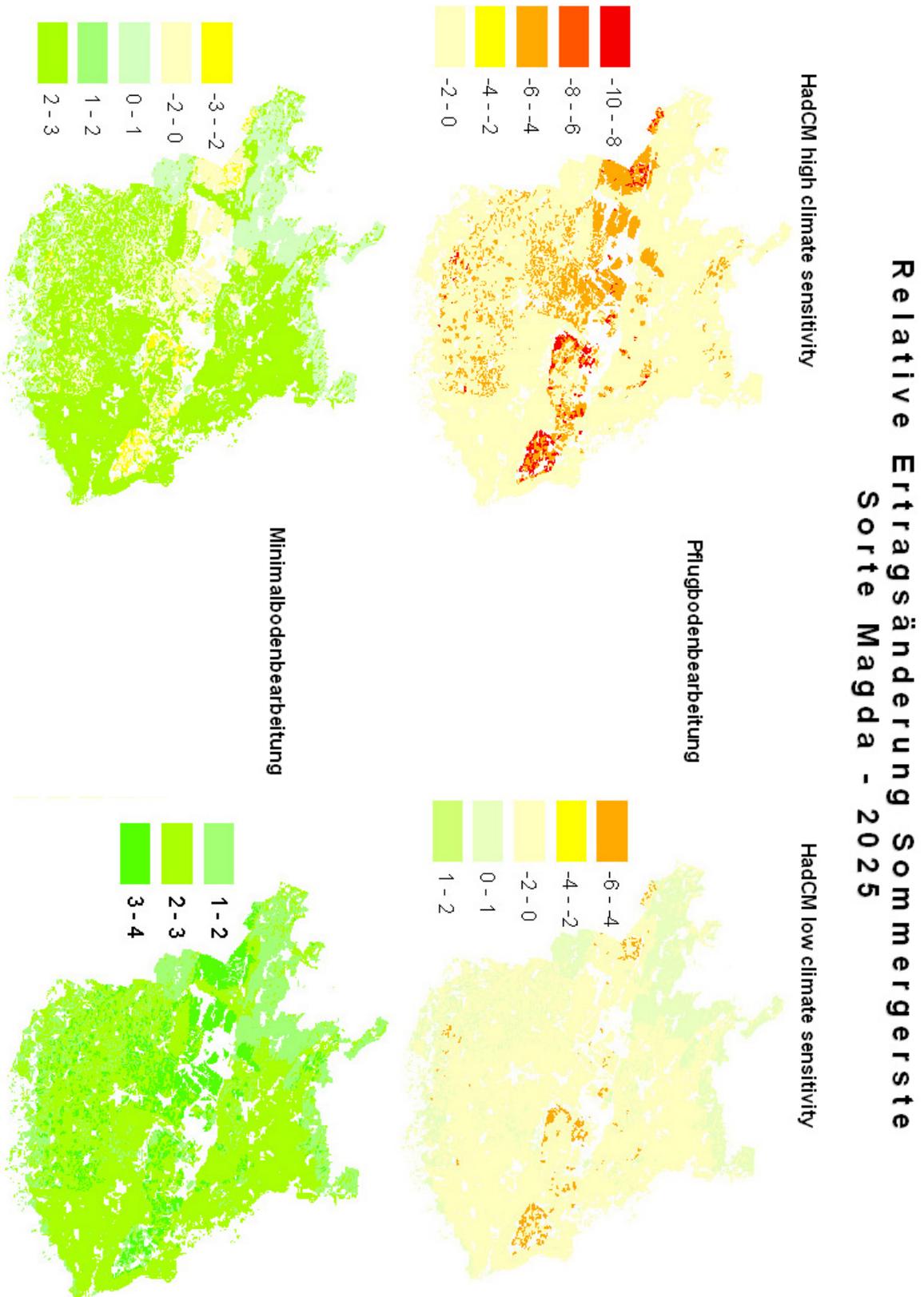


Abbildung 5.25: Relative Ertragsänderung der Sommergerstensorte Magda für das HadCM3 Szenario 2025 im Marchfeld (Referenz: Pflugbodenbearbeitung, Kulturführung nach ÖPUL, 1971-2005)

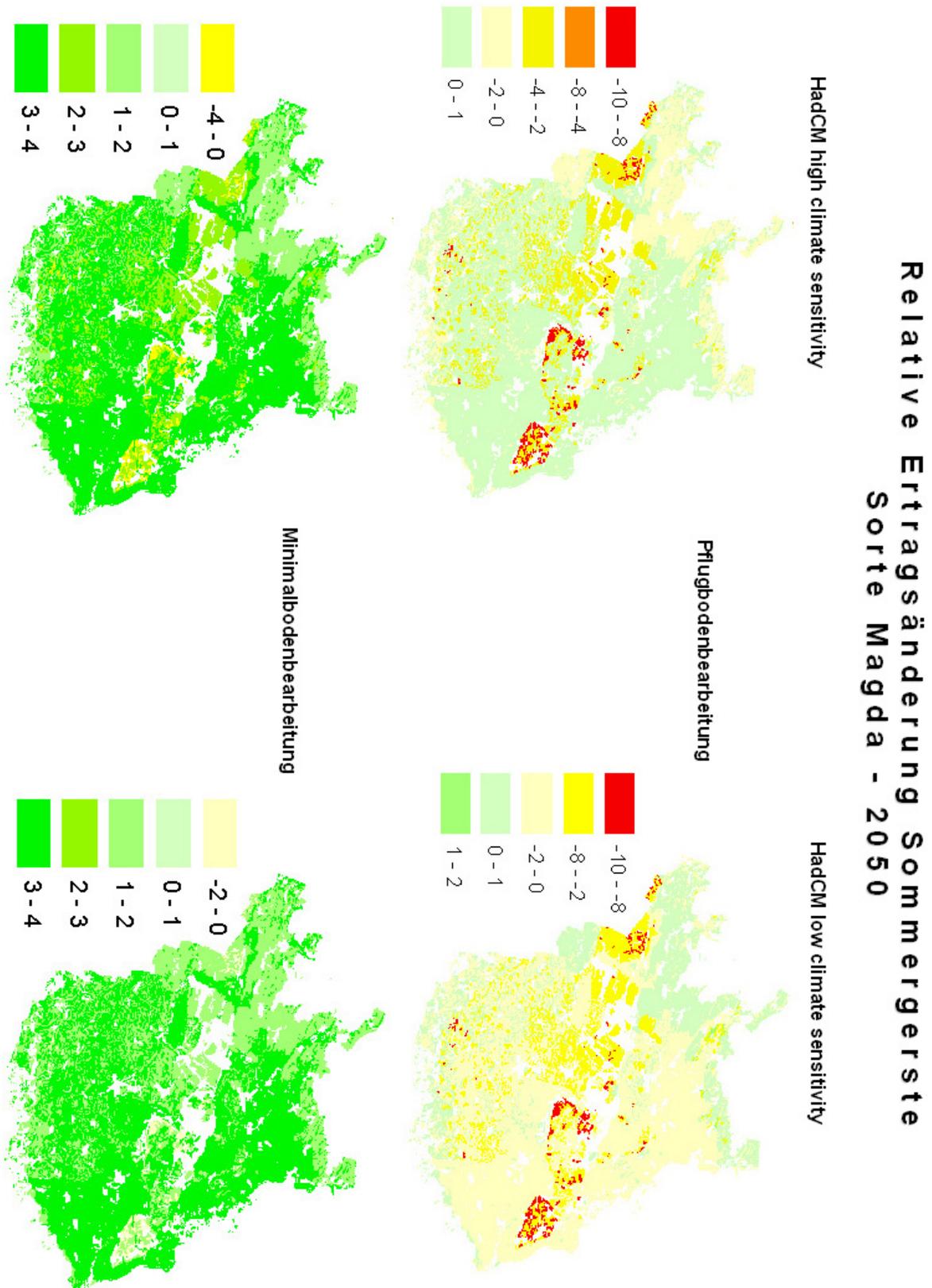


Abbildung 5.26: Relative Ertragsänderung der Sommergerstensorte Magda für das HadCM3 Szenario 2050 im Marchfeld (Referenz: Pflugbodenbearbeitung, Kulturführung nach ÖPUL, 1971-2005)

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob eine Umstellung der Bodenbearbeitung und eine Verschiebung der durchschnittlichen Saattermine geeignete Strategien für die Region Marchfeld zur Anpassung des Getreidebaus an den Klimawandel sind. Am Standort Raasdorf im Marchfeld (langjähriges Jahresniederschlagsmittel in Groß Enzersdorf: 568 mm; Boden: Tschernosem) wurde von 2002 bis 2004 ein Bodenbearbeitungsversuch durchgeführt. Die Bodenbearbeitung vor den Hauptfrüchten Winterweizen und Sommergerste wurde in einer Variante konventionell (Stoppelbearbeitung mit Grubber, Pflug, Saatbettbereitung mit Kreiselegge, Drillsaat) durchgeführt, in einer anderen Variante wurde, nach einer Minimalbodenbearbeitung mit Spatenrollegge, direkt gesät. Es wurden u.a. die Bodenwassergehalte, die Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehungen (pF-Kurven) und die Kornerträge beider Varianten bestimmt.

Im Pflughorizont kommt es durch die Bodenbearbeitung zu einer Erhöhung des Sättigungspunktes von 48,0 auf 52,8 Volumsprozent (Bodentiefe: 20-25 cm). Die nutzbare Feldkapazität sinkt gleichzeitig um rund 11,5% von 16,6 Volumsprozent auf 14,7 Volumsprozent ab. Im Unterboden, der durch die Bearbeitung nicht erreicht wird, kommt es zu keiner deutlichen Änderung der pF-Kurve. Die niedrigere nutzbare Feldkapazität der gepflügten Variante führte in allen drei Versuchsjahren während der Hauptwachstumsperiode von Winterweizen/Sommergerste zu niedrigeren pflanzenverfügbaren Wassergehalten im Wurzelraum. Dabei führten niederschlagsreiche Phasen zu besonders hohen Unterschieden (z.B. Mai 2002: Pflug: 63 l m⁻²; Mini.: 101 l m⁻²), und Trockenphasen zu geringeren Unterschieden zwischen den Varianten (z.B. Juni 2003: Pflug: 51 l m⁻²; Mini.: 52 l m⁻²).

Die Kornerträge von Sommergerste wurden im Trockenjahr 2003 durch die Minimalbodenbearbeitung signifikant gesteigert (Pflug: 2772 kgTM ha⁻¹, Mini: 3563 kgTM ha⁻¹). In den feuchteren Versuchsjahren 2002 und 2004 kam es auch zu Ertragssteigerungen, die aber nicht signifikant waren. Für Winterweizen fiel das Ergebnis weniger klar aus. Hier kam es 2004 zu signifikant höheren Erträgen nach Vorfrucht Mais und Minimalbodenbearbeitung (Pflug: 4875 kgTM ha⁻¹, Mini: 5440 kgTM ha⁻¹) und 2003 zu signifikant niedrigeren Erträgen nach Vorfrucht Sommergerste und Minimalbodenbearbeitung (Pflug: 3845 kgTM ha⁻¹, Mini: 3293 kgTM ha⁻¹).

Die Ergebnisse des Bodenbearbeitungsversuchs wurden mit Hilfe einer Pflanzenwachstumssimulation mit CERES/DSSAT auf die Region Marchfeld übertragen. Es wurde u.a. simuliert wie sich Wasserhaushalt und Pflanzenwachstum im Zuge des Klimawandels verändern. Für die Simulation wurden 5 Bodenklassen erstellt, und für jede Kultur eine Sorte kalibriert. Für die Klimawandelstudie wurden synthetische Wetterdaten auf Basis von 3 globalen Zirkulationsmodellen (ECHAM5, CSIRO und HadCM3) für die Perioden 2015-2035 (kurz: 2025) und 2040-2060 (kurz: 2050), mit jeweils hoher (HIGH) und niedriger (LOW) Klimasensitivität, erstellt.

Der Verzicht auf den Pflug führte auch bei der Simulation unter Winterweizen und Sommergerste zu einer Verringerung der unproduktiven Wasserverluste aus dem Boden. Vor allem in den leichten und seichtgründigen Bodenklassen wird die Grundwasserspende durch die erhöhte Wasserspeicherfähigkeit des gesamten Bodenprofils deutlich reduziert. Viele Simulationen zeigen bei Minimalbodenbearbeitung auch eine leichte Zunahme der Transpiration. Der Bestand ist in der Lage die höheren Bodenwassergehalte im Oberboden produktiv zu nutzen. Die Evaporation kann bei höherem Wassergehalt des Oberbodens und geringer Mulchbedeckung durch die Vorfrucht ebenfalls zunehmen.

Die bessere Wasserverfügbarkeit durch die Minimalbodenbearbeitung wirkt sich (ohne Berücksichtigung von phytosanitären Problemen) auch positiv auf die Erträge aus. Das simulierte Ertrags-

potential im Marchfeld steigert sich durch Minimalbodenbearbeitung bei gegenwärtigen Klimabedingungen (=1971-2005) bei Winterweizen, leicht von 5110 kgTM ha⁻¹ auf 5180 kgTM ha⁻¹ (nach Fläche gewichtetes Mittel der Erträge auf allen Bodenklassen, nur auf den Faktor Bodenbearbeitung zurück zu führen). Bei Sommergerste erhöht sich das Ertragspotential von 5030 kgTM ha⁻¹ auf 5160 kgTM ha⁻¹. Das Ergebnis zeigt die größere Bedeutung der nutzbaren Feldkapazität des Bodens als limitierenden Faktor des Wachstums bei Sommergerste. Die Minimalbodenbearbeitung kann bei beiden Getreidearten bei reduziertem Arbeits- und Energieaufwand (Schlichtner 2003, Stadler et al. 2005) und Erhalt der natürlichen Bodenfruchtbarkeit (Hofmann 2005) zu leicht steigenden Erträgen führen.

Der Klimawandel bringt im Marchfeld eine Verlängerung der Vegetationsperiode mit sich. Das Wachstum von determinierten Gräsern wie Weizen oder Gerste wird aber durch die Steigerung der Temperatursummen beschleunigt, die Wachstumsperiode dieser Pflanzen wird daher verkürzt.

Bei Winterweizen wird eine Verschiebung des durchschnittlichen Saattermin um maximal 14 Tage von 14. Oktober auf den 16. Oktober (HadCM 2025 LOW) bis 28. Oktober (HadCM 2050 HIGH) notwendig. Die Blüte des Winterweizens im Marchfeld verschiebt sich von durchschnittlich 5. Juni auf 24. Mai (HadCM 2050 HIGH) bis 1. Juni (2025 LOW), die Reife von durchschnittlich 9. Juli auf 24. Juni (HadCM 2050 HIGH) bis 5. Juli (HadCM 2025 LOW).

Die Saat der Sommergerste sollte aufgrund des Klimawandels früher stattfinden, eine Verschiebung von durchschnittlich 14. März auf 7. März (HadCM 2050 HIGH) bis 12. März (HadCM 2025 LOW und 2050 LOW) ist zu empfehlen. Die Blüte verschiebt sich im Durchschnitt vom 10. Juni je nach Szenario auf 28. Mai (HadCM 2050 HIGH) bis 7. Juni (HadCM 2025 LOW). Auch die Reife findet früher statt. Sie verschiebt sich von durchschnittlich 8. Juli auf 22. Juni (HadCM 2050 HIGH) bis 4. Juli (HadCM 2025 LOW).

Die Bedingungen während der Vegetationsperiode im Marchfeld werden wärmer und arider. Unter gegenwärtigen Klimabedingungen (=1971-2005) macht die aktuelle Evapotranspiration (auf Bodenklasse 2) 65% der potentiellen Evapotranspiration aus. Das Verhältnis verengt sich im Szenario 2050 HIGH auf 60%.

Trotz der steigenden Aridität nimmt die durchschnittliche Belastung von Winterweizen durch Trockenstress ab. Der Grund dafür ist, dass die raschere Entwicklung zu einem Wachstum in einer potentiell feuchteren und kühleren Jahreszeit führt, und eine erhöhte Wassernutzungseffizienz durch die verbesserte Verfügbarkeit von CO₂ auftritt. Der Klimawandel führt vor allem aufgrund eines CO₂-Düngungseffekts bei Winterweizen zu teilweise deutlichen Ertragssteigerungen um +4,8% (2025 LOW) bis +12,3% (2050 HIGH).

Sommergerste leidet aufgrund der späteren Entwicklung stärker unter der zunehmenden Aridität, die Trockenstressbelastung nimmt im Zuge des Klimawandels zu. Die Sommergerstenerträge werden daher durch den Klimawandel bei Beibehaltung der wendenden Bodenbearbeitung um -1,9% (2025 HIGH) abnehmen bzw. mit +0,1% (2050 HIGH) stagnieren.

Die Bedeutung der Minimalbodenbearbeitung als Mittel zur Vermeidung von Trockenstress nimmt im Zuge des Klimawandels vor allem vor Sommergerste zu. Für Winterweizen verändert sich die Ertragssteigerung bei Ersatz des Pflugs durch Minimalbodenbearbeitung von +1,4% unter gegenwärtigen Klimabedingungen auf +1,1% (2025 LOW) bis +1,7% (2025 HIGH) unter Bedingungen des Klimawandels. Für Sommergerste beträgt die Ertragssteigerung +2,6% unter gegenwärtigen Klimabedingungen, dieser Wert steigt auf +2,8% (2050 HIGH) bis +3,5% (2025 HIGH) an. Ertragsverluste im Zuge des Klimawandels können bei Sommergerste auf den meisten Böden durch eine Umstellung auf die Minimalbodenbearbeitung vermieden werden.

7 Literaturverzeichnis

- ANKEN (2002): Stickstoffmineralisierung und Nitratauswaschung bei verschiedenen Bestellverfahren. Swiss Federal Research Station for Agricultural Economics and Engineering. www.fat.admin.ch Letzter Zugriff: 30.8.2007
- ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN IN ÖSTERREICH (2004): ALVA-Jahrestagung 2004 zum Thema "Klimawandel - Auswirkungen auf Umwelt und Agrarproduktion". Wien: Österr. Agentur für Gesundheit u. Ernährungssicherheit
- BAHRS, E. (2007): Vortrag am 3.7.2007 im Rahmen des Projektes ADAGIO: Ökonomische Potentiale von Anpassungen an den Klimawandel unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen.
- BARZEGAR, A.R.; ASOODAR, M. A.; KHADISH, A. et al. (2003): Soil physical characteristics and chickpea yield responses to tillage treatment. *Soil & Tillage Research* 71, 49-57
- BENBROOK, C.M. (2004): Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States: The First Nine Years. Technical Paper Number 7. BioTech InfoNet
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (2001): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie. Braunschweig: Eigenverlag
- BUHLER, D. D. (1995): Influence of Tillage Systems on Weed Population Dynamics and Management in Corn and Soybean in the Central USA. *Crop Science* 35. 1247-1258
- BUNDESAMT UND FORSCHUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT/INSTITUT FÜR PFLANZENBAU (1988-2002): Sommergetreide-Sortenversuche. Wien: Eigenverlag
- BUNDESAMT UND FORSCHUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT/INSTITUT FÜR PFLANZENBAU (1988-2002): Wintergetreide-Sortenversuche. Wien: Eigenverlag
- BUNDESANSTALT FÜR BODENWIRTSCHAFT (1993): Bodenkartierung Kartierungsbereich Groß-Enzersdorf. Herausgeber: BMLFUW
- BMLFUW - BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2002): Strategie Österreichs zur Erreichung des Kyoto-Ziels. Klimastrategie 2008/2012. Vom Ministerrat angenommen am 18. Juni 2002. Wien: Eigenverlag
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2005): Grüner Bericht 2005. Wien: Eigenverlag
- BRISSON, N.; GUEVARA E.; MEIRA S. et al. (2001): Response of five wheat cultivars to early drought in the Pampas. *Agronomie* 21. 483-495
- CAJIC, V. (2003): Response of Soybean Yield to climate change using CROPGRO Crop Simulation Model. Wien: Dissertation BOKU
- CAMPBELL SCIENTIFIC (2002): CS615 Water Content Reflectometer User Guide. North Logan, Utah, USA: Eigenverlag
- CEPUDER, P.; KAMMERER, G., KLIK, A. (2005): Applied soil Physics. Praktikum zur landeskulturellen Wasserwirtschaft. Wien: Eigenverlag

- DAVIES, K.; OXLEY, S.; EVANS, A. (2006): Crop Protection in Reduced Tillage Systems. Scottish Agricultural College (SAC) Technical Note 580. www.sac.ac.uk Letzter Zugriff: 29.5.2007
- DIETRICH, R. (2000): Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungssysteme auf den Ertrag, ausgewählte Qualitätsparameter und die Nitratverlagerung im Feldgemüsebau. Wien: Dissertation BOKU
- DUBROVSKY, M. (1996): Validation of the stochastic weather generator Met&Roll. Meteorologické Zpravy 49. 129-138
- DUBROVSKY, M.; NEMESOVA, I.; KALVOVA, J. (2005): Uncertainties in climate change scenarios for the Czech Republic. Climate Research 29. 139-156
- DUFKOVÁ, J.; EITZINGER, J.; ŽALUD, Z. (2002): Climate change impacts on the yield of winter wheat in Marchfeld region. Meteorologický Časopis 2 (ISSN 1335-339X): 3-11.
- EGRAIN - ONLINE BÖRSE FÜR GETREIDE, ÖLSAATEN UND KARTOFFELN (2006): www.egrain.de Letzter Zugriff: 6.6.2007
- EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Stuttgart: Ulmer
- EITZINGER, J. (1991): Einflüsse unterschiedlicher Primärbodenbearbeitungssysteme auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften. Wien: Dissertation BOKU
- EITZINGER, J. (2002): Agrarmeteorologie - Vorlesungsunterlage. Wien: Universität für Bodenkultur (Eigenverlag)
- EITZINGER, J.; ŠTASTNÁ, M.; Žalud, Z. et al. (2003): A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. Agricultural Water Management 61. 195–217
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2005): GAP - Die gemeinsame Agrarpolitik erklärt. Brüssel: Eigenverlag
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION OF THE UNITED NATIONS (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rom: FAO Irrigation and Drainage paper 56
- FINK, J. (1958): Die Bodentypen Niederösterreichs, Maßstab 1:500.000. In: Freytag-Berndt und Artaria: Atlas von Niederösterreich
- FAPRI - FOOD AND AGRICULTURAL POLICY RESEARCH INSTITUTE (2006): U.S. and World Agricultural Outlook. Ames, Iowa: Iowa State University und University of Missouri-Columbia (Hrsg.)
- FOULK, J. A.; BAUER, P.; AKIN, E. D. et al. (2005): Tillage Effects on Cotton and Flax. Clemson University: Proceedings of the Southern Conservation Tillage Systems Conference. 131-139
- FRAZEE, R. W. (2006): No-till is now the "Conventional" Tillage System for Illinois Farmers. University of Illinois Extension. web.extension.uiuc.edu Letzter Zugriff: 29.5.2007
- FREYTAG & BERNDT (2007): Ungarn. Auto und Freizeitkarte. Maßstab: 1:400 000
- GEIGENBERGER, P.; TIESSEN, A.; KOLBE, A. (2003): Regulation von Wachstum und Kohlenhydratspeicherung durch Umweltfaktoren und physiologische Signale. In: Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie (Hrsg.): Jahrbuch 2003.

- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau 2.Auflage. Berlin und Hamburg: Paul Parey Verlag
- GERSTMAYR, M.; LINKE, R.; HÖSCH, J. et al. (2000): Trockenstress induzierte Veränderungen bei zwei *Triticum aestivum*-Sorten: Photochemische Primärreaktion, Gasstoffwechsel und Wasserpotential. Posterbeitrag, Institut für Ökologie und Naturschutz, Univ. Wien
- GOBIET, A.; TRUHETZ, H.; RIEGLER A. (2007): Research for Climate Protection: Model Run Evaluation, A climate scenario for the Alpine region. Graz: Publikation des Wegener Zentrums für Klima und globalen Wandel der Universität Graz
- GÜNTHER, R. (2003): Zur Wasserausnutzung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen. In: Tagungsband der 10. Gumpensteiner Lysimetertagung. 85-89
- HARTGE, K.H.; HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart: Enke
- HESS, J.; FRANKEN, H. (1987): Auswirkungen der Krume- und Unterbodenbearbeitung auf einige Bodeneigenschaften. Mitteilungen der deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 53. 185-190
- HOFMANN, J. (2005): Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf die Bodengesundheit. Wien: Dissertation BOKU
- HUMER, J. (2006): Bodenverbesserung und Erosionsschutz. www.landwirtschaftskammer.at Letzter Zugriff: 17.9.2007
- IDE, G.; HOFMAN, G. (1990): The influence of subsoiling a plough sole on the yield of agricultural crops. *Soil Technology* 3. 259-268
- IWHW - INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, HYDROLOGIE UND KONSTRUKTIVEN WASSERBAU (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. Wien: BMLFUW (Hrsg.)
- HOOGENBOOM, G.; AHUJA, L.; ASCOUGH, J. et al. (2006): Evaluation of the RZWQM-CERES-Maize hybrid model for maize production. *Agricultural Systems* 87. 274–295
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000): IPCC Special Report Emissions Scenarios. Nairobi: Eigenverlag
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001): Third Assessment Report: Climate Change 2001. Cambridge: Cambridge University Press
- JONES, J.W. (1993): Decision support system for agricultural development. In: *System Approaches to agricultural development*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 459-472.
- KLIK, A.; CEPUDER, P.; KAMMERER, G. (2005): Teilprojekt Bodenwasserhaushalt und Erosion im Rahmen des Hauptprojekts Monitoring der Umstellung auf den biologischen Landbau (MUBIL). <http://forschung.boku.ac.at/> Letzter Zugriff: 18.9.2007
- KRÜGER, E. (1987): Von Thaer bis Mitscherlich. Kurzbiographien bedeutender Berliner Agrarwissenschaftler. - Beiträge zur Geschichte der Humboldt-Universität zu Berlin, Nr. 16. Berlin. 68-75
- KOSUTIČ, S.; HUSNJAK, S.; FILIPOVIČ, D. et al. (2001): Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf die Bodenwasserverfügbarkeit im A_p - Horizont eines Albic Luvisol und auf den Ertrag in Nordwest-Slawonien, Kroatien. *Die Bodenkultur* 52(3): 215-223

- KROMP-KOLB, H. (2004): StartClim2004 Endbericht, Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich. Wien: Publikation des Instituts für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur
- KROMP-KOLB, H. und FORMAYER, H. (2005): Schwarzbuch Klimawandel. Wie viel Zeit bleibt uns noch? Salzburg: ecowin Verlag
- KUBU, G.; FORMAYER, H.; HAAS, P. (2005): Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees. Wien: Publikation des Instituts für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur
- KUTSCHERA, L. (1960): Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. Frankfurt am Main: DLG-Verlag
- LARCHER, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen, 5. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag
- LI-COR (2007): LI6400 Brochure. Lincoln, Nebraska, USA: Eigenverlag
- LINKE, R. B.; BOLHÀR-NORDENKAMPF H. R.; MEISTER M. H. (2005): CO₂ enrichment and increasing temperature induce different effects on ontogenesis of *Triticum durum* L. and *Vicia faba* L.. In: Proceedings of the 13th International Congress of Photosynthesis Montreal 2. 970-973.
- MAX PLANCK INSTITUT FÜR BIOGEOCHEMIE (2007): Autökologie der Pflanzen. www.bgc-jena.mpg.de Letzter Zugriff am 8.8.2007
- MONSANTO (2007): Einsparungen von Pflanzenschutzmitteln und Ertragssteigerungen. www.monsanto.de/biotechnologie Letzter Zugriff: 17.9.2007
- MONSANTO (2007): Konservierende Bodenbearbeitung. Entscheidungshilfen für die Praxis. Düsseldorf: Eigenverlag
- MÜLLER, W. (1993): Agroklimatische Kennzeichnung des Marchfelds, Beiheft 3 zu den Jahrbüchern der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Wien: Eigenverlag
- MURER, E.; WAGENHOFER, J.; AIGNER, F. et al. (2005): Die nutzbare Feldkapazität der mineralischen Böden der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs. In: Schriftenreihe BAW 20. 72-78.
- ÖSTERREICHISCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT (1980): Mitteilungen der österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft. Wien: Eigenverlag
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (1988): ÖNORM L 1063. Physikalische Bodenuntersuchungen; Bestimmung der Druckpotential - Wasseranteilsbeziehung von ungestörten Bodenproben. www.oenorm.at/ Letzter Zugriff: 22.9.2007
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (1994): ÖNORM L 1050. Boden als Pflanzenstandort — Begriffsbestimmungen — Untersuchungsverfahren. www.oenorm.at/ Letzter Zugriff: 22.9.2007
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (2002): ÖNORM L 1061-2. Physikalische Bodenuntersuchungen — Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden. www.oenorm.at/ Letzter Zugriff: 22.9.2007

- PABIN, J.; SIENKIEWICZ, J.; WŁODEK, S. (1991): Effect of loosening and compaction on soil physical properties and sugar beet yield. *Soil & Tillage Research* 19. 345-350
- PAGLIALI, M. (1990): Micromorphometric and micromorphological investigations on the effect of compaction by pressures and deformations resulting from tillage and wheel traffic. *Soil & Tillage Research* 16. 31-38
- PAYNE, W. A.; RASMUSSEN, P. E.; CHEN, C. (2001): Assessing Simple Wheat and Pea Models Using Data from a Long Term Tillage Experiment. *Agronomy Journal* 93: 250-260
- PUTZ, R. (1980): Agrarstruktur und deren Veränderungen im Marchfeld und angrenzenden Weinviertel. Wien: Diplomarbeit WU
- RAJARAM (2007): persönliche Mitteilung aus: TRETOWAN, R.; PFEIFFER, W. H.: Challenges and Future Strategies in Breeding Wheat for Adaptation to Drought Stressed Environments. www.cimmyt.org Letzter Zugriff 29.5.2007.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. (1985): Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: JONES, E.B. and WARD, T.J. (Hrsg.), *Proceedings of the Symposium for Watershed Management in the Eighties*. April 30-May 1, 1985, Denver, Colorado. American Society of Civil Engineers, New York. 293-299.
- RISCHBECK, P.M. (2004): Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Bodenwasserhaushalt. Wien: Diplomarbeit BOKU
- RITCHIE, J.; OTTER, S. (1985): Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. In *ARS Wheat Yield Project*. ARS - 38. Natl Tech. Info. Serv., Springfield, Missouri. 159-175.
- RODALE INSTITUTE (2007): Soil regeneration. www.rodaleinstitute.org Letzter Zugriff: 18.9.2007
- RÖTZER, H. (2004): Die Entwicklung der pannonischen Steppenlandschaft und der sie bestimmenden gesellschaftlichen Werthaltungen am Beispiel des österreichischen Marchfeldes. Wien: Dissertation BOKU
- SCHARTOW, M. (1998): Einfluss von Bodenbearbeitung und N-Düngung nach Zwischenfrüchten auf die Ertragsbildung von Silomais. Berlin: Dissertation Humboldt-Univ.
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (1982): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 10. Auflage. Stuttgart: Enke Verlag
- SCHLICHTNER, H. (2003): Untersuchungen über die Wirkungsweisen von konventionellen und konservierenden Verfahrenstechniken im Marktfruchtbau. Wien: Diplomarbeit BOKU
- SOJA, G. (2005): Analyse der Auswirkungen der Trockenheit 2003 in der Landwirtschaft Österreichs - Vergleich verschiedener Methoden; In: ARC Seibersdorf Research (Hrsg.): *Start-Clim2004.C*.
- SOMMER, C.; BRUNOTTE, J.; BILLER, R. H. (1997): Mulchsaat - ein wichtiger Baustein. *LU Journal* 6. 3-6
- STADLER, M.; GREIMEL, M.; HANDLER, F. et al. (2005): Standardisierter Arbeitszeitbedarf in der österreichischen Landwirtschaft; In: *Jahrbuch der österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie*, Band 12, 217-228.

- STREUBING, L. (1965): Pflanzenökologisches Praktikum. Methoden und Geräte zur Bestimmung wichtiger Standortsfaktoren. Berlin: Parey
- STATISTIK AUSTRIA (2001, 2003 und 2005): Gemeindedaten www.statistik.at/blickgem Letzter Zugriff: 6.6.2007
- STOCKLE, C. O.; DUGAS W. A. (1992): Evaluating canopy- temperature based indices for irrigation scheduling. *Irrigation Science* 13: 31-37
- TAIZ, L.; ZEIGER E. (2006): *Plant Physiology*, 4th edition. Sunderland, USA: Sinauer Associates, Inc.
- TSUJI, G.; GORO U.; SHARON B. (1994): DSSAT v3. Honolulu, Hawaii, USA: University of Hawaii (Hrsg.)
- UMWELTBUNDESAMT (2007): Treibhausgasemissionen in Österreich 1990–2005. Wien: Eigenverlag
- VERMA, V.; FOULKES M. J.; WORLAND, A. J. (2004): Mapping quantitative trait loci for flag leaf senescence as a yield determinant in winter wheat under optimal and drought-stressed environments. *Euphytica* 135. 255-263.
- WAGENTRISTL, H. (1998): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Wachstum und Entwicklung von Zuckerrüben und deren Wurzeln im pannonischen Klimaraum. Wien: Dissertation BOKU

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Bevölkerungs- und Agrarstatistik Marchfeld	15
Tabelle 2.1: Porenvolumen in Mineralböden und organischen Böden	22
Tabelle 2.3: Transpirationskoeffizienten wichtiger Kulturpflanzen	39
Tabelle 4.1: Angaben aus der Bodenkartierung zum Standort Raasdorf	52
Tabelle 4.3: In Atmosphäre und Boden am Standort Raasdorf gemessene meteorologische Parameter	54
Tabelle 4.5: Klassengrenzen entsprechend der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums	59
Tabelle 4.7: Faktoren für die Berechnung der bodenphysikalischen Parameter der Pflugvariante	60
Tabelle 4.9: Genetische Parameter der Winterweizensorte Capo für DSSAT/CERES	63
Tabelle 4.10: Genetische Parameter der Sommergerstensorte Magda für DSSAT/CERES	65
Tabelle 5.1: Kennwerte des Bodenwasserhaushalts und nutzbare Feldkapazität in Volumsprozent am Standort Raasdorf	75
Tabelle 5.2: Monatsmittelwerte der Temperatur und Monatssummen der Niederschläge während der Wachstumsperiode von Getreide am Standort Raasdorf	77
Tabelle 5.3: Das durchschnittliche pflanzenverfügbare Bodenwasser im Wurzelraum während der Wachstumsperiode von Winterweizen (2002 und 2003) und Sommergerste (2004) und dessen relative Zunahme durch Minimalbodenbearbeitung	81
Tabelle 5.4: Ergebnisse von einfaktorierter Varianzanalyse und zwei Stichproben t-Test auf Unterschiede im Trockenmasseertrag aufgrund der Intensität der Bodenbearbeitung	84
Tabelle 5.5: Die Veränderung der Phänologie von Winterweizen durch den Klimawandel	86
Tabelle 5.6: Trockenstressfaktor für das Wachstum (WFGD) bei Winterweizen	92
Tabelle 5.7: Einfluss der Faktoren Bodenklasse, Bodenbearbeitung und Klimaänderung (Szenario HadCM3) auf die mittleren simulierten Erträge bzw. Standardabweichungen von Winterweizen	94
Tabelle 5.8: Die Veränderung der Phänologie von Sommergerste durch den Klimawandel	100
Tabelle 5.9: Trockenstressfaktor für das Wachstum (WFGD) bei Sommergerste	105
Tabelle 5.10: Einfluss der Faktoren Bodenklasse, Bodenbearbeitung und Klimaänderung (Szenario HadCM3) auf die mittleren simulierten Erträge bzw. Standardabweichungen von Sommergerste	108

Tabelle 5.11: Relative Ertragsänderungen (%) bei Ersetzen des Pflugs durch Minimalbodenbearbeitung unter gegenwärtigen Klimabedingungen (1971-2005) bei Winterweizen und Sommergerste	108
Tabelle 8.1: Ertragsergebnisse eines mehrfaktoriellen (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) Feldversuchs am Standort Raasdorf	126

Abbildungsverzeichnis

1.1: österreichischer Erzeugerpreis für Weichweizen	13
2.1: Bodenkarte Marchfeld 1:500.000	18
2.2: Relative Häufigkeiten der Dauer von Dürreperioden in der Vegetationsperiode	19
2.3: Klimadiagramm Obersiebenbrunn	20
2.4: Vereinfachte Wasserbilanz und gravimetrische Bodenwassergehalte	21
2.5: Typische pF-Kurven für verschiedene Böden	24
2.6: Schema der Bodenbearbeitung	29
2.7: Wasserspannungs-Wasseranteilsbeziehung der Bearbeitungsvarianten in Mistelbach	31
2.8: Die Infiltration von gefärbtem Wasser in einen minimal bearbeiteten und in einem gepfügten Boden	32
2.9: Die Einarbeitung von organischem Material bei der Bodenbearbeitung	34
2.10: Penetrometerwiderstand über die Bodentiefe	36
2.11: Die Transpiration eines Laubblatts	38
2.12: Relative Häufigkeit von Sommer- bzw. Tropentagen in Wien	43
2.13: Relative Häufigkeit der Niederschlagstagesummen für Wien	44
2.14: Schema der Temperaturabhängigkeit von Photosynthese und Atmung	45
4.1: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Wasserspannungs-Wasseranteilskurve	49
4.2: Bodenprofil eines Tschernosems in Raasdorf	51
4.3: Schematischer Versuchsplan für Raasdorf	54
4.4: TDR-Sensor CS616	55
4.5: Die nutzbare Feldkapazität der landwirtschaftlichen Böden im Marchfeld (nach Murer 2005)	58
4.6: Repräsentative Bodenprofile für die 5 Bodenklassen	60
4.7: Kalibration und Validierung des Blühzeitpunkts der Winterweizensorte Capo	62
4.8: Kalibration des Ertrags der Winterweizensorte Capo	62
4.9: Kalibration von Blühzeitpunkt und Ertrag der Sommergerstensorte Magda	65
4.10: Veränderung der mittleren monatlichen Temperaturmaxima und -minima für die Periode 2015 - 2035 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit den Modellen CSIRO, HadCM3 und ECHAM5	66
4.11: Relative Veränderung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2015 - 2035 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit den Modellen CSIRO und HadCM3	66

4.12: Relative Veränderung der mittleren monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2015 - 2035 im Vergleich zur Referenzperiode berechnet mit dem Modell ECHAM5	67
4.13: Veränderung der mittleren monatlichen Temperaturmaxima und -minima für die Periode 2040 - 2060 im Vergleich zur Referenzperiode, berechnet mit den Modellen CSIRO, HadCM3 und ECHAM5	68
4.14: Relative Veränderung der monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2040 - 2060 im Vergleich zur Referenzperiode, berechnet mit den Modellen CSIRO und HadCM3	69
4.15: Relative Veränderung der monatlichen Niederschlagsmengen für die Periode 2040 - 2060 im Vergleich zur Referenzperiode, berechnet mit dem Modell ECHAM5 (erstellt von Martin Dubrovsky)	69
5.1: Körnungslinien am Standort Raasdorf im Ober- und Unterboden	74
5.2: Druckpotential-Wasseranteilsbeziehung am Standort Raasdorf im Oberboden	76
5.3: Druckpotential-Wasseranteilsbeziehung am Standort Raasdorf im Unterboden	76
5.4: Temperatur und Niederschläge von Frühjahr bis Sommer 2002, 2003 und 2004 am Versuchsstandort Raasdorf	77
5.5: Bodenwassergehalte im Oberboden unter Winterweizen/Vorfrucht Mais (2002 & 2003) bzw. unter Sommergerste nach Zwischenfrucht (2004)	78
5.6: Bodenwassergehalte im Unterboden unter Winterweizen/Vorfrucht Mais (2002 & 2003) bzw. unter Sommergerste nach Zwischenfrucht (2004)	78
5.7: Bodenwassergehalte (C-Probe Methode) im Oberboden unter Winterweizen/Vf. Mais im Jahr 2002; Vergleich der minimal bodenbearbeiteten Variante mit der gepflügten Variante	79
5.8: Differenz der Bodenwassergehalte in 20 cm Tiefe zwischen minimal bodenbearbeiteter und gepflügter Variante	80
5.9: Das pflanzenverfügbare Wasser im Wurzelraum am Standort Raasdorf bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung	82
5.10: Kornerträge von Winterweizen nach Mais und nach Getreide bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung	83
5.11: Kornerträge von Sommergerste nach Zwischenfrucht bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung	83
5.12: Die Veränderung der Zeitpunkte von Saat, Blüte und Reife bei Winterweizen unter dem Einfluss der Faktoren Klimawandel, Bodenklassen und Bodenbearbeitung	85
5.13: Gegenüberstellung von potentieller und aktueller Evapotranspiration bei Winterweizen	87
5.14: Jährliche relative Wasserbilanzen für Winterweizenbestand bei Herbstpflugfurche	89
5.15: Jährliche relative Wasserbilanzen für Winterweizenbestand bei Minimalbodenbearbeitung	90
5.16: Simulierte Transpirationskoeffizienten von Winterweizen	93

5.17: Histogramme und Normalverteilungen der Winterweizenerträge im Marchfeld	94
5.18: Relative Ertragsänderung der Winterweizensorte Capo für das HadCM3 Szenario 2025 im Marchfeld	98
5.19: Relative Ertragsänderung der Winterweizensorte Capo für das HadCM3 Szenario 2050 im Marchfeld	99
5.20: Die Veränderung der Zeitpunkte von Saat, Blüte und Reife bei Sommergerste unter dem Einfluss der Faktoren Klimawandel, Bodenklassen und Bodenbearbeitung	101
5.21: Jährliche relative Wasserbilanzen für Sommergerstenbestand bei Herbstpflugfurche	103
5.22: Jährliche relative Wasserbilanzen für Sommergerstenbestand bei Minimalbodenbearbeitung	104
5.23: Simulierte Transpirationskoeffizienten von Sommergerste	106
5.24: Histogramme und Normalverteilungen der Sommergerstenerträge im Marchfeld	107
5.25: Relative Ertragsänderung der Sommergerstensorte Magda für das HadCM3 Szenario 2025 im Marchfeld	110
5.26: Relative Ertragsänderung der Sommergerstensorte Magda für das HadCM3 Szenario 2050 im Marchfeld	111
8.1: Zusammenstellung der Parameter der für die Simulation mit DSSAT/CERES verwendeten Bodenklassen (Teil 1)	127
8.2: Zusammenstellung der Parameter der für die Simulation mit DSSAT/CERES verwendeten Bodenklassen (Teil 2)	128
8.3: Zusammenstellung der Parameter der für die Simulation mit DSSAT/CERES verwendeten Bodenklassen (Teil 3)	129
8.4: Beispielfile für die Simulation von Winterweizen (Teil 1)	130
8.5: Beispielfile für die Simulation von Winterweizen (Teil 2)	131
8.6: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 1	132
8.7: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 1	133
8.8: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 2	134
8.9: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 2	135
8.10: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 3	136
8.11: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 3	137
8.12: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 4	138

8.13: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 4	139
8.14: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 5	140
8.15: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 5	141
8.16: Beispielfile für die Simulation von Sommergerste (Teil 1)	142
8.17: Beispielfile für die Simulation von Sommergerste (Teil 2)	143
8.18: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 1	144
8.19: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 1	145
8.20: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 2	146
8.21: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 2	147
8.22: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 3	148
8.23: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 3	149
8.24: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 4	150
8.25: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 4	151
8.26: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 5	152
8.27: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 5	153

8 Anhang

Tabelle 8.1: Ertragsergebnisse (TM) eines mehrfaktoriellen (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) Feldversuchs am Standort Raasdorf (siehe Kapitel 5.2.5)

	Winterweizen (nach Mais)	Winterweizen (nach Getreide)	Sommergerste (nach Zwischenfrucht)
2002			
Pflug/Stabw.	4243/548	3581/217	3930/143
Grubber/Stabw.	4624/211	4186/104	4413/177
Direktsaat/Stabw.	4139/164	3500/528	4367/345
2003			
Pflug/Stabw.	3049/399	3845/142	2772/343
Grubber/Stabw.	3160/522	3395/227	3218/126
Direktsaat/Stabw.	3224/255	3293/255	3563/106
2004			
Pflug/Stabw.	4875/128	4863/294	4741/524
Grubber/Stabw.	4912/202	5248/249	5028/238
Direktsaat/Stabw.	5440/202	5008/315	4825/358

*MERA060001		Rischbeck	SIL	150	Tscherntosem	Raasdorf	PfTug										
@SITE	COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY										
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMBH	SMPX	SMKE								
G	0.13	9.7	0.30	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001								
@SLB	SLMH	SLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SCEC	TEXT		
5	AP	0.230	0.380	0.530	1.000	11.96	1.25	3.00	25.0	55.0	0.0	7.5	7.3	6.0	TU		
15	AP	0.230	0.380	0.530	1.000	4.41	1.25	3.00	25.0	55.0	0.0	7.5	7.3	6.0	TU		
30	AP	0.210	0.326	0.530	1.000	4.41	1.25	3.00	25.0	55.0	0.0	7.5	7.3	6.0	TU		
45	A2	0.223	0.338	0.450	0.407	0.18	1.45	2.20	24.0	50.0	0.0	7.5	7.4	6.0	SL		
90	AC	0.203	0.308	0.450	0.259	0.18	1.42	0.80	24.0	50.0	0.0	7.5	7.7	6.0	SL		
150	C	0.159	0.231	0.410	0.000	0.68	1.50	0.30	5.0	15.0	0.0	7.5	7.9	6.0	S		
*MERA060002		Rischbeck	SIL	150	Tscherntosem	Raasdorf	Mint										
@SITE	COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY										
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMBH	SMPX	SMKE								
G	0.13	9.7	0.30	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001								
@SLB	SLMH	SLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SCEC	TEXT		
15	AP	0.270	0.440	0.500	1.000	1.00	1.40	3.00	25.0	55.0	0.0	7.5	7.3	6.0	TU		
30	AP	0.270	0.446	0.500	0.800	0.18	1.40	3.00	25.0	55.0	0.0	7.5	7.3	6.0	TU		
45	A2	0.193	0.318	0.500	0.407	0.18	1.45	2.20	24.0	50.0	0.0	7.5	7.4	6.0	SL		
90	AC	0.213	0.378	0.500	0.110	0.18	1.42	0.80	24.0	50.0	0.0	7.5	7.7	6.0	SL		
150	C	0.159	0.231	0.500	0.000	0.68	1.50	0.30	5.0	15.0	0.0	7.5	7.9	6.0	S		
*MEMF070001		Murer	SL	100	Bodenklassen	Marchfeld											
@SITE	COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY										
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMBH	SMPX	SMKE								
G	0.13	9.7	0.50	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001								
@SLB	SLMH	SLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SCEC	TEXT		
10	AP1	0.095	0.304	0.364	0.750	2.59	1.50	2.10	11.3	28.4	24.2	6.1	7.3	7.5	TS		
20	AP2	0.095	0.304	0.364	0.600	2.59	1.50	2.10	11.3	28.4	24.2	6.1	7.3	7.5	TS		
40	AC	0.031	0.065	0.129	0.100	2.59	1.94	0.80	11.3	28.4	70.5	6.1	7.4	7.5	TS		
70	CI	0.014	0.030	0.065	0.000	2.59	2.04	0.30	11.3	28.4	84.3	6.1	7.7	7.5	TS		
100	C2	0.014	0.030	0.065	0.000	2.59	2.05	0.20	11.3	28.4	84.3	6.1	7.9	7.5	TS		
*MEMF070002		Murer	L	100	Bodenklassen	Marchfeld											
@SITE	COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY										
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMBH	SMPX	SMKE								
G	0.13	9.7	0.40	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001								
@SLB	SLMH	SLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SCEC	TEXT		
10	AP1	0.152	0.363	0.487	1.000	1.32	1.47	1.90	15.6	34.2	0.3	6.9	7.3	7.3	SL		
20	AP2	0.152	0.363	0.487	0.800	1.32	1.47	1.90	15.6	34.2	0.3	6.9	7.3	7.3	SL		
40	AC	0.152	0.332	0.435	0.480	1.32	1.47	1.80	16.6	34.4	0.5	6.9	7.4	7.4	SL		
70	CI	0.152	0.267	0.290	0.100	1.32	1.60	0.90	15.5	33.0	34.5	6.9	7.7	7.4	SL		
100	CI	0.014	0.030	0.065	0.000	2.59	2.01	0.10	14.0	32.4	71.5	6.9	7.9	7.9	TS		

Abbildung 8.1: Zusammenstellung der Parameter der für die Simulation mit DSSAT/CERES verwendeten Bodenklassen (Teil 1)

*MEMF070003 Murrer L 100 Bodenklassen Marchfeld														
@SITE	Raasdorf		COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY	3 mini (140-220mm)				
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB
G	0.13	9.7	0.40	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA TEXT
10	AP1	0.220	0.453	0.551	1.000	1.32	1.44	2.50	19.7	48.2	0.0	7.3	7.3	12.4 SL
20	AP2	0.220	0.453	0.551	0.800	1.32	1.44	2.50	19.7	48.2	0.0	7.3	7.3	12.4 SL
40	AC	0.206	0.406	0.488	0.800	0.68	1.42	2.30	20.1	50.0	0.1	7.3	7.4	13.8 SL
70	CI	0.206	0.379	0.450	0.150	1.32	1.54	1.50	21.7	47.8	1.2	7.5	7.7	20.7 SL
100	CI	0.206	0.379	0.450	0.130	1.32	1.65	0.60	15.6	48.7	4.7	7.7	7.9	23.8 SL
*MEMF070004 Murrer SIL 100 Bodenklassen Marchfeld														
@SITE	Raasdorf		COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY	4 mini (220-300mm)				
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB
G	0.13	9.7	0.30	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA TEXT
10	AP1	0.204	0.459	0.535	1.000	0.68	1.40	2.20	16.5	60.4	0.0	7.5	7.3	17.1 1U
20	AP2	0.204	0.459	0.535	0.800	0.68	1.40	2.20	16.5	60.4	0.0	7.5	7.3	17.1 1U
40	AC	0.178	0.406	0.458	0.480	0.68	1.42	1.70	17.0	62.2	0.0	7.6	7.4	18.7 1U
70	CI	0.158	0.385	0.458	0.150	0.68	1.46	0.80	15.2	64.5	0.0	7.7	7.7	26.8 1U
100	CI	0.158	0.385	0.458	0.130	0.68	1.49	0.50	13.7	64.3	0.3	7.7	7.9	28.0 1U
*MEMF070005 Murrer SL 150 Bodenklassen Marchfeld														
@SITE	Raasdorf		COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY	5 mini (>300mm)				
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB
G	0.13	9.7	0.40	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA TEXT
10	AP1	0.100	0.320	0.445	1.000	2.59	1.35	1.30	12.0	36.0	0.0	7.4	7.3	12.3 1S
20	AP2	0.100	0.320	0.445	0.800	2.59	1.35	1.30	12.0	36.0	0.0	7.4	7.3	12.3 1S
40	AC	0.103	0.318	0.413	0.480	1.32	1.38	1.00	12.0	38.5	1.0	7.5	7.4	12.8 1S
70	CI	0.103	0.330	0.450	0.150	1.32	1.46	0.60	12.0	41.0	2.0	7.5	7.7	13.2 1S
100	CI	0.103	0.355	0.450	0.130	1.32	1.49	0.90	16.0	41.0	0.7	7.4	7.9	10.1 SL
150	CI	0.103	0.355	0.450	0.100	1.32	1.49	0.90	16.0	41.0	0.7	7.4	7.9	10.1 SL
*MEMF070006 Murrer SL 100 Bodenklassen Marchfeld														
@SITE	Raasdorf		COUNTRY	AUSTRIA	LAT	48.200	LONG	16.550	SCS FAMILY	1 pflug (unter 60mm)				
@SCOM	SALB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB	SMB
G	0.13	9.7	0.50	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001	IB001
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA TEXT
5	AE1	0.080	0.252	0.419	0.750	13.00	1.28	1.90	11.3	28.4	24.2	6.1	7.3	1S
10	AP1	0.084	0.266	0.400	0.750	6.48	1.33	1.90	11.3	28.4	24.2	6.1	7.3	1S
20	AP2	0.084	0.266	0.400	0.650	6.48	1.33	1.90	11.3	28.4	24.2	6.1	7.3	1S
40	AC	0.031	0.065	0.129	0.100	2.59	1.94	0.80	11.3	28.4	70.5	6.1	7.4	1S
70	CI	0.014	0.030	0.065	0.000	2.59	2.04	0.30	11.3	28.4	84.3	6.1	7.7	1S
100	CI	0.014	0.030	0.065	0.000	2.59	2.05	0.20	11.3	28.4	84.3	6.1	7.9	1S

Abbildung 8.2: Zusammenstellung der Parameter der für die Simulation mit DSSAT/CERES verwendeten Bodenklassen (Teil 2)

*MEMF070007															
@SITE	Murer	L	100	Bodenk	Jassen	Marchfeld									
COUNTRY	AUSTRIA														
RAASDORF	48.200	16.550	KLASSE 2	pflug											
@SCOM	SLRB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE						
G	0.13	9.7	0.40	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001						
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA	TEXT
5	AE1	0.128	0.301	0.560	1.000	6.60	1.25	1.70	15.6	34.2	0.3	6.9	7.3	SL	
10	AP1	0.135	0.317	0.536	1.000	3.30	1.30	1.70	15.6	34.2	0.3	6.9	7.3	SL	
25	AP2	0.135	0.317	0.536	0.900	3.30	1.30	1.70	15.6	34.2	0.3	6.9	7.3	SL	
40	AC	0.152	0.332	0.435	0.480	1.32	1.47	1.80	16.6	34.4	0.5	6.9	7.4	SL	
70	CI	0.152	0.267	0.290	0.100	1.32	1.60	0.90	15.5	33.0	0.5	6.9	7.7	SL	
100	CI	0.014	0.030	0.065	0.000	2.59	2.01	0.10	14.0	32.4	71.5	6.9	7.9	TS	
*MEMF070008															
@SITE	Murer	L	100	Bodenk	Jassen	Marchfeld									
COUNTRY	AUSTRIA														
RAASDORF	48.200	16.550	KLASSE 3	pflug											
@SCOM	SLRB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE						
G	0.13	9.7	0.40	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001						
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA	TEXT
5	AE1	0.185	0.376	0.634	1.000	6.60	1.22	2.25	19.7	48.2	0.0	7.3	7.3	SL	
10	AP1	0.195	0.396	0.606	1.000	3.30	1.28	2.25	19.7	48.2	0.0	7.3	7.3	SL	
25	AP2	0.195	0.396	0.606	0.900	3.30	1.28	2.25	19.7	48.2	0.0	7.3	7.3	SL	
40	AC	0.206	0.406	0.488	0.480	0.68	1.42	2.30	21.1	50.0	0.1	7.3	7.4	SL	
70	CI	0.206	0.379	0.450	0.150	1.32	1.54	1.50	20.7	47.8	1.2	7.5	7.7	SL	
100	CI	0.206	0.379	0.450	0.130	1.32	1.65	0.60	15.6	48.7	4.7	7.7	7.9	SL	
*MEMF070009															
@SITE	Murer	SIL	100	Bodenk	Jassen	Marchfeld									
COUNTRY	AUSTRIA														
RAASDORF	48.200	16.550	KLASSE 4	pflug											
@SCOM	SLRB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE						
G	0.13	9.7	0.30	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001						
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA	TEXT
5	AE1	0.175	0.384	0.615	1.000	3.36	1.19	2.00	16.5	60.4	0.0	7.5	7.3	SL	
10	AP1	0.183	0.404	0.589	1.000	1.68	1.25	2.00	16.5	60.4	0.0	7.5	7.3	SL	
25	AP2	0.183	0.404	0.589	0.900	1.68	1.25	2.00	16.5	60.4	0.0	7.5	7.3	SL	
40	AC	0.178	0.406	0.458	0.480	0.68	1.38	1.70	17.0	62.2	0.0	7.6	7.4	SL	
70	CI	0.158	0.385	0.458	0.150	0.68	1.46	0.80	15.2	64.5	0.0	7.7	7.7	SL	
100	CI	0.158	0.385	0.458	0.130	0.68	1.49	0.50	13.7	64.3	0.3	7.7	7.9	SL	
*MEMF070010															
@SITE	Murer	SL	150	Bodenk	Jassen	Marchfeld									
COUNTRY	AUSTRIA														
RAASDORF	48.200	16.550	KLASSE 5	pflug											
@SCOM	SLRB	SLUI	SLDR	SLRO	SLNF	SLPF	SMHB	SMPX	SMKE						
G	0.13	9.7	0.40	76.0	1.00	1.00	IB001	IB001	IB001						
@SLB	SLMH	SLLL	SDUL	SSAT	SRGF	SSKS	SBDM	SLOC	SLCL	SLSI	SLCF	SLHW	SLHB	SLCA	TEXT
5	AE1	0.084	0.267	0.512	1.000	13.00	1.15	1.17	12.0	36.0	0.0	7.4	7.3	SL	
10	AP1	0.089	0.280	0.490	1.000	6.50	1.20	1.17	12.0	36.0	0.0	7.4	7.3	SL	
25	AP2	0.089	0.280	0.490	0.900	6.50	1.20	1.17	12.0	36.0	0.0	7.4	7.3	SL	
40	AC	0.103	0.318	0.413	0.480	1.32	1.38	1.00	12.0	38.5	1.0	7.5	7.4	SL	
70	CI	0.103	0.330	0.450	0.130	1.32	1.46	0.60	12.0	41.0	2.0	7.5	7.7	SL	
100	CI	0.103	0.355	0.450	0.130	1.32	1.49	0.90	16.0	41.0	0.7	7.4	7.9	SL	
150	CI	0.103	0.355	0.450	0.100	1.32	1.49	0.90	16.0	41.0	0.7	7.4	7.9	SL	

Abbildung 8.3: Zusammenstellung der Parameter der für die Simulation mit DSSAT/CERES verwendeten Bodenklassen (Teil 3)

```

*EXP.DETAILS: FE2H1101SQ FU
*GENERAL
@PEOPLE
Pablo & Sabina
@ADDRESS
MET BOKU
@SITE
Marchfeld: Winterweizen x K1maszenarten x Boden x Bodenbearbeitung
*TREATMENTS
@N R O C TNAME..... CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
1 1 1 0 ECHAM A2 2025 high 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1
*FACTOR LEVELS-----
*CULTIVARS
@C CR INGENO CNAME
1 WH IB1511 Capu
*FIELDS
@L ID_FIELD WSTA.... FL SA FLOB FLOD FLDT FLDD FLDS FLST SLTX SLDP ID_SOIL FLNAME
1 FUCH0001 FE2H -99 -99 DR000 0 0 0 SL 150 MEMF070010 Bodenk lassen Marchfeld
@L .....XCRD .....YCRD .....ELEV .....AREA .SLEN .FLWR .SLAS
1 48.192 16.748 149 -99 -99 -99
*SOIL ANALYSIS
@A SADAT SMHB SMPX SMKE SANAME
1 50283 SA011 SA001 SA001 -99
*INITIAL CONDITIONS
@C PCR ICDDAT ICRT ICND ICRN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP IC RIP ICRID ICNAME
1 AL 11283 0 0 0 0 -99 1940 3.3 0 100 25 -99
@C ICBL SH2O SNH4 SNO3
1 5 .224 1 4.2
1 15 .224 1 4.2
1 30 .171 1 3.6
1 45 .18 1 1.3
1 90 .177 .5
1 150 .125 .5
*PLANTING DETAILS
@P PDATE EDATE PPOP PROE PLME PLDS PLRS PLRD PLDP PLWT PAGE PENV PLPH SPRL
1 11283 11288 350 330 S R 12 15 3 -99 -99 -99 -99
*IRRIGATION AND WATER MANAGEMENT
@I EFIR IDEP ITHR IEPT IOFF IAME IAMT IRNAME
1 1 30 50 100 G5000 IR001 10 -99

```

Abbildung 8.4: Beispielfile für die Simulation von Winterweizen (Teil 1)

```

*FERTILIZERS (INORGANIC)
@F FDATE FMCD FACD FDEP FAMN FAMP FANK FAMC FAMO FOCF FERNAME
1 11274 FE016 AP002 0 0 45 -99 -99
1 12095 FE001 AP001 0 40 25 0 -99 -99
1 12115 FE001 AP001 0 41 0 0 -99 -99

*RESIDUES AND ORGANIC FERTILIZER
@R RDATE RCOD RAMT RESN RESP RESK RINP RDEP RMET RENAME
1 50277 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99

*CHEMICAL APPLICATIONS
@C CDATE CHCOD CHAMT CHME CHDEP CHT.,CHNAME
1 50277 -99 -99 -99 -99 -99

*TILLAGE AND ROTATIONS
@T TDATE TIMPL TDEP TNAME
1 11274 T1005 25 -99

*ENVIRONMENT MODIFICATIONS
@E ODATE EDAY ERAD EMAX EMIN ERRAIN ECO2 EDEW EWIND ENVNAME
1 11215 A 0 A 0 A 0 A 0 A 0.0 A 108 A 0 A 0

*HARVEST DETAILS
@H HDATE HSTG HCOM HSIZE HPC HBPC HNAME
1 12202 G5006 H A 100 -99 WHEAT

*SIMULATION CONTROLS
@N GENERAL NYERS NREPS START SDATE RSEED SNAME.....
1 GE 98 1 5 11273 2150 DEFAULT SEQUENTIAL SIMULATION CONTROL
@N OPTIONS WATER NITRO SYMBI PHOSP POTAS DISES CHEM TILL
1 OP Y Y Y Y N N Y
@N METHODS WTHFR INCON LIGHT EVAPO INFIL PHOTO HYDRO NSWIT MESOM
1 ME M M E F R C R 1 G
@N MANAGEMENT PLANT IRRIG FERTI RESID HARVS
1 MA A N R N M
@N OUTPUTS FNAME OVVEW SUMRY FROPT GROUT CAOUT WAOUT NIOUT MIOUT DIOUT LONG CHOUT OPOUT
1 OU Y Y Y 1 Y Y Y Y Y Y N Y N

@ AUTOMATIC MANAGEMENT
@N PLANTING PFRST PLAST PH2OL PH2OU PH2OD PSTMX PSTMN
1 PL 11270 10330 10 85 10 15 5
@N IRRIGATION IMDEP ITHRL ITHRU IROFF IMETH IRAMT IREFF
1 IR 30 50 100 G5000 IR001 10 1
@N NITROGEN NMDEP NMTHR NAMNT NCODE NAOFF
1 NI 0 50 25 FE001 G5000
@N RESIDUES RIPCN RTIME RIDEP
1 RE 100 1 20
@N HARVEST HFRST HLAST HPCNP HPCNR
1 HA 0 00001 100 0
    
```

Abbildung 8.5: Beispielfile für die Simulation von Winterweizen (Teil 2)

Winterweizen Minimalbodenbearbeitung	Saet		Elite		Reife		Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP		E	Abf.	Drain.	WUE PII		WUE F		WUE PII		Koeff.	Wstress Photos.	Wstress Wachstum	Etpot	ETakt/ ETpot
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag	mm	mm		mm	mm				mm	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹								
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	191	3227	431	101	330	9	84	84	36.6	7.5	43.3	312.3	23.6	25.5	730	0.59					
Std. Abw.	8	6	6	716	46	28	37	6	40	41.6	1.6	64.6	56.9	47									
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	285	149	182	3090	418	78	340	9	93	40.5	7.4	46.8	250.9	22.0	23.7	773	0.54						
Std. Abw.	10	4	4	747	55	25	46	6	42	5.1	1.6	6.6	34.7	56									
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	281	153	186	3230	432	87	345	10	91	38.6	7.5	44.2	267.3	22.3	24.0	754	0.57						
Std. Abw.	8	5	5	770	47	28	39	6	40	6.6	1.4	8.0	49.4	43									
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	145	177	3096	422	66	356	11	101	48.9	7.3	56.9	211.6	18.2	19.6	817	0.52						
Std. Abw.	9	5	4	827	56	21	52	6	49	9.6	1.6	12.5	38.7	93									
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	281	151	185	3322	408	78	329	9	95	44.7	8.2	50.9	233.6	20.9	22.5	762	0.53						
Std. Abw.	8	6	5	801	44	27	37	6	37	9.7	1.6	12.1	49.6	48									
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	286	149	182	3146	406	79	327	8	90	40.6	7.7	46.4	250.7	21.1	22.8	775	0.52						
Std. Abw.	11	4	4	761	53	25	44	5	43	5.2	1.6	6.5	34.9	10.7	11.2	79							
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	281	153	187	3243	426	88	338	8	87	38.3	7.7	43.7	269.0	22.2	23.9	749	0.57						
Std. Abw.	8	5	5	777	47	29	39	5	39	6.5	1.5	7.8	49.8	11.2	11.7	76							
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	290	146	178	3197	393	69	324	8	94	48.6	8.1	55.6	212.8	17.3	18.7	805	0.49						
Std. Abw.	11	7	6	744	42	22	36	5	44	9.1	1.6	11.8	39.8	11.2	11.7	82							
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	282	151	185	3405	401	81	320	8	93	44.6	8.5	50.5	234.2	20.7	22.2	760	0.53						
Std. Abw.	9	6	5	727	45	26	36	5	37	9.6	1.6	11.8	48.6	11.3	11.7	76							
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	287	148	180	3119	407	79	328	7	83	40.6	7.7	46.4	251.2	21.4	23.1	795	0.51						
Std. Abw.	11	4	4	743	52	25	42	4	41	5.4	1.6	6.7	36.7	9.8	10.3	48							
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	3218	426	87	339	8	85	38.5	7.6	43.9	267.9	22.8	24.5	762	0.56						
Std. Abw.	8	5	5	767	47	28	38	5	39	6.6	1.4	7.9	49.0	10.5	10.9	31							
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	293	144	176	3143	395	68	327	7	86	48.0	7.9	54.9	214.3	18.3	19.8	847	0.47						
Std. Abw.	11	8	7	732	43	21	36	5	42	8.4	1.6	10.7	36.4	10.1	10.5	59							
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	283	150	183	3351	399	78	321	8	89	45.1	8.4	51.1	231.7	21.0	22.5	774	0.52						
Std. Abw.	8	5	5	703	44	25	36	5	36	9.8	1.6	12.0	48.6	10.3	10.7	48							

Abbildung 8.6: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 1

Winterweizen Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM)	ETP	T	E	Abt.	Drain.	WUE Pfl	WUE F	WUE Pfl	Tkoef.	Wstress	Wstress	Elpot	ETakt/ ETpot
	jul. Tag	jul. Tag	jul. Tag	kg ha ⁻¹	mm	mm	mm	mm	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	kg ha ⁻¹ ETP ⁻¹	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	lg ⁻¹	Jahressum.	Jahressum.	mm	%
Bodenklasse 1																	
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	3014	423	92	332	4	97	36.8	7.1	44.1	303.4	23.0		730	0.58
Std Abw	8	5	5	718	46	27	38	4	42	34.4	1.6	57.5	54.0			43	
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	284	149	182	2841	413	70	343	4	109	42.0	6.9	49.3	243.5	21.0		777	0.53
Std Abw	9	6	5	753	54	24	46	3	46	5.7	1.6	7.6	39.2			53	
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	281	153	186	3020	422	77	345	5	104	40.7	7.2	47.3	253.2	22.1		753	0.56
Std Abw	8	5	5	774	46	27	39	3	43	6.9	1.5	8.6	47.4			45	
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	145	177	2883	414	58	356	5	114	51.6	6.9	61.0	200.0	17.5		817	0.51
Std Abw	9	5	4	838	55	20	52	4	52	9.8	1.7	13.1	35.9			92	
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	281	151	184	3143	401	70	330	4	109	47.5	7.9	54.8	220.1	20.9		764	0.52
Std Abw	8	5	5	781	43	26	37	4	40	10.3	1.6	13.6	47.6			45	
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	286	149	182	2903	401	71	330	3	104	42.0	7.2	48.9	242.4	19.8		774	0.52
Std Abw	11	5	4	768	53	24	44	3	46	5.3	1.6	7.2	34.8	10.2		10.8	77
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	282	153	187	3047	418	78	339	4	102	40.3	7.3	46.6	255.6	21.6		750	0.56
Std Abw	8	5	5	783	47	27	39	3	43	6.8	1.5	8.5	47.5	10.9		76	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	290	145	178	2944	388	60	328	3	108	51.3	7.6	59.7	201.3	16.7		805	0.48
Std Abw	10	5	4	745	42	20	36	3	46	9.4	1.6	13.0	36.6	11.9		81	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	281	151	185	3205	393	72	321	4	106	47.4	8.2	54.3	220.6	20.8		760	0.52
Std Abw	8	5	5	725	44	25	36	3	39	10.2	1.7	13.2	46.8	11.3		77	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	287	148	180	2875	401	70	330	3	97	42.0	7.2	48.8	242.8	20.5		797	0.50
Std Abw	11	4	4	754	51	24	44	2	44	5.6	1.6	7.4	36.9	9.7		10.2	44
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	3019	418	78	340	4	99	40.5	7.3	46.8	254.5	22.3		763	0.55
Std Abw	8	5	5	774	46	27	38	3	42	6.7	1.5	8.4	46.6	10.6		31	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	292	144	175	2911	388	60	328	3	99	50.6	7.5	58.8	202.7	17.2		846	0.46
Std Abw	10	6	5	727	42	20	36	3	46	8.3	1.6	11.3	33.0	9.5		50	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	282	151	184	3157	394	71	323	4	101	47.5	8.0	54.6	220.0	20.8		776	0.51
Std Abw	7	9	8	721	47	25	39	3	38	10.2	1.7	13.3	47.6	10.6		53	

Abbildung 8.7: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugsfurche auf Bodenklasse 1

Winterweizen Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 2	Saet		Blüte		Reife		Ertrag (TM)		ETP		T		E		Abt.		Drain.		WUE PII		WUE F		WUE PII		Tkoef.		Wstress		Wstress		Etpot						
	Jul.Tag	Jul.Tag	Jul.Tag	Jul.Tag	kg ha ⁻¹	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹																	
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	4438	482	169	313	7	32	27.8	9.2	31.3	380.4	13.5	15.4	727	0.66																				
Std Abw	8	5	5	844	49	33	37	5	31	13.7	1.7	28.0	54.6	13.5	15.4	52																					
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	285	149	182	4516	472	148	325	6	42	30.8	9.6	33.4	328.5	13.5	15.4	774	0.61																				
Std Abw	10	4	4	812	53	27	42	5	35	3.4	1.5	3.6	35.2	12.7	14.4	56																					
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	281	153	186	4564	481	155	327	7	38	29.6	9.6	32.1	342.3	12.7	14.4	750	0.64																				
Std Abw	8	5	5	1001	48	32	37	5	36	3.6	1.7	3.7	41.9	12.7	14.4	52																					
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	145	177	4886	472	136	337	7	48	36.4	10.4	39.4	280.1	9.7	11.2	812	0.58																				
Std Abw	8	5	4	887	59	25	53	5	44	5.4	1.7	5.9	40.1	10.8	12.5	102																					
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	281	151	184	4735	459	143	317	7	45	33.9	10.4	36.8	303.0	10.8	12.5	761	0.60																				
Std Abw	8	5	5	1074	42	33	36	6	35	6.4	2.0	8.8	45.1	10.8	12.5	51																					
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	286	149	182	4552	459	146	313	5	40	31.4	9.9	33.9	322.7	13.4	15.2	775	0.59																				
Std Abw	11	4	4	802	51	26	41	4	35	3.6	1.5	3.8	35.6	9.8	10.7	78																					
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	281	153	187	4566	477	155	322	6	38	29.8	9.7	32.2	340.9	12.5	14.2	750	0.64																				
Std Abw	8	5	5	1011	48	34	37	5	35	3.6	1.8	3.8	41.8	10.3	11.3	76																					
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	284	147	179	4901	450	134	316	6	48	37.1	10.9	40.0	274.8	8.4	9.8	806	0.56																				
Std Abw	38	10	9	754	49	24	40	5	42	5.3	1.7	5.6	39.6	8.8	9.7	80																					
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	282	151	185	4838	455	145	310	6	42	33.8	10.6	36.4	301.5	10.4	12.0	760	0.60																				
Std Abw	9	5	5	845	41	26	34	5	34	4.9	1.7	5.2	40.8	9.2	10.1	76																					
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	288	148	180	4506	458	145	313	5	34	31.4	9.8	34.5	323.2	13.3	15.2	796	0.58																				
Std Abw	11	4	4	953	52	31	40	4	33	4.4	1.8	8.9	38.7	9.6	10.6	48																					
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	4534	476	154	322	6	35	29.7	9.6	32.1	342.1	13.0	14.8	762	0.62																				
Std Abw	8	5	5	1031	46	33	36	4	35	3.7	1.8	3.8	42.3	10.2	11.2	39																					
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	292	143	175	4913	445	134	311	5	36	37.0	11.0	39.7	275.3	9.6	11.0	842	0.53																				
Std Abw	10	5	4	877	43	25	34	4	35	5.1	1.8	5.5	37.5	8.3	9.0	59																					
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	284	150	183	4825	455	144	311	6	38	33.7	10.6	36.2	302.2	10.7	12.4	778	0.58																				
Std Abw	9	5	5	872	42	26	34	5	33	4.8	1.7	5.1	40.1	9.0	9.9	34																					

Abbildung 8.8: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 2

Winterweizen Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM)	ETP	T	E	Abt.	Drain.	WUE Pfl	WUE F	WUE Pfl	Koeff.	Wstress	Wstress	Etpot	ETpot		
	Jul.Tag	Jul.Tag	Jul.Tag															kg/ha	mm
Bodenklasse 2	Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	4303	478	164	314	4	42	27.7	9.0	31.4	380.6		13.1	15.2	730	0.65
	Std ABw	8	5	5	802	46	31	36	4	37	13.6	1.6	27.8	54.2				43	
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	Std ABw	283	150	182	4313	466	140	327	3	54	31.2	9.3	36.3	325.5		13.4	15.4	776	0.60
	Std ABw	24	7	6	881	55	30	43	3	41	3.8	1.8	24.0	39.9				55	
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	Std ABw	281	153	186	4384	477	147	330	4	50	30.0	9.3	32.8	338.5		12.5	14.3	754	0.63
	Std ABw	8	5	5	1011	47	34	39	3	39	4.0	1.8	4.6	43.8				43	
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	Std ABw	287	145	177	4736	468	128	340	4	60	37.5	10.1	40.8	272.9		8.9	10.5	817	0.57
	Std ABw	10	5	4	817	56	24	51	3	48	5.9	1.6	6.5	42.2				92	
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	Std ABw	281	151	184	4548	452	135	316	4	54	34.1	10.2	36.9	300.3		10.9	12.6	762	0.59
	Std ABw	8	5	5	904	39	29	36	4	38	5.6	1.6	6.2	43.8				50	
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	Std ABw	286	149	182	4417	452	140	312	2	49	31.8	9.8	34.5	318.3		12.7	14.7	775	0.58
	Std ABw	11	4	4	778	51	25	41	2	38	3.8	1.5	4.0	36.6		9.5	10.6	78	
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	Std ABw	281	153	187	4416	472	148	325	3	48	30.1	9.4	32.7	337.5		12.4	14.2	750	0.63
	Std ABw	8	5	5	946	47	31	37	3	38	3.7	1.7	3.9	42.1		10.0	11.0	76	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	Std ABw	291	145	178	4739	438	125	313	3	56	38.5	10.8	41.6	265.0		8.3	9.8	806	0.54
	Std ABw	11	5	4	718	41	23	33	3	42	5.5	1.5	6.0	37.7		8.4	9.3	81	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	Std ABw	282	151	185	4651	446	137	309	3	52	34.5	10.4	37.3	296.5		10.9	12.6	760	0.59
	Std ABw	8	5	5	795	40	25	35	3	37	5.6	1.7	6.1	43.0		9.4	10.3	77	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	Std ABw	287	148	180	4383	452	140	313	2	43	31.6	9.7	34.2	320.7		13.1	15.1	795	0.57
	Std ABw	10	4	4	796	50	26	40	2	36	3.6	1.4	3.9	35.7		9.3	10.3	48	
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	Std ABw	282	152	186	4401	473	147	325	3	45	30.1	9.4	32.6	337.9		12.8	14.6	763	0.62
	Std ABw	8	5	5	961	47	31	37	3	38	3.7	1.7	3.9	42.6		9.9	10.9	29	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	Std ABw	292	143	175	4736	438	127	312	2	46	37.8	10.8	40.8	269.9		9.1	10.5	845	0.52
	Std ABw	10	5	4	809	42	23	34	2	38	5.5	1.7	5.9	39.4		8.0	8.8	48	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	Std ABw	283	150	183	4615	447	136	311	3	48	34.3	10.3	37.0	288.2		10.7	12.4	777	0.58
	Std ABw	8	5	5	801	41	25	35	3	35	5.4	1.6	5.9	42.1		9.0	9.8	39	

Abbildung 8.9: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 2

Winterweizen Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 3	Saet		Blüte		Reife		Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T mm	E mm	Abt. mm	Drain. mm	WUE PII Etr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE PII Eilers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. Photos. Jahressum. lg ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum. Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ Etpot %	
	jul.Tag	jul.Tag	jul.Tag	jul.Tag	jul.Tag	jul.Tag														
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	156	190	156	5449	508	199	309	9	8	28.8	10.7	32.0	364.8	10.2	12.3	734	0.69
Std Abw	8	5	5	5	5	5	1095	62	39	44	7	18	13.6	1.9	28.0	49.3			74	
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	286	149	182	149	182	149	5811	508	184	324	9	15	31.8	11.6	33.7	317.6	9.6	11.6	792	0.64
Std Abw	11	4	4	4	4	4	1032	110	33	97	8	43	3.0	1.8	3.2	28.9			184	
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	282	153	186	153	186	153	5709	506	188	317	10	13	30.4	11.4	32.2	332.2	9.0	10.8	752	0.67
Std Abw	8	5	5	5	5	5	1188	48	37	34	7	26	3.1	1.7	3.3	33.8			49	
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	145	177	145	177	145	6337	504	177	326	10	20	35.9	12.6	38.0	281.5	7.0	8.4	818	0.62
Std Abw	8	5	4	5	4	5	1187	61	30	47	7	37	3.7	1.9	3.9	28.4			94	
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	282	151	184	151	184	151	6081	487	180	307	9	14	33.9	12.6	35.7	298.8	6.7	8.2	764	0.64
Std Abw	9	5	5	5	5	5	1208	43	34	36	7	23	3.8	1.8	3.9	32.3			45	
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	285	146	179	146	179	146	5741	490	182	308	8	12	32.3	12.0	34.1	312.2	10.1	12.2	775	0.63
Std Abw	22	26	29	26	29	26	1127	89	33	76	6	26	2.9	1.7	3.1	26.9	10.8	12.4	77	
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	282	153	187	153	187	153	5596	500	187	313	9	12	30.4	11.4	32.2	331.8	9.1	10.9	757	0.66
Std Abw	9	5	5	5	5	5	1246	48	37	34	6	26	2.9	1.6	3.1	32.1	10.1	11.3	29	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	291	145	178	145	178	145	6201	471	171	300	8	16	36.5	13.2	38.4	276.9	6.3	7.8	815	0.58
Std Abw	10	5	4	5	4	5	1007	41	28	30	5	28	3.7	1.9	3.9	28.0	8.2	9.3	27	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	282	151	185	151	185	151	6092	479	180	300	8	13	34.0	12.6	35.8	297.6	6.7	8.3	760	0.63
Std Abw	9	5	5	5	5	5	998	42	28	33	6	22	3.7	1.8	3.8	31.0	8.7	9.9	76	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	288	148	180	148	180	148	5729	483	179	304	7	8	32.6	11.8	34.9	311.1	10.2	12.3	795	0.61
Std Abw	11	4	4	4	4	4	1271	58	39	40	5	18	4.3	2.1	8.4	32.2	10.3	11.6	52	
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	276	152	186	152	186	152	5715	502	190	312	9	11	30.3	11.4	32.1	333.4	9.8	11.8	764	0.66
Std Abw	8	5	5	5	5	5	1001	47	33	32	6	24	2.9	1.6	3.1	32.5	10.3	11.5	27	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	293	143	175	143	175	143	6117	467	169	298	7	10	36.5	13.1	38.5	276.8	8.4	10.0	841	0.55
Std Abw	10	5	4	5	4	5	1222	46	33	32	5	20	3.8	2.2	4.0	27.7	9.4	10.5	67	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	284	150	183	150	183	150	6046	478	178	300	8	10	34.1	12.6	35.9	296.8	7.7	9.4	779	0.61
Std Abw	8	5	5	5	5	5	1057	44	30	33	6	19	3.8	1.8	3.9	31.6	9.5	10.6	34	

Abbildung 8.10: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 3

Winterweizen Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM)	ETP	T	E	Abt.	Drain.	WUE PII	WUE F	WUE PII	Tkoef.	Wstress Photos.	Wstress Wachstum.	Epot	ETakt/ETpot
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	5370	505	197	308	5	14	28.7	10.6	31.8	366.0	8.7	10.8	730	0.69
Std Abw	8	5	5	953	48	35	33	4	25	13.4	1.7	27.6	48.5			43	
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	283	150	182	5750	500	183	318	4	19	31.7	11.5	33.6	318.3	8.4	10.6	776	0.64
Std Abw	25	6	6	900	57	30	42	4	27	3.0	1.6	3.1	30.7			57	
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	281	153	186	5651	507	186	321	5	19	30.5	11.2	32.4	331.1	8.0	9.9	754	0.67
Std Abw	8	5	5	1094	47	34	35	4	32	3.2	1.6	3.3	35.0			43	
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	145	177	6238	499	172	328	5	26	36.5	12.5	38.6	276.8	5.7	7.1	817	0.61
Std Abw	9	5	4	1068	60	28	48	4	40	3.8	1.7	4.1	28.9			94	
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	281	151	184	5977	483	175	308	5	21	34.2	12.5	36.2	295.9	5.8	7.3	762	0.63
Std Abw	8	5	5	1108	40	32	36	5	30	4.0	1.7	4.2	33.8			48	
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	286	149	182	5756	482	178	304	3	16	32.5	12.0	34.3	310.1	8.4	10.6	783	0.62
Std Abw	11	4	4	862	51	28	40	3	25	2.8	1.6	3.0	26.2	8.6	10.0	24	
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	282	153	187	5640	501	184	316	4	18	30.7	11.4	32.5	329.5	8.1	9.8	757	0.66
Std Abw	8	5	5	1102	47	34	35	3	31	3.2	1.7	3.3	34.3	9.6	10.8	28	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	290	145	178	6131	468	166	302	3	23	37.1	13.1	39.1	272.2	4.8	6.1	815	0.58
Std Abw	11	5	4	863	39	24	31	3	34	3.8	1.7	4.0	28.0	7.0	8.2	27	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	282	151	185	6014	477	175	302	4	21	34.8	12.6	36.8	291.8	5.8	7.3	760	0.63
Std Abw	9	5	5	1009	41	31	34	4	28	5.1	1.8	5.8	35.0	8.0	9.2	76	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	288	148	180	5674	481	176	304	3	12	32.4	11.8	34.2	311.6	9.4	11.7	796	0.60
Std Abw	11	4	4	975	52	30	38	2	20	2.9	1.6	3.1	28.0	9.4	10.7	48	
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	5664	501	186	316	4	16	30.6	11.3	32.5	330.1	8.4	10.2	763	0.66
Std Abw	8	5	5	992	46	29	34	3	30	3.1	1.7	3.2	33.7	9.6	10.8	29	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	292	143	175	6071	466	165	301	3	16	37.0	13.0	39.0	273.3	6.9	8.4	844	0.55
Std Abw	10	5	4	1066	42	28	32	3	27	3.8	2.0	3.9	27.9	8.3	9.4	54	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	284	150	183	5998	476	175	302	4	17	34.5	12.6	36.4	293.3	6.4	8.0	779	0.61
Std Abw	9	5	5	953	42	27	33	4	25	3.9	1.7	4.1	32.4	8.5	9.6	33	

Abbildung 8.11: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 3

Winterweizen Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 4	Saet		Blüte		Reife		Etrtag (TM) kg ha ⁻¹	ETP mm	T mm	E mm	Abf. mm	Drain. mm	WUE Pfl Etr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Ehlers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. l g ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETrakt/ Etpot %	
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag	kg ha ⁻¹	mm															mm
Referenz (1971-2005) - Mittel	278	156	190	5068	512	193	319	11	4	28.0	9.9	31.4	379.6	5.4	6.8	735	0.70	73	0.07	73	0.07
Stx Abw	7	5	5	900	52	35	38	8	12	14.9	1.6	30.0	53.2	4.9	6.3	771	0.65	65	0.06	65	0.06
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	285	149	182	5495	500	176	324	9	6	31.5	11.0	33.5	319.9	4.9	6.3	771	0.65	65	0.06	65	0.06
Stx Abw	10	5	5	838	55	30	42	7	14	2.9	1.5	3.1	28.2	5.2	6.4	755	0.68	45	0.06	45	0.06
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	262	153	186	5385	511	181	330	11	7	29.8	10.6	31.8	339.3	4.4	5.6	782	0.63	63	0.06	63	0.06
Stx Abw	9	5	5	1029	47	32	35	8	20	3.3	1.6	3.4	38.1	3.2	4.1	818	0.62	98	0.06	98	0.06
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	146	177	5873	504	164	340	11	13	36.0	11.7	38.3	281.1	4.3	5.2	753	0.64	63	0.06	63	0.06
Stx Abw	8	5	4	951	59	25	50	9	32	4.0	1.6	4.3	32.1	2.9	3.7	753	0.64	98	0.06	98	0.06
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	281	151	185	5782	484	173	312	11	7	33.8	12.1	35.7	300.7	4.4	5.6	782	0.63	63	0.06	63	0.06
Stx Abw	9	5	5	1106	47	34	38	9	17	4.2	1.6	4.4	37.0	4.4	5.6	782	0.63	63	0.06	63	0.06
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	287	149	182	5546	491	175	316	9	8	31.9	11.3	33.9	315.9	4.4	5.6	782	0.63	63	0.06	63	0.06
Stx Abw	11	5	4	760	50	27	40	6	16	2.9	1.4	3.1	28.3	7.1	8.3	25	0.58	25	0.58	25	0.58
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	281	153	187	5361	506	180	326	10	7	29.8	10.7	31.7	339.4	5.2	6.4	757	0.67	76	0.67	76	0.67
Stx Abw	9	5	5	1025	46	32	34	7	20	3.3	1.6	3.4	38.0	4.4	5.6	782	0.63	63	0.06	63	0.06
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	291	145	178	5794	475	159	316	10	15	36.7	12.2	38.9	275.2	2.2	2.9	814	0.58	27	0.58	27	0.58
Stx Abw	10	5	4	701	35	23	32	7	28	3.9	1.5	4.1	29.3	3.8	4.8	27	0.58	27	0.58	27	0.58
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	281	151	185	5771	483	171	312	10	9	34.0	12.0	36.0	298.3	2.5	3.1	767	0.63	27	0.63	27	0.63
Stx Abw	8	5	5	747	38	24	33	7	19	4.1	1.5	4.4	34.3	5.5	6.5	27	0.63	27	0.63	27	0.63
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	288	148	180	5457	489	172	316	8	4	31.9	11.2	33.8	316.4	6.0	7.6	798	0.61	6.0	0.61	6.0	0.61
Stx Abw	11	4	4	892	52	30	39	6	12	3.0	1.5	3.2	29.8	8.3	9.5	46	0.61	46	0.61	46	0.61
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	5304	503	178	325	9	6	29.9	10.6	31.9	338.6	6.0	7.4	764	0.66	6.0	0.66	6.0	0.66
Stx Abw	9	5	5	1070	47	34	34	7	18	3.5	1.7	3.7	39.1	8.3	9.4	31	0.66	31	0.66	31	0.66
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	293	144	175	5705	472	158	314	9	9	36.4	12.1	38.6	277.8	4.2	5.1	848	0.56	4.2	0.56	4.2	0.56
Stx Abw	10	5	4	855	39	25	33	7	20	4.1	1.7	4.2	31.2	6.2	7.2	50	0.56	50	0.56	50	0.56
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	283	150	183	5749	483	171	313	9	6	33.9	11.9	35.9	298.8	3.3	4.2	780	0.62	3.3	0.62	3.3	0.62
Stx Abw	8	5	5	843	40	25	33	7	15	4.2	1.6	4.4	35.2	6.8	7.8	30	0.62	30	0.62	30	0.62

Abbildung 8.12: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 4

Winterweizen Pflug Bodenklasse 4	Saet		Blüte		Reife		Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP mm	T mm	E mm	Abt. mm	Drain. mm	WUE Pfl Etr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Eilers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. lg ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	Etkof. ETpot %
	Jul. Tag	Aug. Tag	Jul. Tag	Aug. Tag	Jul. Tag	Aug. Tag														
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	156	5022	509	190	319	319	319	5	7	28.0	9.9	31.3	377.3	5.9	7.4	732	0.70
Std. Abw.	8	5	5	5	871	60	33	46	46	46	4	20	14.1	1.5	29.1	50.6			69	
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	286	149	182	182	5491	507	174	333	333	333	5	12	31.7	10.9	33.8	317.5	3.3	4.5	780	0.65
Std. Abw.	10	5	4	4	700	71	25	61	61	61	4	24	2.8	1.4	3.0	27.8			114	
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	282	153	186	186	5347	510	179	331	331	331	5	12	30.0	10.6	32.0	337.7	4.2	5.3	752	0.68
Std. Abw.	8	5	5	5	954	45	30	36	36	36	5	28	3.5	1.5	3.6	40.0			48	
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	287	145	177	177	5767	497	157	340	340	340	6	20	37.0	11.7	39.4	273.7	2.0	2.7	804	0.62
Std. Abw.	8	5	4	4	858	63	25	55	55	55	5	40	4.3	1.6	4.7	32.0			117	0.07
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	281	151	184	184	5623	487	167	320	320	320	5	15	34.0	11.7	36.1	298.1	2.2	2.8	760	0.64
Std. Abw.	9	5	5	5	908	41	29	37	37	37	5	24	4.1	1.4	4.4	35.1			51	0.06
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	285	149	182	182	5487	490	172	318	318	318	4	13	32.2	11.2	34.2	313.4	3.1	4.2	757	0.65
Std. Abw.	10	5	4	4	674	48	24	41	41	41	3	23	2.9	1.3	3.2	28.9	6.0	7.3	28	
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	281	153	187	187	5349	506	178	328	328	328	5	12	30.1	10.7	32.1	336.3	4.0	5.1	757	0.67
Std. Abw.	8	5	5	5	948	46	30	35	35	35	4	27	3.4	1.6	3.5	38.5	6.7	7.8	28	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	291	145	178	178	5733	473	155	318	318	318	4	23	37.5	12.2	39.8	269.6	1.1	1.7	814	0.58
Std. Abw.	10	5	4	4	636	35	23	33	33	33	4	37	4.0	1.4	4.4	29.2	2.4	3.2	27	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	281	151	185	185	5700	481	166	314	314	314	5	15	34.6	11.9	36.7	292.9	1.9	2.5	767	0.63
Std. Abw.	8	5	5	5	652	38	23	34	34	34	4	25	4.4	1.4	4.8	34.5	4.4	5.4	27	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	288	148	181	181	5275	484	166	317	317	317	3	6	32.2	10.9	34.6	314.5	4.8	6.3	789	0.61
Std. Abw.	10	6	6	6	939	58	32	43	43	43	3	14	3.9	1.7	7.0	34.6	7.4	8.6	72	
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	186	5291	503	177	327	327	327	5	10	30.0	10.6	32.0	337.3	4.6	5.8	761	0.66
Std. Abw.	8	5	5	5	989	45	30	35	35	35	4	25	3.5	1.6	3.5	39.2	7.2	8.3	37	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	293	143	175	175	5674	469	154	316	316	316	4	14	37.2	12.1	39.4	272.2	3.0	3.9	842	0.56
Std. Abw.	10	5	4	4	755	41	23	36	36	36	4	27	4.2	1.6	4.4	30.7	4.9	6.0	68	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	284	150	183	183	5707	480	167	313	313	313	4	11	34.4	11.9	36.4	294.8	2.5	3.2	777	0.62
Std. Abw.	9	5	5	5	753	40	23	34	34	34	4	20	4.1	1.5	4.3	34.4	5.4	6.5	38	

Abbildung 8.13: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 4

Winterweizen Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 5	Saet		Blüte		Reife		Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T mm	E mm	Abl. mm	Drain. mm	WUE PII Etr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE PII Eliers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Koeff. lg ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Epot mm	ETrat/ ETpot %
	jul.Tag	jul.Tag	jul.Tag	jul.Tag	kg ha ⁻¹	mm													
Referenz (1971-2005) - Mittel	280	156	190	5100	508	184	324	7	6	16	20.2	1.3	39.3	47.4	1.5	728	0.70	46	
Stx Abw	8	5	5	687	44	30	37	6	13	34.1	11.0	36.4	296.2	0.3	773	0.64	82		
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	285	149	182	5407	497	161	337	6	23	3.2	10.7	34.1	317.0	1.1	744	0.67	65		
Stx Abw	9	4	4	641	63	26	59	5	12	32.0	1.4	3.9	36.6	0.1	802	0.61	121		
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	282	153	187	5273	501	167	335	7	26	40.6	11.5	43.4	250.1	0.1	756	0.63	111		
Stx Abw	8	5	5	710	45	28	42	5	26	3.6	1.4	7.0	38.3	0.3	783	0.61	25		
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	288	145	177	5545	487	140	347	8	26	4.9	1.8	5.7	30.0	0.1	756	0.63	111		
Stx Abw	9	5	4	701	62	29	60	6	41	37.4	11.8	39.9	273.2	0.1	756	0.63	111		
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	282	151	184	5504	477	151	327	7	18	6.0	1.7	7.0	38.3	0.3	783	0.61	25		
Stx Abw	8	5	5	834	64	32	62	5	29	34.6	11.2	36.8	292.2	0.3	783	0.61	25		
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	284	149	183	5355	480	157	323	5	13	3.3	1.6	3.7	30.2	1.3	755	0.66	28		
Stx Abw	25	6	6	624	48	25	45	4	23	10.8	11.2	34.3	315.0	1.1	755	0.66	28		
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	282	154	187	5336	498	168	330	6	11	3.7	1.4	4.0	37.4	2.7	811	0.56	30		
Stx Abw	8	7	7	524	46	23	42	5	24	41.2	12.1	43.9	246.6	0.1	811	0.56	30		
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	290	146	179	5430	453	135	318	6	18	5.2	1.8	5.9	31.5	0.3	767	0.62	27		
Stx Abw	10	9	9	749	53	30	46	4	32	11.8	11.8	40.0	272.3	0.2	767	0.62	27		
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	281	151	185	5546	476	151	325	6	20	6.1	1.8	7.1	39.5	0.9	789	0.61	27		
Stx Abw	22	9	9	612	72	27	67	5	32	11.2	11.2	37.3	294.4	0.6	789	0.61	27		
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	287	148	181	5400	482	160	322	5	8	4.5	1.8	10.5	34.5	2.0	830	0.55	104		
Stx Abw	10	6	5	910	50	31	43	4	16	32.2	10.8	34.3	314.7	1.4	758	0.66	45		
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	282	152	186	5325	498	167	331	6	9	3.7	1.5	3.9	37.1	3.0	830	0.55	104		
Stx Abw	8	5	5	829	42	29	38	5	22	40.5	12.2	43.0	249.9	0.1	830	0.55	104		
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	292	143	175	5509	460	141	320	5	12	4.4	1.7	4.9	26.9	0.5	785	0.61	111		
Stx Abw	10	4	4	908	47	29	42	4	25	37.6	11.9	40.0	272.0	0.2	785	0.61	111		
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	282	150	183	5538	480	153	327	6	15	6.0	1.7	6.9	37.5	0.8	785	0.61	111		
Stx Abw	8	5	5	832	75	27	69	5	28	1.7	1.7	6.9	37.5	0.8	785	0.61	111		

Abbildung 8.14: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Winterweizen bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 5


```

*EXP.DETAILS: FUSG1101SQ FU
*GENERAL
@PEOPLE
Pablo & Sabina
@ADDRESS
MET BOKU
@SITE
Marchfeld: sommergerste x K1maszenarten x Böden x Bodenbearbeitung
*TREATMENTS
@N R O C TNAME.....CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
1 1 1 0 Haddm A2 2050 high 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1
*CULTIVARS
@C CR INGENO CNAME
1 BA IB0705 Magda
*FIELDS
@L ID_FIELD WSTA....FLSA FLOB FLDT FLDD FLDS FLST SLTX SLDP ID_SOIL FLNAME
1 FUCH0001 FESH -99 -99 DR000 0 0 0 SL 150 MEMF070010 Bodenklassen Marchfeld
@L .....XCRD .....YCRD .....ELEV .....AREA .SLEN .FLWR .SLAS
1 48.192 1 16.748 149 -99 -99 -99
*SOIL ANALYSIS
@A SADAT SMHB SMPX SMKE SANAME
1 50283 SA011 SA001 SA001 -99
*INITIAL CONDITIONS
@C PCR ICDAT ICRT ICND ICRN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP IC RIP ICRID ICNAME
1 BS 11069 0 0 0 -99 800 .038 .022 100 25 -99
@C ICBL SH20 SNH4 SNO3
1 5 .224 1 4.2
1 15 .224 1 4.2
1 30 .171 1 4.2
1 45 .18 1 3.6
1 90 .177 .5 1.3
1 150 .125 .5 .5
*PLANTING DETAILS
@P PDATE EDATE PPOP PROE PLME PLDS PLRS PLRD PLDP PLWT PAGE PENV PLPH SPRL
1 11073 11079 350 330 S R 12 15 3 -99 -99 -99 -99
*IRRIGATION AND WATER MANAGEMENT
@I EFIR IDEP ITHR IEPT IOFF IAME IAMT IRNAME
1 1 30 50 100 GS000 IR001 10 -99

```

Abbildung 8.16: Beispielfile für die Simulation von Sommergerste (Teil 1)

```

*FERTILIZERS (INORGANIC)
@F FDATE FMCD FACD FDEP FAMN FAMP FAMK FAMC FAMO FOCDFERNAME
1 11094 FE001 AP001 0 40 25 170 -99 -99 -99 -99
1 11114 FE001 AP001 0 40 0 0 -99 -99 -99 -99

*RESIDUES AND ORGANIC FERTILIZER
@R RDATE RCOD RAMT RESN RESP RESK RINP RDEP RMET RENAME
1 50277 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99

*CHEMICAL APPLICATIONS
@C CDATE CHCOD CHAMT CHME CHDEP CHT..CHNAME
1 50277 -99 -99 -99 -99 -99 -99

*TILLAGE AND ROTATIONS
@T TDATE TIMPL TDEP TNAME
1 11061 T1005 25 -99

*ENVIRONMENT MODIFICATIONS
@E ODATE EDAY ERAD EMAX EMIN ERAIN ECO2 EDEW EWIND ENVNAME
1 11215 A 0 A 0 A 0 A 0 A 0.0 A 205 A 0 A 0

*HARVEST DETAILS
@H HDATE HSTG HCOM HSIZE HPC HBPC HNAME
1 11201 G5006 H A 100 -99 WHEAT

*SIMULATION CONTROLS
@N GENERAL NYERS NREPS START SDATE REED SNAME.....
1 GE 98 1 S 11060 2150 DEFAULT SEQUENTIAL SIMULATION CONTROL
@N OPTIONS WATER NITRO SYMBI PHOSP POTAS DISES CHEM TILL
1 OP Y Y Y Y N Y
@N METHODS WTHR INCON LIGHT EVAPO INFIL PHOTO HYDRO NSWIT MESOM
1 ME M M E F R C R 1 G
@N MANAGEMENT PLANT IRRIG FERTI RESID HARVS
1 MA A N R N M
@N OUTPUTS FNAME OVVEW SUMRY FROPT GROUT CAOUT WAOUT NIOUT MIOU DIOUT LONG CHOUT OPOUT
1 OU Y Y Y 1 Y Y Y Y Y Y N Y N

@ AUTOMATIC MANAGEMENT
@N PLANTING PFRST PLAST PH20L PH20U PH20D PSTMX PSTMN
1 PL 11051 10090 10 85 10 12 9
@N IRRIGATION IMDEP ITHRL ITHRU IROFF IMETH IRAMT IREFF
1 IR 30 50 100 G5000 IR001 10 1
@N NITROGEN NMDEP NMTHR NAMNT NCODE NAOFF
1 NI 0 50 25 FE001 G5000
@N RESIDUES RIPCN RTIME RIDEP
1 RE 100 1 20
@N HARVEST HFRST HLAST HPCNP HPCNR
1 HA 0 00001 100 0
    
```

Abbildung 8.17: Beispielfile für die Simulation von Sommergerste (Teil 2)

Sommergerste Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 1	Saet		Bluete		Reife		Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T mm	E mm	Abt. mm	Drain. mm	VMUE PH Ertr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	VMUE F Ertr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	VMUE PH Ehlers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Thcoef. lg ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	Etrakt/ Etpot %
	jul. Tag	Jul. Tag	jul. Tag	Jul. Tag	kg ha ⁻¹	mm													
Referenz (1971-2005) - Mittel	73	161	189	3204	449	104	345	9	77	31.5	7.3	35.9	324.3	24.1	25.7	747	0.60		
Stx Abw	11	8	8	574	78	24	75	6	39	4.8	1.6	5.4	48.3	9.3	9.7	29	0.12		
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	67	152	179	2860	444	90	354	9	86	32.9	6.6	38.8	311.7	25.9	27.5	796	0.55		
Stx Abw	11	8	7	739	77	29	74	6	45	5.3	1.7	8.9	49.1	11.1	11.6	26	0.11		
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	70	158	185	3113	447	97	349	9	76	33.1	7.0	38.0	310.1	26.6	28.4	769	0.58		
Stx Abw	12	7	7	730	54	30	43	6	38	5.6	1.6	6.7	49.4	10.1	10.4	27	0.08		
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	65	150	175	2840	438	84	354	10	83	34.6	6.5	40.4	298.8	27.4	28.9	828	0.53		
Stx Abw	11	6	5	808	54	26	42	6	42	6.3	1.8	7.0	56.4	8.9	9.2	28	0.07		
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	70	157	184	2961	427	93	334	8	77	32.7	6.9	37.7	313.1	27.3	29.1	779	0.55		
Stx Abw	12	7	7	776	54	29	40	6	36	5.1	1.6	5.9	49.8	10.7	11.0	27	0.08		
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	67	153	180	3018	428	94	334	7	81	33.0	7.1	37.9	310.9	25.7	27.4	794	0.54		
Stx Abw	11	7	7	744	62	29	53	5	41	5.3	1.8	6.3	48.6	10.9	11.3	26	0.08		
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	70	158	185	3169	442	99	343	8	74	33.1	7.2	37.8	309.7	25.9	27.7	768	0.58		
Stx Abw	11	7	7	728	53	30	42	5	37	5.4	1.6	6.6	48.0	10.7	11.1	27	0.08		
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	65	149	175	3015	418	87	331	8	81	35.8	7.3	41.7	289.8	25.5	27.1	825	0.51		
Stx Abw	10	8	7	874	64	28	59	5	45	7.5	2.1	13.8	54.7	9.9	10.2	28	0.08		
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	70	157	184	3028	419	94	325	7	75	32.9	7.2	37.7	311.6	27.0	28.8	778	0.54		
Stx Abw	12	8	7	790	53	29	40	5	34	5.3	1.7	6.0	51.4	11.0	11.4	27	0.08		
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	67	151	178	2955	428	92	336	7	75	33.2	7.0	38.2	308.7	25.8	27.4	814	0.53		
Stx Abw	11	7	7	729	63	28	54	4	40	5.2	1.7	6.2	48.9	10.5	10.9	26	0.08		
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	70	158	184	3111	441	97	344	8	72	33.1	7.1	37.9	310.1	26.7	28.4	776	0.57		
Stx Abw	11	7	7	730	53	30	42	5	36	5.5	1.7	6.5	48.4	10.2	10.5	27	0.08		
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	65	147	172	2940	417	84	332	7	72	35.8	7.1	41.5	290.3	25.6	27.1	862	0.48		
Stx Abw	10	8	7	893	64	26	60	5	43	7.2	2.1	10.9	55.8	9.5	9.8	30	0.07		
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	70	156	183	2986	419	93	327	7	72	33.1	7.1	37.9	309.9	27.5	29.2	791	0.53		
Stx Abw	12	8	7	792	53	29	41	5	34	5.2	1.7	5.9	49.9	10.4	10.8	27	0.07		

Abbildung 8.18: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 1

Sommergerste Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP mm	T mm	E mm	Abt. mm	Drain. mm	WUE Pfl Etr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Eilers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. l g ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ ETpot %	
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag															kg ha ⁻¹
Bodenklasse 1																		
Referenz (1971-2005) - Mittel	73	162	189	3016	438	97	340	4	87	31.7	7.0	36.6	323.1	25.5	27.8	746	0.59	
Std. Abw.	11	8	8	610	65	26	63	4	41	5.1	1.6	6.2	51.1	8.8	9.1	28	0.09	
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	67	153	180	2701	428	83	345	4	96	33.3	6.3	39.3	308.3	27.7	29.9	795	0.54	
Std. Abw.	12	6	6	749	59	28	48	3	44	5.6	1.6	6.9	51.5	9.6	10.0	25	0.08	
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	68	158	184	2940	439	91	348	4	88	33.6	6.7	39.1	306.2	27.1	29.4	769	0.57	
Std. Abw.	11	7	7	767	54	30	43	3	40	5.9	1.7	7.2	51.4	10.3	10.7	27	0.08	
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	64	150	175	2637	431	77	354	5	95	35.2	6.1	41.8	294.8	27.9	29.9	828	0.52	
Std. Abw.	10	6	5	823	54	26	41	4	45	6.7	1.9	7.7	59.3	8.7	9.1	28	0.07	
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	70	156	183	2745	419	85	334	4	89	33.0	6.5	38.7	311.4	28.2	30.6	779	0.54	
Std. Abw.	12	7	7	788	53	29	40	4	37	5.6	1.7	6.4	53.2	10.6	11.1	27	0.08	
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	67	153	180	2823	417	87	329	3	92	33.4	6.8	38.9	307.9	27.0	29.3	793	0.53	
Std. Abw.	11	6	6	774	56	29	45	2	43	5.6	1.8	6.9	52.0	10.0	10.5	25	0.08	
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	68	158	185	2982	434	92	342	4	86	33.7	6.9	39.0	305.7	27.0	29.3	768	0.57	
Std. Abw.	11	7	7	765	53	31	42	3	39	5.9	1.8	7.2	51.5	10.5	10.7	27	0.08	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	64	149	175	2818	411	80	330	3	92	36.5	6.9	43.5	284.9	25.9	28.1	825	0.50	
Std. Abw.	10	8	7	882	63	28	59	3	47	8.2	2.1	17.9	54.9	9.6	10.1	28	0.08	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	70	156	183	2839	412	87	325	3	86	33.4	6.9	38.7	308.9	28.1	30.5	778	0.53	
Std. Abw.	12	7	7	802	53	29	40	3	36	5.8	1.8	6.6	54.6	10.5	11.0	27	0.07	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	67	152	178	2751	416	84	331	3	86	33.5	6.6	39.0	306.7	27.0	29.2	813	0.51	
Std. Abw.	11	6	6	757	58	28	46	2	42	5.5	1.7	6.7	51.9	9.6	10.1	26	0.08	
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	68	157	184	2925	434	91	343	4	84	33.4	6.8	38.8	307.5	27.3	29.6	776	0.56	
Std. Abw.	11	7	7	743	53	30	42	3	39	5.7	1.7	7.0	50.8	9.9	10.3	27	0.07	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	65	147	172	2750	410	78	332	3	83	36.8	6.7	43.6	284.6	26.1	28.1	862	0.48	
Std. Abw.	10	7	7	875	64	26	60	3	45	9.1	2.0	17.7	57.8	9.3	9.8	30	0.07	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	70	155	182	2789	412	85	326	3	83	33.4	6.8	38.8	308.3	28.4	30.8	791	0.52	
Std. Abw.	12	8	7	796	52	28	40	3	36	5.6	1.8	6.4	53.8	10.3	10.7	27	0.07	

Abbildung 8.19: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 1

Sommergerste Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 2	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T mm	E mm	Abf. mm	Drain. mm	WUE Pfl kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Eilers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Thoet. lg ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ Etpot %	
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag														
Referenz (1971-2005) - Mittel	74	161	189	4636	499	164	335	7	33	28.5	9.4	30.8	354.6	13.3	15.0	747	0.65
Std Abw	12	9	9	588	83	25	76	6	35	3.0	1.5	3.3	37.5	8.6	9.3	29	0.15
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	72	154	180	4403	487	150	337	7	39	29.7	9.1	32.3	341.4	16.8	18.5	795	0.61
Std Abw	25	7	7	755	74	30	66	5	38	3.4	1.6	3.8	39.5	10.3	11.0	25	0.10
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	72	159	186	4600	493	157	336	7	31	29.7	9.4	32.1	341.0	16.0	17.8	769	0.64
Std Abw	13	7	7	734	54	31	42	5	33	3.3	1.5	3.5	36.2	10.3	10.9	27	0.08
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	67	148	173	4444	485	143	342	7	38	31.5	9.3	34.3	322.3	17.2	19.0	828	0.59
Std Abw	11	26	28	1018	59	34	40	5	38	4.0	1.7	4.2	39.6	9.4	10.0	28	0.08
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	72	157	184	4504	479	153	326	6	32	29.7	9.4	32.2	340.2	16.6	18.4	780	0.61
Std Abw	12	8	8	808	60	30	48	6	30	3.2	1.5	3.5	36.4	10.7	11.4	27	0.08
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	70	154	181	4449	474	151	322	5	37	29.8	9.5	32.3	340.4	16.1	17.8	794	0.60
Std Abw	11	7	6	715	72	30	63	4	36	3.6	1.7	3.9	40.3	10.5	11.3	25	0.09
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	72	159	186	4636	487	157	330	6	29	29.9	9.6	32.3	338.3	15.8	17.5	768	0.63
Std Abw	13	7	7	750	54	32	42	5	32	3.2	1.6	3.4	35.1	10.5	11.1	27	0.08
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	67	150	176	4580	465	146	318	6	35	31.7	9.9	34.3	321.2	15.7	17.4	825	0.56
Std Abw	11	8	7	931	66	32	55	5	39	4.1	1.9	4.5	42.1	9.8	10.5	28	0.08
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	71	157	184	4548	467	154	313	5	29	29.9	9.8	32.2	338.8	16.6	18.4	778	0.60
Std Abw	11	8	7	786	52	29	38	5	29	3.2	1.5	3.4	36.3	10.6	11.2	27	0.07
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	70	152	179	4433	473	149	323	5	31	30.1	9.5	32.6	337.1	16.7	18.5	814	0.58
Std Abw	11	7	6	762	74	30	64	4	33	3.5	1.7	3.8	39.0	10.3	11.0	26	0.09
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	72	159	185	4590	487	156	331	6	27	29.9	9.5	32.3	338.9	16.2	17.9	776	0.63
Std Abw	13	7	7	769	55	32	41	4	31	3.3	1.6	3.5	36.2	10.4	11.0	27	0.08
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	67	148	173	4546	462	142	320	5	28	32.3	9.9	35.0	314.3	16.7	18.4	862	0.54
Std Abw	11	8	7	1018	68	33	56	5	36	4.1	2.0	4.6	39.3	9.7	10.4	30	0.08
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	71	156	183	4532	466	152	314	5	26	30.1	9.7	32.5	335.9	16.9	18.8	791	0.59
Std Abw	12	7	7	810	53	30	39	4	27	3.4	1.6	3.5	37.1	10.4	11.0	27	0.07

Abbildung 8.20: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 2

Sommergerste Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM)	ETP T	E	Abt.	Drain.	WUE Pfl	WUE F	WUE Pfl	Tkoef.	Wstress	Wstress	ETakt/			
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag													kg ha ⁻¹	mm	mm
Bodenklasse 2	Referenz (1971-2005) - Mittel	74	161	189	4453	495	160	335	4	41	28.2	9.1	30.6	358.8	13.8	15.8	747	0.65
	Std Abw	11	10	9	562	79	24	72	4	39	2.9	1.5	3.2	37.5	8.5	9.2	29	0.14
	CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	68	153	180	4210	482	145	337	3	48	29.5	8.9	32.3	344.0	17.3	19.3	795	0.61
	Std Abw	12	7	7	733	73	29	66	3	42	3.4	1.6	3.9	39.7	10.1	10.9	25	0.10
	CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	70	158	185	4415	488	152	336	4	39	29.5	9.1	32.0	343.6	16.3	18.4	769	0.64
	Std Abw	12	7	7	717	54	30	42	3	36	3.3	1.6	3.5	36.7	10.2	11.0	27	0.08
	CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	65	147	172	4232	479	136	343	4	47	31.4	8.9	34.4	323.8	17.7	19.7	828	0.58
	Std Abw	11	26	28	940	58	32	41	3	41	4.2	1.7	4.4	43.8	9.3	9.9	28	0.07
	CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	70	157	184	4314	469	147	322	3	39	29.6	9.2	32.1	342.5	17.2	19.4	779	0.60
	Std Abw	12	8	7	743	52	28	40	4	33	3.3	1.5	3.5	37.8	10.2	10.9	27	0.07
	ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	68	153	180	4267	468	146	323	3	45	29.6	9.2	32.3	342.1	16.4	18.4	794	0.59
	Std Abw	12	7	6	695	71	29	64	2	40	3.5	1.7	3.9	40.3	10.3	11.2	25	0.09
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	70	158	185	4438	482	152	330	3	38	29.5	9.3	32.0	342.7	16.0	18.0	768	0.63	
Std Abw	12	7	7	715	53	30	42	3	35	3.2	1.6	3.4	35.5	10.3	11.0	27	0.08	
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	66	149	175	4369	459	140	319	3	44	31.7	9.6	34.5	320.6	16.1	18.2	825	0.56	
Std Abw	10	8	7	809	65	29	56	3	43	4.2	1.8	4.7	43.5	9.8	10.6	28	0.08	
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	70	157	184	4343	461	148	313	3	37	29.6	9.4	32.1	342.0	16.6	18.6	778	0.59	
Std Abw	12	8	7	735	52	28	39	3	32	3.4	1.5	3.6	38.3	10.5	11.2	27	0.07	
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	68	152	178	4244	467	144	324	2	39	29.9	9.2	32.5	339.7	17.1	19.1	814	0.58	
Std Abw	12	7	6	726	74	29	65	2	37	3.6	1.7	4.0	40.8	10.1	10.9	26	0.09	
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	70	158	184	4415	482	151	331	3	35	29.6	9.2	32.2	341.7	16.5	18.5	776	0.62	
Std Abw	12	7	7	726	54	30	42	3	34	3.3	1.6	3.5	36.7	10.3	11.1	27	0.08	
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	66	147	172	4357	457	137	320	2	36	32.2	9.6	34.9	316.3	16.8	18.8	862	0.53	
Std Abw	11	8	7	915	66	30	57	3	39	4.3	1.9	4.7	42.4	9.5	10.1	30	0.08	
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	70	156	183	4346	461	147	314	3	33	29.9	9.5	32.4	339.0	17.2	19.3	791	0.58	
Std Abw	12	8	7	767	52	28	39	3	31	3.4	1.5	3.6	38.5	10.2	11.0	27	0.07	

Abbildung 8.21: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 2

Sommergerste Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 3	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T	E	Abt.	Drain.	WUE PII Etr./T kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Etr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE PII Ehlers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. l g ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ ETpot %	
	Jul Tag	Jul Tag	Jul Tag		mm												mm
Referenz (1971-2005) - Mittel	75	161	189	5365	516	187	329	9	13	29.0	10.6	30.9	348.1	10.5	12.4	748	0.68
Std Abw	12	10	9	730	84	27	75	8	29	2.9	1.5	3.1	34.5	8.6	9.5	29	0.15
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	73	155	181	5363	507	176	331	9	16	30.8	10.6	32.9	328.5	13.5	15.6	795	0.64
Std Abw	25	8	7	1006	79	34	66	7	28	3.5	1.8	3.7	37.4	10.5	11.6	25	0.10
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	73	159	186	5395	510	179	331	9	11	30.6	10.6	32.6	331.4	13.2	15.3	769	0.66
Std Abw	13	7	7	1018	58	37	40	7	23	3.7	1.9	3.9	36.5	10.7	11.7	27	0.08
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	68	149	174	5416	505	169	336	9	15	32.3	10.7	34.6	313.5	13.6	15.7	828	0.61
Std Abw	13	26	29	1380	62	42	38	7	27	3.7	2.1	4.0	35.1	9.9	10.7	28	0.08
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	74	157	184	5397	501	177	324	9	11	30.8	10.8	32.8	329.6	13.5	15.7	780	0.64
Std Abw	12	9	8	979	73	32	63	7	25	3.9	1.7	4.2	38.7	10.7	11.6	28	0.11
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	71	155	182	5403	493	176	317	8	14	30.9	11.0	32.9	327.5	13.1	15.2	794	0.62
Std Abw	13	8	7	1000	75	34	63	6	26	3.5	1.8	3.8	36.9	10.7	11.8	25	0.10
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	73	160	186	5416	503	178	325	8	10	30.8	10.8	32.8	329.0	13.2	15.2	768	0.66
Std Abw	13	8	7	1029	58	37	39	6	22	3.8	1.9	3.9	35.8	10.9	12.0	27	0.08
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	68	151	177	5472	505	170	335	9	15	32.3	10.7	34.6	313.5	13.7	15.9	828	0.61
Std Abw	12	7	6	1271	62	38	37	6	27	3.7	2.1	4.0	35.1	9.8	10.7	28	0.08
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	74	158	185	5445	489	178	311	8	8	30.8	11.2	32.7	329.0	13.2	15.3	779	0.63
Std Abw	12	8	7	970	64	32	50	6	17	3.8	1.7	4.0	37.7	10.8	11.7	27	0.08
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	71	153	179	5368	491	172	318	7	10	31.5	11.0	33.5	321.9	14.1	16.2	814	0.60
Std Abw	13	8	7	1101	78	36	64	5	21	3.7	2.0	3.9	36.6	10.9	12.0	26	0.10
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	73	159	185	5366	502	176	327	8	9	30.9	10.7	33.0	327.5	13.8	15.9	776	0.65
Std Abw	13	8	7	1030	58	38	39	6	21	3.8	1.9	4.0	36.2	10.9	11.9	27	0.08
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	68	148	173	5428	477	162	315	7	10	33.7	11.3	36.0	301.0	14.5	16.7	862	0.55
Std Abw	12	8	7	1378	69	40	54	6	22	4.1	2.5	4.6	36.0	10.3	11.2	30	0.08
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	74	156	183	5410	491	174	317	7	8	31.4	11.1	33.4	323.3	14.0	16.1	792	0.61
Std Abw	12	9	8	1004	73	33	62	6	22	4.0	1.8	4.3	38.5	10.9	11.8	28	0.11

Abbildung 8.22: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 3

Sommergerste Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM)	ETP T	E	Abl.	Drain.	WUE Pfl	WUE F	WUE Pfl	Thoet.	Wstress	Wstress	Etpot	ETakt/		
	Jul Tag	Jul Tag	Jul Tag														kg ha ⁻¹	mm
Bodenklasse 3																		
Referenz (1971-2005) - Mittel	74	161	189	5246	519	185	334	5	20	28.6	10.3	30.5	353.9		10.1	12.1	748	0.67
Std Abw	12	10	9	693	93	25	85	4	36	2.8	1.5	3.0	34.7		8.2	9.2	30	0.17
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	72	154	180	5142	505	172	333	4	23	30.2	10.3	32.3	335.9		13.4	15.7	795	0.63
Std Abw	25	7	6	658	75	30	65	4	34	3.5	1.6	3.7	38.4		9.8	11.0	25	0.10
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	71	159	185	5243	509	177	331	4	16	29.9	10.4	31.9	338.9		12.7	14.8	769	0.66
Std Abw	13	7	7	834	56	32	41	4	28	3.4	1.8	3.5	36.1		10.1	11.2	27	0.08
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	66	150	176	5289	504	168	336	5	21	31.8	10.5	34.1	318.9		13.7	16.0	828	0.61
Std Abw	11	6	6	1122	60	34	37	4	33	3.8	1.9	4.0	37.5		9.7	10.5	28	0.08
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	71	157	184	5194	491	174	317	4	15	29.9	10.6	31.9	337.5		13.4	15.7	779	0.63
Std Abw	12	8	7	881	54	29	39	4	23	3.2	1.6	3.3	34.5		10.1	11.1	27	0.06
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	69	154	181	5173	491	173	318	3	20	30.2	10.6	32.2	335.2		12.9	15.2	794	0.62
Std Abw	11	7	6	862	73	31	62	3	31	3.4	1.6	3.7	36.9		10.1	11.3	25	0.09
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	71	159	186	5262	503	177	326	4	15	30.1	10.5	32.1	336.5		12.7	14.8	768	0.66
Std Abw	13	7	7	848	56	32	40	3	27	3.5	1.8	3.6	35.9		10.4	11.5	27	0.06
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	67	150	176	5335	481	167	314	3	20	32.2	11.1	34.3	315.0		12.3	14.5	825	0.58
Std Abw	10	8	7	1107	65	35	53	3	34	3.8	2.0	4.2	36.3		9.8	10.8	28	0.06
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	71	157	184	5234	483	175	308	3	14	30.1	10.9	32.0	335.7		12.7	15.0	778	0.62
Std Abw	11	8	7	873	53	29	38	4	21	3.3	1.6	3.3	35.3		10.2	11.2	27	0.07
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	69	152	178	5175	489	170	319	3	16	30.8	10.7	32.9	328.5		13.7	16.0	814	0.60
Std Abw	12	6	6	929	75	32	63	2	27	3.5	1.8	3.7	36.5		10.1	11.3	26	0.09
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	71	158	185	5211	502	175	327	4	14	30.1	10.4	32.1	336.2		13.1	15.3	776	0.65
Std Abw	13	7	7	853	56	33	40	3	26	3.5	1.8	3.6	36.1		10.5	11.6	27	0.08
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	66	148	173	5266	476	161	315	3	14	33.1	11.1	35.3	307.0		14.0	16.3	862	0.55
Std Abw	11	8	7	1219	68	37	54	3	28	4.1	2.2	4.5	37.2		10.2	11.1	30	0.08
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	71	156	183	5224	482	172	310	3	11	30.5	10.9	32.5	331.7		13.7	16.0	791	0.61
Std Abw	11	8	7	907	54	30	38	3	18	3.5	1.7	3.6	36.6		10.4	11.4	27	0.07

Abbildung 8.23: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 3

Sommergerste Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 4	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T mm	E mm	Abt. mm	Drain. mm	WUE PII kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Ertr./ETP kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE PII Eilers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Thcoet. Photos. Jahressum. 1 g ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ Etpot %	
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag														mm
Referenz (1971-2005) - Mittel	75	162	190	5002	530	185	345	11	9	27.2	9.6	29.1	370.8	8.7	10.5	748	0.68
Std. Abw.	13	8	8	623	108	26	98	10	28	2.3	1.4	2.5	29.9	8.7	9.7	29	0.20
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	72	154	181	5004	527	175	352	11	11	28.9	9.7	31.2	349.8	10.7	12.7	796	0.64
Std. Abw.	27	10	8	956	114	36	107	10	31	3.1	1.8	3.7	36.3	10.2	11.4	26	0.18
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	72	158	185	5050	519	177	342	10	6	28.9	9.8	31.0	350.1	10.7	12.7	769	0.67
Std. Abw.	14	9	8	737	70	32	57	9	23	3.3	1.5	3.7	36.3	10.0	11.1	28	0.09
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	69	151	176	5194	529	171	356	11	11	30.7	9.8	33.1	331.0	10.5	12.3	830	0.62
Std. Abw.	15	9	7	1129	98	38	85	9	27	4.1	1.8	4.8	42.0	10.1	11.2	29	0.16
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	72	157	184	5045	516	176	340	10	6	28.9	9.9	30.9	351.4	11.0	13.0	781	0.64
Std. Abw.	13	8	8	869	99	31	90	9	21	3.7	1.5	4.1	39.6	10.4	11.4	28	0.17
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	72	154	181	5038	517	175	341	9	10	29.0	9.9	31.2	348.3	10.1	12.1	795	0.62
Std. Abw.	26	9	8	968	116	36	108	9	28	3.3	1.7	3.8	36.8	10.2	11.4	27	0.20
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	71	159	186	5017	513	176	337	9	6	29.0	9.9	31.0	349.3	10.8	12.8	769	0.67
Std. Abw.	13	8	7	726	75	32	65	9	21	3.3	1.6	3.6	35.4	10.1	11.2	28	0.10
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	69	152	178	5103	493	170	323	9	8	30.4	10.4	32.6	333.2	10.2	12.1	825	0.59
Std. Abw.	13	8	7	1043	81	36	65	8	22	3.4	1.9	3.9	36.4	9.8	11.0	29	0.11
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	73	157	185	5020	502	176	327	9	5	28.8	10.1	30.8	351.1	10.9	12.9	780	0.63
Std. Abw.	13	8	7	781	85	30	73	8	23	3.3	1.4	3.6	37.5	10.4	11.4	28	0.14
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	69	153	179	4966	513	171	342	8	7	29.4	9.9	31.5	344.5	11.9	14.0	815	0.60
Std. Abw.	12	6	6	972	127	36	115	9	27	3.2	1.8	3.5	35.7	10.6	11.7	27	0.20
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	72	158	185	5023	516	175	342	9	5	29.2	9.9	31.3	346.6	11.4	13.5	777	0.66
Std. Abw.	14	8	7	748	88	33	75	9	20	3.3	1.6	3.6	35.7	10.2	11.3	28	0.13
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	67	149	174	5032	483	163	321	7	3	31.4	10.4	33.6	322.7	12.5	14.5	862	0.56
Std. Abw.	12	7	6	1116	79	38	60	7	14	3.6	1.9	4.1	36.8	10.5	11.4	29	0.09
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	72	156	183	5010	500	172	328	8	4	29.3	10.1	31.4	346.2	11.8	13.9	792	0.62
Std. Abw.	13	8	8	909	88	32	76	7	16	3.9	1.5	4.2	40.7	10.7	11.7	28	0.14

Abbildung 8.24: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 4

Sommergerste Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP T mm	E mm	Abt. mm	Drain. mm	WUE Pfl kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Ehlers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. lg ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ Etpot %	
	Jul Tag	Jul Tag	Jul Tag														mm
Bodenklasse 4																	
Referenz (1971-2005) - Mittel	74	162	190	4942	523	186	337	5	10	26.8	9.6	28.7	375.8	7.6	9.4	747	0.69
Std Abw	12	8	8	555	87	24	80	5	28	2.2	1.3	2.4	29.1	8.0	9.1	30	0.16
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	73	153	180	4939	528	175	353	5	15	28.5	9.5	30.8	355.6	9.5	11.6	797	0.64
Std Abw	27	11	9	858	107	32	103	5	36	3.5	1.7	4.2	40.4	9.3	10.5	25	0.18
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	72	159	186	4977	517	179	336	5	8	28.1	9.7	30.1	358.7	9.8	11.8	769	0.67
Std Abw	13	7	7	631	57	28	41	5	21	2.8	1.4	2.9	33.3	9.4	10.6	27	0.08
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	67	151	176	5002	513	170	343	5	11	29.8	9.7	32.0	340.5	10.6	12.7	827	0.62
Std Abw	12	7	6	917	63	34	39	4	25	3.7	1.4	4.0	39.5	10.0	11.2	28	0.08
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	73	157	184	4966	514	178	335	5	8	28.1	9.8	30.1	359.9	10.0	12.1	781	0.65
Std Abw	12	8	7	759	91	28	82	5	24	3.1	1.4	3.4	36.4	9.7	10.9	28	0.15
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	72	153	180	4911	508	174	333	4	13	28.5	9.8	30.6	354.8	9.3	11.4	795	0.63
Std Abw	26	10	8	839	96	33	90	4	33	3.2	1.6	3.7	36.4	9.6	10.9	25	0.15
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	72	159	186	4974	510	177	333	4	7	28.3	9.8	30.3	356.2	9.8	11.8	768	0.67
Std Abw	13	8	7	612	57	28	41	4	20	2.8	1.4	2.9	32.8	9.5	10.7	27	0.08
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	68	151	177	4968	489	169	320	4	12	29.8	10.2	31.8	339.6	9.7	11.6	825	0.59
Std Abw	11	7	6	865	73	32	58	4	26	3.2	1.4	3.5	34.4	9.8	11.1	28	0.09
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	73	157	184	4977	504	177	327	4	8	28.4	10.0	30.3	356.7	9.6	11.7	780	0.63
Std Abw	12	8	7	702	83	28	75	4	28	3.3	1.4	3.7	37.2	9.6	10.8	28	0.14
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	72	152	178	4876	501	171	330	4	8	28.9	9.8	31.0	350.6	10.8	13.1	814	0.61
Std Abw	27	9	8	888	82	34	72	3	22	3.2	1.6	3.7	37.1	9.9	11.2	26	0.12
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	72	158	185	4967	514	176	337	4	7	28.5	9.8	30.5	354.4	10.2	12.3	777	0.66
Std Abw	13	8	7	632	73	29	58	4	19	2.8	1.4	3.0	33.6	9.5	10.6	28	0.09
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	67	148	173	4932	483	162	322	3	7	30.9	10.2	33.1	327.5	11.7	13.8	862	0.56
Std Abw	12	7	6	993	76	35	59	4	19	3.6	1.7	3.9	36.5	10.2	11.3	30	0.09
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	72	156	183	4953	502	174	328	4	6	28.8	9.9	30.7	352.5	10.6	12.7	792	0.62
Std Abw	12	8	8	799	87	29	77	4	21	3.6	1.4	4.0	38.8	10.1	11.3	28	0.14

Abbildung 8.25: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 4

Sommergerste Minimalbodenbearbeitung Bodenklasse 5	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP mm	T mm	E mm	Abf. mm	Drain. mm	WUE Pfl kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Eilers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Koeff. l g ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ Etpot %
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag														
Referenz (1971-2005) - Mittel	74	161	189	4876	528	185	343	7	9	26.4	9.4	28.4	360.8	4.4	5.8	748	0.68
Std Abw	12	10	9	503	86	20	89	6	25	2.0	1.5	2.3	27.2	5.9	6.8	30	0.17
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	73	154	181	4851	517	178	339	6	8	27.4	9.5	29.4	368.1	6.5	8.4	795	0.65
Std Abw	27	8	7	573	73	22	71	5	24	2.5	1.5	3.0	32.4	6.7	7.7	25	0.09
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	72	159	186	4919	517	180	338	6	6	27.5	9.6	29.5	365.9	6.7	8.4	769	0.67
Std Abw	13	7	7	480	51	19	43	5	18	2.6	1.3	2.6	31.2	6.9	7.9	27	0.07
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	67	151	176	4949	515	172	343	6	9	29.0	9.7	31.1	349.5	7.4	9.1	828	0.62
Std Abw	11	6	6	542	56	22	44	5	24	3.6	1.4	3.8	40.4	7.4	8.3	28	0.07
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	73	157	184	4884	506	179	327	6	4	27.5	9.8	29.5	367.0	6.9	8.7	780	0.65
Std Abw	12	9	8	545	58	22	57	5	20	2.8	1.4	3.3	34.5	7.5	8.5	27	0.08
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	72	154	181	4859	502	178	324	5	7	27.5	9.8	29.4	367.0	6.0	7.8	794	0.63
Std Abw	26	7	6	534	69	21	67	4	22	2.5	1.5	2.9	32.6	6.6	7.6	25	0.09
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	72	159	186	4933	515	179	336	6	6	27.7	9.7	29.7	363.5	6.4	8.0	768	0.67
Std Abw	13	8	7	482	60	20	53	5	19	2.4	1.3	2.5	29.5	7.1	8.1	28	0.08
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	67	150	176	4933	490	170	321	5	9	29.4	10.2	31.4	344.6	6.2	7.7	825	0.60
Std Abw	11	7	6	505	67	22	65	5	24	3.4	1.5	3.8	37.2	7.1	8.0	28	0.08
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	72	157	184	4930	493	179	314	5	2	27.6	10.1	29.4	365.6	6.6	8.4	778	0.63
Std Abw	11	7	7	535	48	19	40	4	9	2.9	1.3	2.9	35.4	7.3	8.3	27	0.07
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	72	152	179	4862	499	174	325	4	4	28.0	9.9	30.0	360.0	7.6	9.5	814	0.61
Std Abw	26	7	6	618	72	23	67	4	16	2.8	1.6	3.0	34.7	7.4	8.4	26	0.09
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	72	158	185	4898	510	177	333	5	4	27.9	9.7	29.8	361.5	7.5	9.3	776	0.66
Std Abw	13	7	7	485	52	20	43	4	15	2.5	1.3	2.6	31.2	7.4	8.4	27	0.07
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	67	148	173	4937	486	164	321	4	4	30.4	10.3	32.4	333.9	8.3	10.0	862	0.56
Std Abw	11	6	6	645	70	25	65	5	17	3.8	1.6	4.1	38.9	7.9	8.8	30	0.08
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	72	156	183	4864	494	174	320	5	3	28.1	10.0	30.0	359.6	7.8	9.6	792	0.63
Std Abw	12	9	8	541	58	22	56	4	16	3.1	1.5	3.5	36.6	7.9	9.0	28	0.08

Abbildung 8.26: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Minimalbodenbearbeitung auf Bodenklasse 5

Sommergerste Pflug	Saat	Blüte	Reife	Ertrag (TM) kg ha ⁻¹	ETP		E	Abf.	Drain.	WUE Pfl Ent _{JT} kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE F Ent _{JETP} kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	WUE Pfl Ehlers kg ha ⁻¹ mm ⁻¹	Tkoef. l g ⁻¹	Wstress Photos. Jahressum.	Wstress Wachstum Jahressum.	Etpot mm	ETakt/ ETpot %
	Jul. Tag	Jul. Tag	Jul. Tag		mm	mm											
Bodenklasse 5																	
Referenz (1971-2005) - Mittel	74	161	189	4805	522	185	338	4	11	26.1	9.4	28.0	384.9	4.0	5.4	747	0.68
Std. Abw.	11	9	9	484	76	18	80	4	24	1.8	1.5	2.0	24.7	5.3	6.4	29	0.14
CSIRO A2 2025 HIGH - Mittel	71	153	180	4767	515	177	337	3	13	27.0	9.4	29.1	372.6	5.9	7.9	795	0.65
Std. Abw.	25	7	6	536	68	21	69	3	30	2.4	1.5	3.1	31.3	6.1	7.3	25	0.09
CSIRO A2 2025 LOW - Mittel	70	158	185	4871	516	180	337	4	9	27.2	9.5	29.2	370.0	6.0	7.8	769	0.67
Std. Abw.	12	7	7	457	50	18	43	3	24	2.4	1.2	2.4	30.1	6.4	7.5	27	0.07
CSIRO A2 2050 HIGH - Mittel	65	150	176	4844	513	170	343	4	13	28.7	9.5	30.9	353.1	6.9	8.7	828	0.62
Std. Abw.	11	6	6	500	55	20	44	3	29	3.6	1.4	3.7	40.8	7.1	8.2	28	0.07
CSIRO A2 2050 LOW - Mittel	70	157	184	4863	501	179	322	3	6	27.3	9.8	29.1	370.1	5.9	7.9	779	0.64
Std. Abw.	12	8	7	489	48	17	41	4	16	2.7	1.2	2.8	33.8	6.6	7.8	27	0.07
ECHAM A2 2025 HIGH - Mittel	69	154	181	4767	500	176	323	3	12	27.2	9.7	29.1	371.0	5.4	7.4	794	0.63
Std. Abw.	11	7	6	488	67	19	67	2	26	2.4	1.5	2.8	31.2	6.0	7.2	25	0.09
ECHAM A2 2025 LOW - Mittel	70	158	185	4882	510	179	331	3	8	27.4	9.7	29.3	367.3	6.1	7.9	768	0.66
Std. Abw.	12	7	7	445	50	17	43	3	22	2.4	1.3	2.4	29.7	6.6	7.7	27	0.07
ECHAM A2 2050 HIGH - Mittel	66	150	176	4814	488	167	320	3	14	29.1	10.0	31.2	347.8	5.8	7.4	825	0.59
Std. Abw.	10	6	6	476	65	21	65	3	30	3.3	1.5	4.0	36.3	6.8	8.0	28	0.08
ECHAM A2 2050 LOW - Mittel	70	157	184	4865	492	178	314	3	5	27.4	10.0	29.2	366.6	5.5	7.4	778	0.63
Std. Abw.	12	8	7	492	47	17	40	3	16	2.8	1.2	2.8	34.0	6.5	7.7	27	0.07
HadCM A2 2025 HIGH - Mittel	69	152	178	4779	498	174	324	2	7	27.6	9.7	29.5	365.6	6.8	8.9	814	0.61
Std. Abw.	11	6	6	553	70	21	67	2	20	2.6	1.6	2.9	33.2	6.8	7.9	26	0.09
HadCM A2 2025 LOW - Mittel	70	158	184	4843	509	177	332	3	7	27.4	9.6	29.4	367.0	6.8	8.7	776	0.66
Std. Abw.	12	7	7	449	51	18	43	3	20	2.4	1.2	2.4	30.3	6.9	8.0	27	0.07
HadCM A2 2050 HIGH - Mittel	66	148	173	4825	484	163	321	2	7	29.9	10.1	32.0	339.3	7.7	9.6	862	0.56
Std. Abw.	11	6	6	570	67	23	65	3	21	3.6	1.5	4.0	38.2	7.4	8.4	30	0.08
HadCM A2 2050 LOW - Mittel	70	156	183	4858	490	176	314	3	3	27.7	10.0	29.6	364.4	6.8	8.8	791	0.62
Std. Abw.	12	8	7	507	48	18	40	3	11	2.9	1.3	3.0	35.8	7.2	8.4	27	0.07

Abbildung 8.27: Ergebnisse der Simulationen mit ECHAM5, CSIRO und HadCM3 für Sommergerste bei Herbstpflugfurche auf Bodenklasse 5

9 Abkürzungsverzeichnis

AGES	Österreichische Agentur für Ernährungssicherheit
BD	Bulk Density
BFI	Blattflächenindex
BK	Bodenklasse
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BOKU	Universität für Bodenkultur, Wien
CERES	Crop Environment Resource Synthesis
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CZ	Tschechische Republik
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
FAO	United Nations Food and Agriculture Organization
FAPRI	Food and Agricultural Policy Research Institute
FK	Feldkapazität
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GCM	Globales Zirkulationsmodell
HadCM	Hadley Center Model
HIGH	hohe Klimasensitivität
IHLW	Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft
IKT	Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LOW	niedrige Klimasensitivität
Mini.	Minimalbodenbearbeitung; minimal bodenbearbeitete Variante
Nis.	Niederschlag
NÖ	Niederösterreich
ÖPUL	Österreichisches Programm für eine umweltgerechte und den natürlichen Lebensraum schützende Landwirtschaft
PWP	permanenter Welkepunkt
SAT	Sättigungspunkt
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SRGF	Soil Root Growth Factor
TDR	Time Domain Reflectometry
TM	Trockenmasse
u.a.	unter anderem
Vol. %	Volumsprozent

10 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Pablo Rischbeck
Geburtstag	12. Juni 1979
Staatsbürgerschaft	Deutschland

Ausbildung

Oktober 1997 bis März 2005	Landwirtschaftsstudium an der Univ. für Bodenkultur; Wien Studienzweig: Pflanzenproduktion Erweiterung: Entwicklungszusammenarbeit
----------------------------	--

Beruflicher Werdegang

März 2005 bis August 2007	wissenschaftlicher Mitarbeiter an einem Projekt zum Trockenstressmonitoring bei Getreide mittels Fernerkun- dung am Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation der Universität für Bodenkultur; Wien
---------------------------	---