



Universität für Bodenkultur Wien

**BERECHNUNG DER MÖGLICHEN  
ERTRAGSENTWICKLUNG IN *ZEA MAYS* UND *TRITICUM  
AESTIVUM* BEI SICH ÄNDERNDEN KLIMABEDINGUNGEN  
IM PANNONIKUM BIS 2050 - MITHILFE VON  
SIMULATIONSMODELLEN**

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

„Diplom-Ingenieur“

an der Universität für Bodenkultur Wien

Studienrichtung „Nutzpflanzenwissenschaften“

Verfasser: **Marcel Schlicker, B.Sc.**

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

Wien, am 20.04.2017

## **Danksagung**

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die die Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben und mir während der Anfertigung mit Rat und Tat zur Seite standen. Weiters möchte ich mich bei all jenen bedanken, die die Vorgehensweisen stets mit kritischen Fragen überprüft haben und mich somit davor bewahrten den richtigen Weg aus den Augen zu verlieren. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuungsprofessor Herrn Prof. Dr. Josef Eitzinger, vom Institut für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur Wien, der mich mit meiner Idee eine Masterarbeit zu verfassen, willkommen hieß, und mir bei jeglichen Fragen stets mit wissenschaftlichen Rat zur Seite stand. Außerdem möchte ich mich bei Ihm für die zur Verfügung gestellte Literatur und der Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Inputs und Ergebnisse bedanken.

Für die Bereitstellung von diversen Ernteerhebungen und Niederschlagsdaten möchte ich mich bei der Landwirtschaftskammer und beim hydrographischen Dienst Österreich bedanken.

Eine ebenso große Stütze bei der Anfertigung dieser wissenschaftlichen Arbeit war meine Familie, die mich mit Freude bei der Verfassung der Masterarbeit begleitete und mir seit jeher die notwendige Unterstützung für große Leistungen gibt, herzlichen Dank.

## Kurzfassung

Die Landwirtschaft ist seit jeher ein klimasensitiver Wirtschaftszweig, der sich an die klimatischen Gegebenheiten und den Verlauf des Wetters und der Witterung, einschließlich extremer Ereignisse, anpassen muss. Nachdem wir uns also inmitten eines Klimawandels befinden und uns dieser auch in den nächsten Dekaden begleiten wird, muss sich gezwungenermaßen etwas in der landwirtschaftlichen Produktionsweise ändern. Das soll jedoch keinesfalls heißen, dass der Klimawandel nur schlechte Änderungen mit sich bringt und dadurch quer durch die Bank die Erträge sinken werden. Der Klimawandel kann auch zu ganz anderen Entwicklungen führen.

In dieser Arbeit soll das geografische Gebiet Pannonikum betrachtet und die Wirkungen des Klimawandels auf die Produktion von Körnermais und Winterweizen erfasst werden. Außerdem sollen mögliche Anpassungsmaßnahmen gegen sinkende Erträge untersucht und bewertet werden. Bei den Anpassungsmaßnahmen entschied man sich für die Untersuchung einer Hecke als Windschutz und einer Mulch-Schicht als Evaporationsschutz. Die Untersuchungen wurden dabei mittels Simulationsmodellen getätigt, wobei man sich für das Modell namens „Aqua-Crop“ von der FAO entschied. Die Simulationen wurden dabei für das Nordburgenland mit zwei RCP-4.5 Szenarien, welche bis ins Jahr 2050 reichen, durchgeführt. Das Modell wurde dabei mit Erträgen kalibriert, die in dem Zeitraum von 2001-2012 am elterlichen Betrieb erhoben worden sind. Auf Grundlage dieser Kalibrierung wurden die Simulationsergebnisse des Zeitraums 2001-2012 mit jenen des Zeitraums von 2021-2050 verglichen. Außerdem wurden die Simulationen mit unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Atmosphäre gerechnet, sodass eine unabhängige Bewertung des CO<sub>2</sub>- Düngeeffekt möglich ist, und die mögliche Ertragsspanne der Kulturen in Abhängigkeit des CO<sub>2</sub> Gehalts in der Atmosphäre dargestellt werden kann.

Die Simulationen für das Pannonikum als Untersuchungsgebiet und unter den vorgegebenen RCP 4.5 Szenarien zeigten, dass es durch sich ändernde Klimaverhältnisse auch zu Änderungen bei den Erträgen kommen wird und dass ohne gezielt gesetzte Anpassungsstrategien das Ertragsniveau nicht vollständig gehalten werden kann. Bei Mais und auf schlechten Standorten mit geringer Bodenwasserspeicherfähigkeit kommt es dabei ohne Anpassungsstrategien häufiger

zu sinkenden Erträgen. Zusätzlich konnte der CO<sub>2</sub> Düngeneffekt bewertet und die ertragssteigernde Wirkung der Anpassungsstrategien bestätigt werden.

## **Abstract**

Agriculture has always been a climate-sensitive industry, which must adapt to the climatic conditions and weather, including extreme events. As we are in the midst of a climate change we will have to adapt agricultural production in the future decades. However, this should not mean that climate change will result in detrimental changes and the yield will uniformly drop. Climate change can also lead to completely other developments.

In this thesis, the geographical area of Pannonikum is to be considered and the effects of climate change on the production of corn and winter wheat are recorded. In addition, possible adaptation measures against falling yields are to be examined and assessed. The adaptation measures included a hedge as a wind-breaking object and a mulch layer for protection against evaporation. The investigations were carried out using simulation models, whereby the model named "Aqua-Crop" was chosen by the FAO. The simulations were carried out for the Nordburgenland with two RCP-4.5 scenarios, which extend into the year 2050. The model was calibrated with yields collected at the arable farm of my parents during the period 2001-2012. Based on this calibration, the simulation results of the period 2001-2012 were compared with those of the projected years 2021-2050. In addition, the simulations were calculated with different CO<sub>2</sub> concentrations of the atmosphere. This allows an independent assessment of the CO<sub>2</sub> fertilization effect and the possible yield span of the crops can be represented in accordance with CO<sub>2</sub> content in the atmosphere.

The simulations for the Pannonikum as an investigation area and under the given RCP 4.5 scenarios showed that changes in climatic conditions also lead to changes in the yields of the crops. Without targeted adjustment strategies the yield level cannot be maintained. Concerning maize and inefficient locations for agriculture with low soil water storage capacity, declining yields are more frequent without adaptation strategies. In addition, the effect of fertilizing with CO<sub>2</sub> was assessed and the yield-enhancing effect of the adaptation strategies could be confirmed.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Problemstellung.....	8
1.2	Forschungsfragen.....	9
2	Literaturüberblick.....	10
2.1	Klima und Klimawandel in Österreich.....	10
2.2	Winterweizen ( <i>Triticum aestivum</i> ).....	12
2.2.1	Verbreitung und Anbau in Österreich.....	12
2.2.2	Morphologie und Biologie des Weizens.....	13
2.2.3	Bedeutende Schädlinge und Krankheiten im Pannonikum.....	14
2.3	Körnermais ( <i>Zea mays</i> ).....	14
2.3.1	Verbreitung und Anbau in Österreich.....	14
2.3.2	Morphologie und Biologie von Mais.....	16
2.3.3	Bedeutende Schädlinge und Krankheiten im Pannonikum.....	16
2.4	Simulationsmodelle.....	17
2.4.1	Simulationsmodelle in der Landwirtschaft.....	18
2.5	Klimarelevanz für die Ertragsbildung.....	19
3	Material und Methoden.....	21
3.1	Standort.....	21
3.2	Bodendaten.....	23
3.3	Wetterdaten.....	27
3.3.1	Szenarien.....	28
3.4	Pflanzendaten.....	32
3.4.1	Winterweizen.....	32
3.4.2	Körnermais.....	33
3.5	Ertragsdaten.....	33
3.6	Anbau und Kulturführung.....	33

3.6.1	Winterweizen .....	33
3.6.2	Körnermais.....	34
3.7	Anpassungsstrategien .....	34
3.8	Simulationsmodelle .....	37
3.8.1	ETo Kalkulator .....	37
3.8.2	AquaCrop.....	38
3.9	Beschreibung der Simulationsszenarien .....	41
4	Ergebnisse .....	44
4.1	Kalibrierung des Modells bei Winterweizen .....	44
4.2	Kalibrierung des Modells bei Körnermais .....	45
4.3	Ertragsabschätzung bei Klimaveränderung ohne Anpassungsstrategie.....	47
4.4	Mulch-Schicht als Anpassungsstrategie .....	49
4.5	Hecke als Anpassungsstrategie .....	53
4.6	Vergleich der Mulch-Schicht und Hecke als Anpassungsstrategie .....	55
4.7	Vergleich der Anpassungsstrategien ohne CO <sub>2</sub> Düngeeffekt .....	57
4.8	Auswirkungen eines erhöhten CO <sub>2</sub> Gehaltes bei Klimaveränderung .....	60
4.9	Veränderung des Bewässerungsaufwands auf Boden 2 bei Mais.....	63
5	Diskussion .....	68
6	Abkürzungsverzeichnis.....	75
7	Abbildungsverzeichnis.....	77
8	Tabellenverzeichnis.....	80
9	Literaturverzeichnis .....	81
10	Anhang .....	88

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die anthropogen verursachten Klimaveränderungen stellen ein globales Phänomen dar. Ihre Auswirkungen allerdings sind für die einzelnen Länder, Regionen und Wirtschaftssektoren ganz unterschiedlich. Man geht davon aus, dass in Regionen deren Empfindlichkeit hoch ist, der Klimawandel die Situation weiter verschärfen wird, hierbei ist vor allem von den Entwicklungsländern die Rede. Kein Land wird jedoch von dem Klimawandel verschont bleiben, so wird es auch in Österreich zu spürbaren Veränderungen kommen. Hierzulande spricht man von der Reduktion von Dauerfrostböden, einer Niederschlagsverlagerung von den Sommermonaten in Richtung Wintermonate und einer Steigerung der Jahresdurchschnittstemperatur um 2°C bis zu dem Jahr 2050 (vgl. THALER et al., 2012). Außerdem werden durch den vom Mensch verursachten Klimawandel Wetterextreme zunehmen und sich verschlimmern. Sie werden in Zukunft häufiger, länger und intensiver auftreten.

Diese Prognosen für die kommenden Dekaden werden nicht ohne Folgen vorübergehen. So rechnet man in der Landwirtschaft mit schwierigen Zeiten in denen landwirtschaftliches Knowhow und flexibles Management an Bedeutung gewinnen werden.

Mit der prognostizierten Klimaveränderung kommt es also zwangsläufig auch zu einer Veränderung der Standortfaktoren und somit zu einer Veränderung der Entwicklung und des Wachstums der Pflanzen (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Wie die etablierten Kulturpflanzen, Körnermais und Winterweizen, dabei mit den veränderten Umweltbedingungen im Pannonikum zurechtkommen und wie sich dadurch die Erträge entwickeln könnten ist Gegenstand der vorliegenden Masterarbeit. Jedenfalls wird die zukünftige Ertragsentwicklung darüber entscheiden, ob die Kulturarten Körnermais und Winterweizen ihre Popularität in diesem Gebiet beibehalten können, denn vor allem der Winterweizen gerät bei den derzeit vorherrschenden Marktfruchtpreisen und der generellen Niedrigertragslage enorm unter Druck.



## 1.2 Forschungsfragen

Mit folgenden Forschungsfragen setzt sich diese Masterarbeit auseinander und sollten durch die Ausarbeitung beantwortet werden können:

- Wie verändern sich die Erträge bei ausgewählten Klimaszenarien im Pannonikum bei Körnermais und Winterweizen?
- Können Anpassungsstrategien eine mögliche negative Ertragsentwicklung bei Körnermais und Winterweizen reduzieren oder kompensieren?
- Wie hoch ist der Effekt einer Mulch-Schicht als Evaporationsschutz bei Körnermais und Winterweizen und die Ertragsauswirkung unter den betrachteten Klimaszenarien?
- Wie hoch ist der Effekt einer Hecke als Evaporationsschutz bei Körnermais und Winterweizen und die Ertragsauswirkung unter den betrachteten Klimaszenarien?
- Wie wirkt sich ein erhöhter CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre auf die Erträge bei Körnermais und Winterweizen aus?
- Wie würden sich die Erträge bei den ausgewählten Klimaszenarien ohne den CO<sub>2</sub> Düngeeffekt und ohne Anpassungsstrategie entwickeln?

## 2 Literaturüberblick

### 2.1 Klima und Klimawandel in Österreich

In Österreich ist die jährliche Durchschnittstemperatur seit 1880 um 2°C gestiegen, etwa die Hälfte davon seit 1980 (vgl. HAIMBERGER et al., 2014). Im globalen Durchschnitt stieg die Temperatur hingegen nur um 0,85°C. Dies weist auf einen stark regionalen Unterschied der Klimawandelauswirkungen hin. Ohne gezielte Emissionsverringerungen ist bis 2100 mit einem weiteren Temperaturanstieg zu rechnen, im globalen Durchschnitt soll dieser zwischen 3° bis 5°C liegen (vgl. HAIMBERGER et al., 2014). Überwiegend verursacht wird die Entwicklung durch anthropogene Treibhausgasemissionen, sowie andere menschliche Aktivitäten, welche die Strahlungsbilanz der Erde beeinflussen (vgl. AHRENS et al., 2014). Außerdem werden die dadurch verursachten Effekte durch selbstverstärkende Prozesse, wie die Ei-Albedo Relation oder die erhöhte Treibhausgasemission aufgrund der temperaturbedingten Permafrostboden- Reduktion, vergrößert.

In Österreich ist ein weiterer Anstieg der Temperatur sehr wahrscheinlich, so rechnet man in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts mit einer durchschnittlichen Temperatursteigerung um 1,4°C zu dem derzeitigen Niveau (vgl. AHRENS et al., 2014). Die Niederschlagsentwicklung zeigt hingegen deutlich regionale Unterschiede, wie eine Analyse der letzten 150 Jahre zeigt. In West-Österreich konnten Niederschlagszunahmen und in Südost-Österreich Niederschlagsabnahmen verzeichnet werden. Die Veränderung machte in beiden Fällen 10 bis 15 Prozent aus (vgl. AHRENS et al., 2014). Neben den häufigeren Starkregenereignissen werden aber auch Niederschlagsverlagerungen von den Sommer- in die Wintermonate als wahrscheinlich angesehen (vgl. AHRENS et al., 2014). Im Jahresdurchschnitt gibt es jedoch keinen eindeutigen Trend, weil Österreich im Übergangsbereich zwischen zwei Zonen mit entgegengesetzter Niederschlagstrends liegt. Unter anderem ist es auch bei den Temperaturextremen zu Änderungen gekommen, so sind kalte Nächte seltener und heiße Tage häufiger geworden. Im 21. Jahrhundert rechnet man mit einer Fortsetzung dieser Entwicklung, wodurch auch die Häufigkeit von Hitzewellen zunehmen wird (vgl. AUER et al., 2014). Diese in Zukunft häufiger auftretenden, extremen Wetterereignisse werden die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels weiter erhöhen. Dabei haben sich die ökonomischen Schäden durch den Klimawandel in Österreich die letzten drei Dekaden bereits ordentlich erhöht (vgl.

APCC, 2014). Die durch den Klimawandel zu erwarteten wirtschaftlichen Auswirkungen werden also überwiegend durch Extremereignisse und außergewöhnliche Witterungsperioden bestimmt (vgl. KÖNIG, et al., 2014). Die Veränderungen bei den Niederschlägen und in der Temperatur können dennoch auch in der Landwirtschaft und im Wintertourismus erhebliche ökonomische Auswirkungen haben. So kann das Ertragspotential in der Landwirtschaft und die Schneesicherheit in den Winterskigebieten, durch die sich ankündigenden Veränderungen, erheblich verringert werden.

### AVERAGE ANNUAL TEMPERATURE

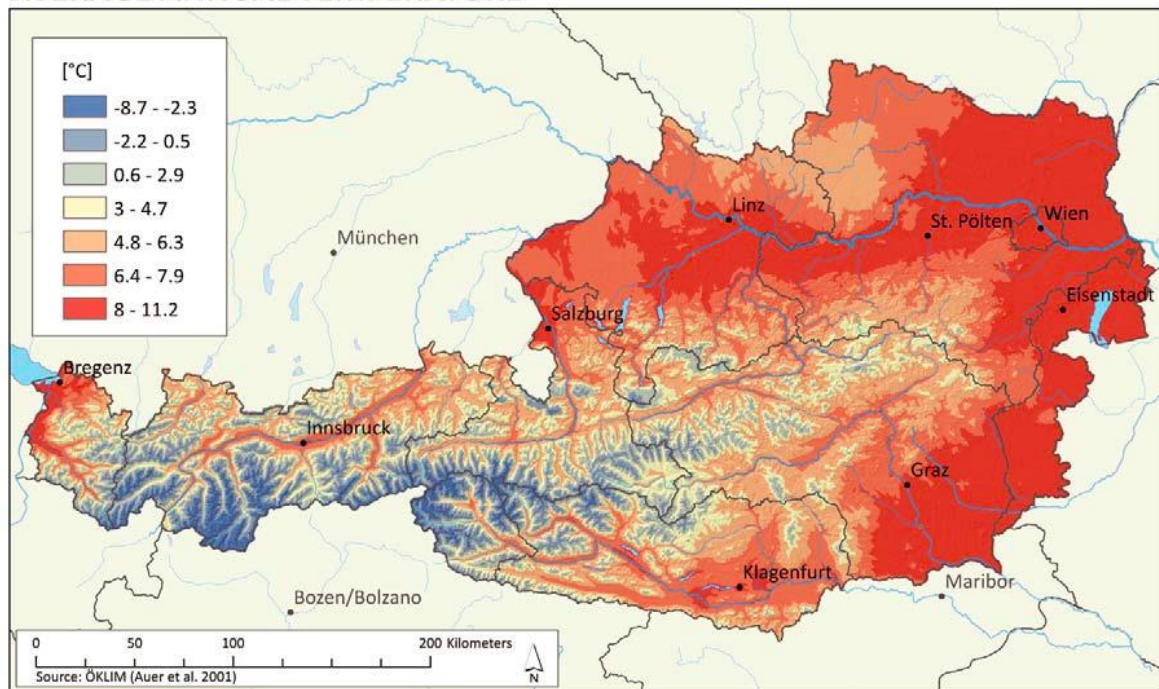


Abbildung 1: Jährliche Durchschnittstemperatur [ °C], AUER et al., (2001)

## MEAN ANNUAL PRECIPITATION

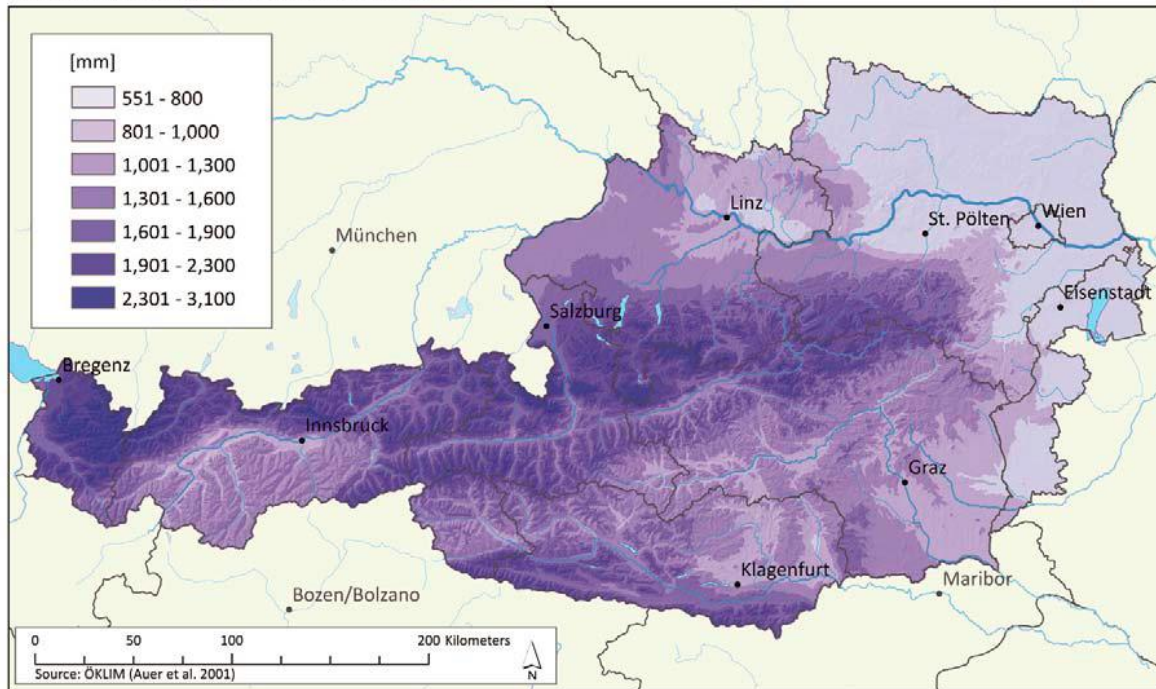


Abbildung 2: Mittlerer jährlicher Niederschlag [mm / Jahr], AUER et al., (2001)

## 2.2 Winterweizen (*Triticum aestivum*)

### 2.2.1 Verbreitung und Anbau in Österreich

Der Weizen zählt zu den ältesten Kulturpflanzen der Menschheit und wird seit mindestens 8000 Jahren kultiviert. Der Ursprung des Weizens liegt dabei im eurasischen Gebiet, vermutlich im Norden der arabischen Halbinsel (vgl. FRANKE, 1992). Weizen wird heute weltweit flächenmäßig am meisten angebaut und liegt in der mengenmäßigen Produktion an zweiter Stelle hinter Mais (vgl. FRANKE, 1992). Auch in Österreich zählt der Weizen zu den wichtigsten Kulturarten und wird auch hierzulande flächenmäßig am häufigsten angebaut. Dabei liegt die Anbaufläche von Weizen in Österreich bei ungefähr 280.000 Hektar, bei einem durchschnittlichen Ertrag von 5,5 Tonnen/Hektar. Im Pannonikum ist der Durchschnittsertrag hingegen etwas geringer. Dafür gibt es wiederum einige Gründe, zu denen neben dem unterschiedlichen Produktionsziel auch die Witterung und das Klima zählen. Unter dem unterschiedlichen Produktionsziel versteht man, dass vom mittleren bis östlichen Niederösterreich bis zum nördlichen und mittleren Burgenland überwiegend Qualitätsweizen und vom westlichen Niederösterreich, über Oberösterreich und dem

restlichen Alpenvorland überwiegend Weizen und Futterweizen produziert wird. Dabei ändert sich neben der Qualität auch der Ertrag pro Hektar (vgl. BMLFUW, 2015).

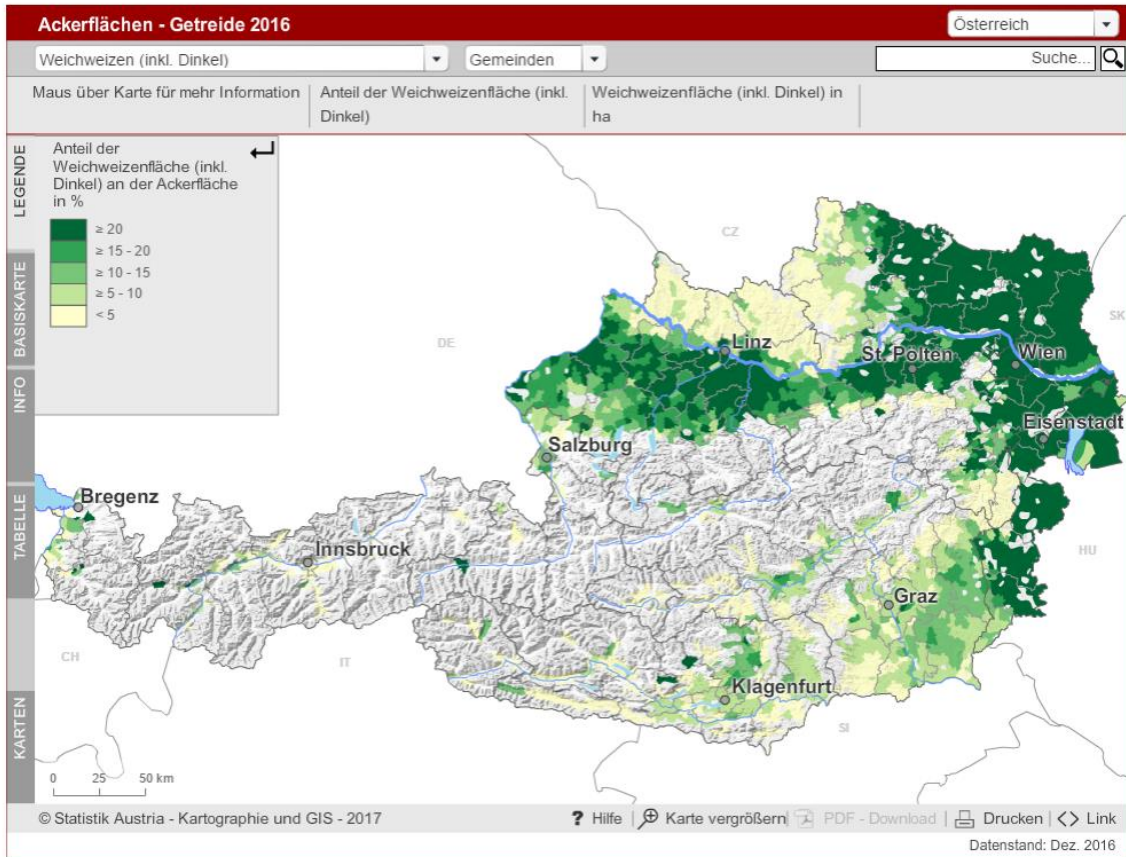


Abbildung 3: Weizenanbaufläche inklusive Dinkel in Prozent an der Ackerfläche (Quelle: Statistik Austria)

## 2.2.2 Morphologie und Biologie des Weizens

Der Weizen gehört zu der Familie der Süßgräser und ist die klimatisch und edaphisch anspruchsvollste Getreideart. Nährstoffreiche Lehm- und Lössböden stellen dabei die ideale Produktionsgrundlage dar. Neben der mit Nährstoffen gut versorgten Böden ist auch eine gute und stabile Wasserführung der Böden notwendig, die die Weizenpflanzen kontinuierlich mit ausreichend Wasser versorgen können. Weizen ist außerdem eine sogenannte C3-Pflanze mit einer optimalen Wachstumstemperatur von 15 bis 25°C. Höhere Temperaturen würden Temperaturstress verursachen und wenn sie über eine längere Zeit auftreten auch die Vegetation verkürzen, was einer Ertragsminderung gleichkommt. Die Blüte der Weizenpflanze ist üblicherweise ab einer Temperatur von 14°C möglich. Die gesamte Vegetation der Weizenpflanze in



den gemäßigten Breiten wie in Mitteleuropa, dauert hingegen abhängig ob Sommer- oder Winterweizen zwischen 120- bis 145 Tage bei Sommerweizen und 280 bis 350 Tage bei Winterweizen (vgl. FRANKE, 1994). Als Vegetation versteht man die Zeitspanne zwischen Aussaat und Reife.

### 2.2.3 Bedeutende Schädlinge und Krankheiten im Pannonikum

Die Anzahl der Schädlinge und Krankheiten im Pannonikum sind überschaubar, haben aber enormes Potential und müssen deshalb in ihrer Entwicklung und dem Auftreten gut beobachtet werden. Bei den Krankheiten muss speziell auf den immer stärker auftretenden Gelbrost geachtet werden. Der Gelbrost kündigt sich mit auffälligen roten Pusteln an welche in weiterer Entwicklung streifenförmig angeordnet werden. Der Gelbrost kann im Extremfall bis zur Notreife führen und hat aufgrund dessen auch enormes Schadpotential. Im Gegensatz zu vielen neuen Hohertragsorten ist die Sorte Capo jedoch weniger stark für Gelbrost anfällig. Bei den Schädlingen muss auf das Getreidehähnchen und auf Wanzen geachtet werden. Die Entwicklung dieser beiden wird vor allem durch trockene und warme Witterung im Frühsommer gefördert, also Bedingungen die wir im Pannonikum meist haben. Das Getreidehähnchen kann dabei durch Streifenfraß und den dadurch entstehenden Assimilationsflächenverlust zu Ertragsminderungen von bis zu 20 Prozent führen, ähnlich den Getreidewanzen. Diese verhindern durch Saugtätigkeit hohe Einzelkorngewichte und führen zu Problemen in der Verarbeitung, da ihr Speichel proteasehaltig ist und so den Abbau des Klebereiweißes im Korn nach sich zieht (vgl. STEINKELLNER und KOSCHIER, 2016).

## 2.3 Körnermais (*Zea mays*)

### 2.3.1 Verbreitung und Anbau in Österreich

Die Kulturpflanze Mais ist vor ungefähr 8000 bis 9000 Jahren durch Züchtung aus der Pflanze Teosinde hervorgekommen. Die Herkunft der Pflanze war lange unklar, heute jedoch weiß man, dass die Züchtungen in Mexiko stattgefunden haben und daher auch Mexiko als Ursprungsland gilt. Die Bedeutung der Pflanze ist dabei weltweit stetig gestiegen und wird heute in vielfältiger Weise genutzt und verwertet. Die größte Bedeutung haben dabei die Verwendung des Maises als Nahrungsmittel und als Futtermittel. Andere Verwendungszwecke wären die Zitronensäure-, Stärke- oder

Bioethanolproduktion. Die globalen Anbauflächen bleiben trotz der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten deutlich hinter jenen des Weizens zurück. Durch die hohe Flächenproduktivität liegt die mengenmäßige Produktion jedoch etwas vor jener des Weizens (vgl. BMLFUW, 2015). Das gleiche Schema trifft auf die Anbauflächen und den Erntemengen von Österreich zu. In Österreich liegt dabei die Anbaufläche von Körnermais bei ungefähr 200.000 Hektar. Die Hauptproduktionsgebiete liegen dabei in den Bundesländern Niederösterreich, Oberösterreich und der Steiermark. Aber auch im Burgenland wird Mais in reduzierter Form produziert, wobei im Nordburgenland aufgrund der geringeren Niederschläge, bei schlechter Bodenbonität, in manchen Jahren eine künstliche Bewässerung der Flächen notwendig sein kann. Der durchschnittliche Kornertrag in Österreich liegt dabei um etwa 10 Tonnen/Hektar, welcher im internationalen Ländervergleich im Spitzenfeld liegt.

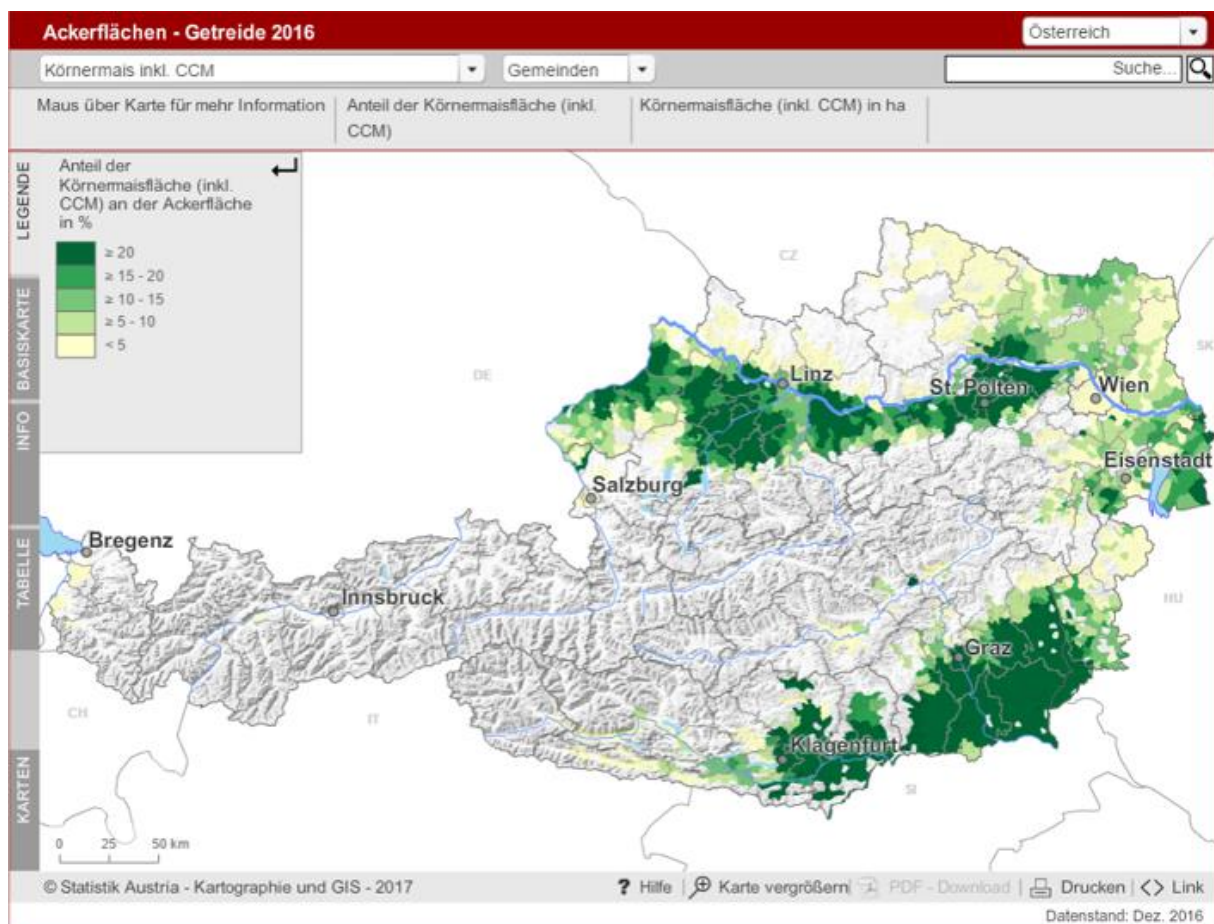


Abbildung 4: Körnermaisbaufläche inklusive CornCobMix in Prozent an der Ackerfläche (Quelle: Statistik Austria)

### 2.3.2 Morphologie und Biologie von Mais

Die Kulturpflanze Mais gehört zu der Familie der Süßgräser und konnte sich aufgrund der guten Anpassungsfähigkeit rasch verbreiten. Mais ist außerdem eine sehr wärmeliebende Pflanze die über die gesamte Vegetation hohe Temperaturen verlangt. Das Temperaturoptimum für das Pflanzenwachstum liegt dabei bei 25 bis 35°C. Grenzen im Anbau sind durch Früh- und Spätfröste gesetzt. Ist der Mais jedoch noch nicht aufgelaufen, erträgt er Temperaturen von -6° bis -8°C ohne Schwierigkeiten (vgl. WEHRLI und HÄBERLI, 1982). Aufgrund der Zugehörigkeit von Mais zu den C4-Pflanzen ist sie auch durch einen sehr effizient arbeitenden Wasserhaushalt gekennzeichnet. Für C4-Pflanzen sind in der Regel niedrige Transpirationskoeffizienten charakteristisch. Nachdem bei Mais aber sehr viel Trockenmasse produziert wird, ist der Wasserbedarf pro Flächeneinheit größer als beispielweise der der Gerste. Um einen mittleren Ertrag erzielen zu können, müssen in den Monaten Juli und August mindestens 150 bis 170mm Niederschlag zur Verfügung stehen (vgl. WEHRLI und HÄBERLI, 1982). Die Vegetation von Mais dauert naturgemäß in den gemäßigten Breiten etwa 190 bis 260 Tage.

### 2.3.3 Bedeutende Schädlinge und Krankheiten im Pannonikum

Die Anzahl der Schädlinge und Krankheiten im Pannonikum sind überschaubar, haben aber großes Potential in Bezug auf Ertragsminderungen. Nennenswerte Krankheiten welche den Ertrag spürbar mindern treten bis dato in dem Gebiet nicht auf. Der Maisbeulenbrand und die Turticum Blattflecken können zwar Jahr für Jahr in den Beständen erfasst werden, haben aber noch keine spürbar mindernde Wirkung auf den Ertrag. Ganz anders ist die Situation bei den Maisschädlingen, hier spricht man von drei Hauptschädlingen, die Ertragsausfälle von 50 Prozent und mehr verursachen können. Die Rede ist vom Drahtwurm, dem Maiswurzelbohrer und dem Maiszünsler. Als erster Schädling im Frühjahr treten die Drahtwurmlarven auf, sie fressen sich in den Wurzelapparat von jungen Maispflanzen und führen dabei meist zum Absterben der Pflanzen. Ein weiterer Schädling ist der Maiswurzelbohrer, der auf vielfältige Weise die Pflanze schädigen kann. Die Larven fressen dabei an den Wurzeln und können zu Problemen bei der Aufnahme von Wasser und Nährstoffen führen. Ein extremer Befall der Maiswurzelbohrerlarven kann sogar bis zum Umbrechen der Pflanzen führen, wenn der Wurzelapparat die Verankerung der Pflanze im Boden aufgrund von starker



Schädigung nicht mehr erfüllen kann. Die adulten Käfer des Maiswurzelbohrers schädigen hingegen durch Fraß an den Befruchtungsorganen, also Staubfäden und Pollen und können daher zu Befruchtungsproblemen führen. Alle diese Schädigungen, verursacht durch den Maiswurzelbohrer, treten im Pannonikum seit einigen Jahren massiv auf. Die Ursache dafür sind vor allem die weitreichenden Monokulturen und die nur selten vorhandene Fruchtfolge. Aufgrund der großflächig angewendeten mechanischen Bekämpfung des Maiszünslers sind die durch ihn verursachten Schäden überschaubar. In den letzten Jahren konnten jedoch auch bei diesem Schädling erhöhte Schädigungen festgestellt werden.

## **2.4 Simulationsmodelle**

Die Simulation kann umfassend als adäquate Nachahmung der Realität definiert werden. Es werden Experimente mit Hilfe von Modellen durchgeführt, an Stelle von Experimenten mit in der Empirie anzutreffenden Versuchseinheiten. Die Simulation umfasst also die Konstruktion, den Ablauf und die Auswertung numerischer Modelle (vgl. BREITENEGGER und KLEINERT, 1984).

Der Einsatz von Simulation empfiehlt sich immer dann, wenn Experimente und Messungen in der Realität zu langsam (Bevölkerungsentwicklungen), zu schnell (Explosionsverhalten), unmöglich (Urknall) oder schlicht teuer (Fabrikplanung) wären. Insbesondere bei komplexen Realsystemen sind die Grenzen analytischer Methoden und Beschreibungen schnell erreicht. Simulation dagegen kann auf Basis einer geeigneten Modellierung sehr umfangreiche Systeme handhaben und dem Anwender die Zusammenhänge der einzelnen Systemvariablen verdeutlichen. (vgl. LAW and KELTON, 2000). Über Simulationsläufe wird das zeitliche Ablaufverhalten von Systemen abgebildet. Es kann protokolliert, reproduziert, analysiert und interpretiert werden und zusätzlich zu Sensitivitätsanalysen herangezogen werden.

Mit Simulation können bestehende Systeme optimiert werden, beispielweise durch effizienteren Einsatz von Ressourcen oder die Verbesserung von Steuerungsstrategien während des Betriebs. Zudem kann die Planung noch nicht existenter Systeme unterstützt werden. Allein die schlichte Visualisierung des dynamischen Systemverhaltens kann die Analyse komplexer Zusammenhänge ungemein erleichtern und erlaubt den Einsatz von Simulationsmodellen als Schulungsinstrument.

Der geschickte Einsatz von Simulation in der Praxis kann erhebliche Kostenvorteile mit sich bringen, kann Kostenrisiken aufdecken und kann eine erhöhte Investitionssicherheit schaffen.

#### 2.4.1 Simulationsmodelle in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft werden Simulationsmodelle seit den 1960 Jahren verwendet. Seither verlief die Entwicklung in der elektronischen Datenverarbeitung immens schnell, unter anderem weil man in den Modellen großes Potential sah. Innerhalb von nur wenigen Jahren nach der erstmaligen Verwendung eines Simulationsmodells in der Landwirtschaft kam es zur Überarbeitung und Weiterentwicklung (vgl. PENNING de VRIES et al., 1989). Auf das sogenannte Elcros Model (vgl. WIT et al., 1970) folgte im Jahr 1978 das Bacros Model (vgl. WIT et al., 1978) und auf dieses folgte im Jahr 1982 das sogenannte Sucros Model (vgl. van KEUTEN et al., 1982). Man war sich jedoch einig, dass man bei all den genannten Modellen etwas ändern muss, möchte man sie den Landwirten und Leuten in der Praxis verfügbar machen (vgl. PENNING de VRIES et al., 1989). Modelle könnten dabei auch dem Wissenstransfer aus der Forschung in die Praxis dienen, und daher zu einer effizienteren Verwendung von Dünge- und Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden (vgl. PENNING de VRIES et al., 1989). Diese neuartige Möglichkeit der Ressourceneinsparung machte man sich dabei als erstes in den Niederlanden nützlich. Dort werden Modelle seit 1984 für die Einsparung von Dünge- und Pflanzenschutzmittel eingesetzt (vgl. ZADOKS et al., 1984). Das mit der Modellverwendung einhergehende Einsparungspotential machte man sich auch in den USA zu nutzen, hier wurden Modelle für eine Effizienzsteigerung in der Bewässerung eingesetzt (vgl. PENNING de VRIES et al., 1989). Weitere Möglichkeiten der Modellanwendung in der Landwirtschaft wären: Die Chancen einer Kulturpflanze die bis dato nicht in einem Gebiet kultiviert worden ist zu simulieren und aufgrund dessen abzuschätzen. Am Beispiel Weizen wurde dies in Zambia (vgl. KEULEN and de MILLIANO, 1984) und Südostasien (vgl. AGGANVAL and PENNING de VRIES, 1988) erfolgreich angewendet. Durch diese Art der Simulationsanwendung kann es auch in Entwicklungsländern zu Verbesserungen kommen, dabei ist von einer besseren landwirtschaftlichen Planung und Entwicklung die Rede (vgl. WIT et al., 1988). Eine enorm wichtige zusätzliche Fähigkeit die wir durch die Verwendung von Modellen gewinnen konnten, ist das rasche und transparente Abschätzen von Auswirkungen bestimmter Managemententscheidungen oder Umweltänderungen (vgl.

Gourdriaan et al., 1984). Die hier vorliegende Masterarbeit soll genau diese regionalen und multiplen Effekte von sich ändernden Klimabedingungen und den Anpassungsmaßnahmen als Strategie gegen diese im geografischen Pannonikum in den Kulturen Winterweizen und Körnermais mithilfe von Simulationsmodellen erfassen und bewerten.

Dennoch ist bei der Simulationsmodellierung erhöhte Vorsicht geboten, da durch falsche Inputdaten von Pflanzen-, Wetter- oder Bodenparameter oder nicht richtig rechnenden Modellkomponenten es hier rasch zu fälschlichen Ergebnissen kommen kann (vgl. EITZINGER et al., 2008).

## **2.5 Klimarelevanz für die Ertragsbildung**

Verändert sich das Klima, so ändern sich auch die Gegebenheiten für Wachstum und Entwicklung der Pflanzen. Die Landwirtschaft als klimasensitiver Wirtschaftszweig wird aber nicht nur von den direkten Wirkungen des Klimawandels betroffen sein, denn auch indirekte Wirkungen wie sich ändernde Bodeneigenschaften oder verändernde Unkraut- und Schädlingspopulationen werden sich auf die Ertragsbildung und deren Potential auswirken (vgl. EITZINGER, et al., 2003). Außerdem werden für die zukünftigen Dekaden stärkere Wetterkapriolen prognostiziert, die in Form von Hitzewellen, Dürren und Starkniederschlägen auftreten könnten und damit die Ertragssicherheit reduzieren und die Ertragsschwankungen steigern würden (vgl. PELTONEN- SAINIO et al., 2010). In der Landwirtschaft würde diese Entwicklung zu verringerter Planungssicherheit führen und das ökonomische Risiko erhöhen.

Zu den maßgeblichen Umweltänderungen zählen Änderungen im atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt, in der thermischen Vegetationsperiode, im Bodenwasserhaushalt, in der Pflanzenentwicklung und im Auftreten von extremen Wetterlagen und Witterungsereignissen (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Der CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung von 280ppm bis heute auf 400ppm gestiegen (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Als weitere Entwicklung erwartet man Steigungen von 1 bis 2ppm pro Jahr (vgl. GOUDRIAAN, 1987). Nachdem die Photosyntheserate proportional zum Gehalt an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre steigt, geht man bei optimaler Licht-, Wasser- und Nährstoffversorgung von einer Ertragsteigerung aus (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Dabei würden C<sub>3</sub>-Pflanzen stärker als die C<sub>4</sub>-Pflanzen profitieren, wobei die ertragssteigernden Effekte nur dann vollständig zur

Geltung kommen, wenn die klimatischen Veränderungen (Temperatur und Wasserverfügbarkeit) nicht zu zusätzlichen Stressfaktoren für die Pflanze werden (vgl. CHMIELEWSKI, 2007).

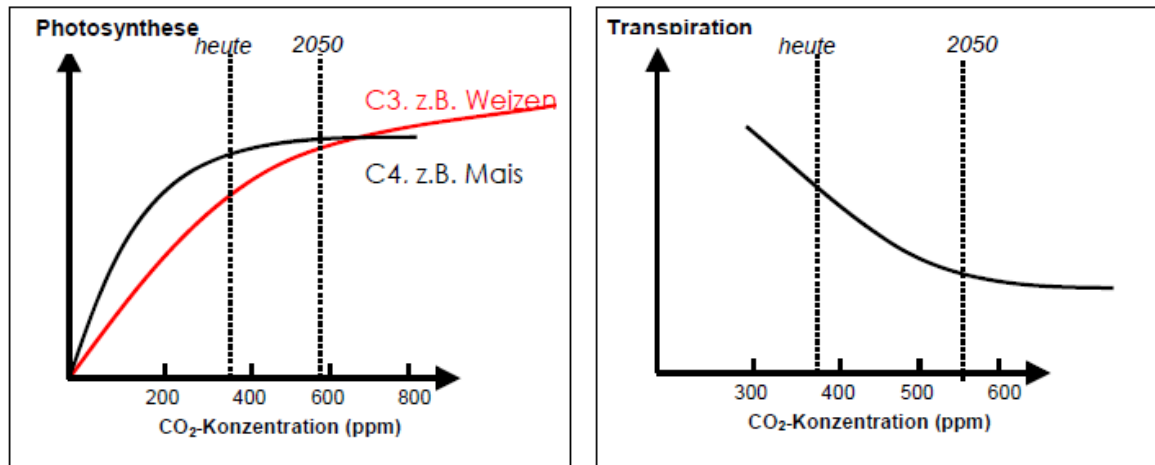


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Effektes steigender CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre auf die Photosynthese und Transpiration. Die Transpiration reagiert bei C<sub>3</sub> und C<sub>4</sub> Pflanzen in gleicher Weise auf eine CO<sub>2</sub> Erhöhung (vgl. WEIGEL et al., s.a)

Wie sich hingegen eine Temperatursteigerung auf die Kulturpflanzen auswirken wird ist davon abhängig, ob sich eine Kulturpflanze aktuell in der Vegetationszeit in ihrem Temperaturoptimum befindet, darunter oder eventuell schon darüber ist (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Im Temperaturoptimum ist die Photosyntheserate nämlich am höchsten, was mit optimalen Wachstumsbedingungen gleichzusetzen ist. Unter und über dem Temperaturoptimum nimmt sie hingegen fortlaufend ab.

Die Verfügbarkeit von Wasser ist neben der Menge und Verteilung der Niederschläge auch von den Eigenschaften des Bodens und der vorherrschenden klimatischen Bedingungen, wie Verdunstung und Wasserbedarf der Kulturen, bestimmt (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Die Verdunstung wird dabei aufgrund von steigenden Temperaturen zunehmen und durch die prognostizierten Starkregenereignisse werden sich die Abflussraten erhöhen, wodurch dieser Teil des Wassers nicht mehr den Pflanzen zur Aufnahme zur Verfügung steht (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Die prognostizierte Niederschlagsreduktion in den Sommermonaten führt dabei ebenfalls zu einer Verringerung des verfügbaren Wassers für die Pflanzen. Sollten diese Entwicklungen eintreffen, wird es häufiger zu einem Wassermangel der Pflanzen

kommen, worauf die Pflanzen mit einer Transpirationsreduktion und damit einer reduzierten Stoffproduktion reagieren (vgl. CHMIELEWSKI, 2007).

Die prognostizierte Temperaturerhöhung wird hingegen zu einer verlängerten thermischen Vegetationsperiode, also jener Zeitraum in dem die Tagesmitteltemperatur über 5°C liegt, führen. Diese Folgewirkung kann unter anderem auch zu Änderungen in der Bewirtschaftung (Saatzeit, Anzahl der Ernten pro Jahr) führen und daher ökonomische Bedeutung haben (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Konkret kommt es zu einem früheren Vegetationsbeginn im Frühjahr und zu einer längeren Vegetation im Herbst.

Des Weiteren wird die steigende Temperatur auch Auswirkungen auf das Eintreten der Entwicklungsstadien der Pflanzen und deren Dauer haben, wovon auch die Ertragsausbildung betroffen sein kann (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Je nach Region kann es dadurch zu Ertragssteigerungen oder Ertragsreduktionen kommen, in der Regel kommt es hier in kühleren Regionen zu Ertragszuwächsen und in wärmeren Regionen zu Ertragsreduktionen.

Um mögliche Ertragsreduktionen zu reduzieren oder zu vermeiden wird es von Bedeutung sein, möglichst früh die sich ändernden Faktoren zu bestimmen und rechtzeitig hierauf Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Dadurch sollten größere Ertragsreduktionen vermieden und mögliche Potentiale genutzt werden können.

Unumstritten ist, dass der Klimawandel je nach Region und Kulturart unterschiedlich stark spürbar sein wird. Ertragsteigerungen sind dabei in manchen Regionen ebenfalls zu erwarten, je nachdem welche limitierenden Wachstumsfaktoren im derzeitigen Standortklima dominieren (vgl. CHMIELEWSKI, 2007).

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Standort**

Als Versuchsstandort an dem die Erträge in den letzten Jahren erhoben und mit dessen Wetterdaten die Simulationen durchgeführt worden sind, diente die Gemeinde in der unser Familienbetrieb liegt, Deutsch Jahrdorf im Burgenland. Deutsch Jahrdorf ist die östlichste Gemeinde Österreichs und liegt im politischen Bezirk Neusiedl am See auf einer Seehöhe von 140 Meter. Die

Jahresdurchschnittstemperatur beträgt im langjährigen Mittel 10,1°C, welche jedoch im Referenzzeitraum des Versuches mit 11,60°C deutlich höher lag. Typisch für das Pannonikum sind die milden Winter und die von hohen Temperaturen und wenig Niederschlägen geprägten Sommer. Aufgrund der unterschiedlichen Bodenbonitäten und den niedrigen durchschnittlichen Jahresniederschlägen von ungefähr 550mm, ist in manchen Kulturen eine Bewässerung üblich. Betroffen sind davon vor allem die Kulturen Körnermais und Soja auf mittleren bis schlechten Standort, je nach Witterung. Eine Bewässerung in Getreide wird üblicherweise nicht durchgeführt. Nachdem die Bodenbonitäten in der Gemeinde stark unterschiedlich sind und die Bodenzahlen von ungefähr 20 bis 75 reichen, wurden auch zwei unterschiedliche Standorte innerhalb der Gemeinde für die Simulationen herangezogen. Dabei wurden ein guter und ein eher schlechter Standort für die Simulationen verwendet. Man entschied sich für dieses Vorgehen, weil die erwartete Ertragsentwicklung aufgrund der Bodenbonität differieren wird. In der nachfolgenden Arbeit wird der bessere Standort als Boden 1 und der schlechtere Standort als Boden 2 bezeichnet. Während der Berechnungen wurden die Bezeichnungen Söldneracker für den Boden 1 und Hardacker für den Boden 2 verwendet. Es kann also vorkommen, dass in Abbildungen, welche die Simulationsergebnisse enthalten, auch diese Bezeichnungen verwendet wurden.



Abbildung 6: Geografische Lage des Versuchsstandortes (Quelle: [www.austrianinformation.org](http://www.austrianinformation.org))

### 3.2 Bodendaten

Die notwendigen Bodendaten für die Versuchsstandorte wurden der elektronischen Bodenkarte entnommen und mit durchgeführten Bodenuntersuchungen ergänzt. Außerdem wurden mir die Feldkapazitäten der Versuchsflächen von dem Institut für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur zur Verfügung gestellt.

Wie man an der Abbildung 7 sehen kann, sind die zwei Versuchsstandorte mit unterschiedlicher Farbe hinterlegt. Dies ist aufgrund des unterschiedlichen Bodentyps der bei der Grafikerstellung in der elektronischen Bodenkarte aktiv geschaltet war. Der Söldneracker (Boden 1) ist somit dem Bodentyp Tschernosem (rote Hintergrundfarbe) und der Hardacker (Boden 2) dem Bodentyp Feuchtschwarzerde (braune Hintergrundfarbe) zuzuordnen. Außerdem unterscheiden sich die beiden Versuchsstandorte in einer unterschiedlichen Korngrößenfraktion, so kann der Hardacker der Bodenart „sandiger Lehm“ und der Söldneracker der Bodenart „lehmiger Schluff“ zugeordnet werden. Hiermit ist erkennbar, dass der Söldneracker als Beispiel für einen guten Standort und der Hardacker als Beispiel für einen schlechteren Standort hinsichtlich der Wasserversorgung gelten soll. In der

nachfolgenden Ausarbeitung wird der Söldneracker als Boden 1 und der Hardacker als Boden 2 bezeichnet.



Abbildung 7: Lage der Versuchsflächen in der KG Deutsch Jahrndorf (Quelle: www.ebod.at)

Die weiteren für die Simulation notwendigen Daten wurden aus der elektronischen Bodenkarte entnommen, konkret ist hier von der Horizontierung und der Mächtigkeit der Horizonte die Rede. Außerdem wurde der kapillare Wasseranstieg, nach Daten des hydrografischen Dienstes Österreich, für die Simulation herangezogen. Die in diesem Absatz angesprochenen Inputdaten wurden schlussendlich für die Bodencharakterisierung im Aqua-Crop Modell verwendet. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen einen Ausschnitt der eingegebenen Bodendaten differenziert nach den beiden Versuchsstandorten.

list		--- soil water content at ---						
horizon	description	thickness m	PWP	FC	SAT	TAW mm/m	Ksat mm/day	tau
1	sandy loam	0.55	10.0	16.2	41.0	62	1200.0	1.00
2	loamy sand	0.25	8.0	13.0	38.0	50	2200.0	1.00
3	sand	1.25	6.0	9.6	36.0	36	3000.0	1.00

Abbildung 8: Eingaben zur Horizontierung und dem Bodenwassergehalt für Boden 2 (Hardacker)



list		--- soil water content at ---						
horizon	description	thickness m	PWP	FC	SAT	TAW	Ksat	tau
		----- vol % -----			mm/m		mm/day	
1	silt loam	0.65	13.0	22.6	46.0	96	575.0	0.80
2	loamy sand	0.30	8.0	20.1	38.0	121	2200.0	1.00
3	sand	1.05	6.0	13.0	36.0	70	3000.0	1.00

Abbildung 9: Eingaben zur Horizontierung und dem Bodenwassergehalt für Boden 1 (Söldneracker)

Anhand der Abbildung 8 und Abbildung 9 kann der Unterschied der beiden Versuchsböden in Bezug auf die Wasserspeicherfähigkeit gut hervorgehoben werden. Zum besseren Verständnis der beiden Abbildungen, eine kurze Erklärung der wichtigsten Abkürzungen. Als PWP wird hier der permanente Welkepunkt; als FC die Feldkapazität des Bodens und als SAT jener Bodenwassergehalt bei dem das gesamte Porenvolumen eines Bodens mit Wasser gefüllt ist bezeichnet. Die Abkürzung TAW steht hingegen für jenes Bodenwasser, das für die Pflanzen verfügbar ist und gegen die Gravitation im Boden gehalten werden kann. Dieser Teil des Bodenwassers wird auch als nutzbare Feldkapazität bezeichnet und umfasst das Bodenwasser zwischen permanenten Welkepunkt und Feldkapazität. Die berechneten Werte der Horizonte werden in einem zweiten Schritt aufaddiert. Dabei geht der Wert eines Horizontes, der die Tiefe von 100 cm überschreitet, anteilig in die Berechnung ein. Ist das Profil hingegen kleiner als 100 cm, so wird für den zuletzt beschriebenen Horizont eine Tiefe bis 100 cm unterstellt. Demnach ergibt sich für die verwendeten Inputdaten eine nutzbare Feldkapazität bis 100cm von 53,7mm für den Boden 2 und 133,7mm für den Boden 1.

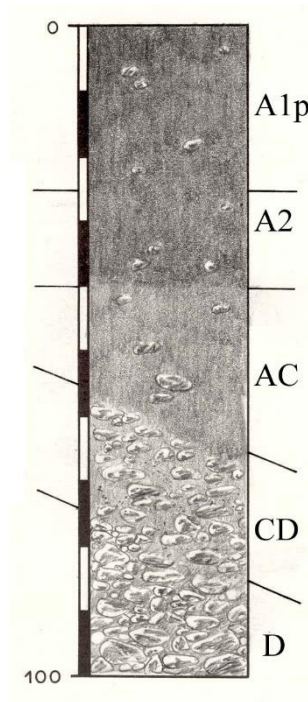


Abbildung 10: Bodenprofil von Boden 2 (Quelle: www.ebod.at)

Tabelle 1: Horizontierung des Boden 2 (Quelle: www.ebod.at)

Horizont	Von [cm]	Bis [cm]	Bodenfeuchte	Bodenart
A1p	0	25	erdfrisch	sandiger Lehm
A2	25	40	erdfrisch	sandiger Lehm
AC	40	60	erdfrisch	sandiger Lehm
CD	60	85	erdfrisch	lehmiger Sand
D	85	200		

Ab einer Bodentiefe von 80 Zentimeter ausschließlich Grobmaterial (Kies, Schotter, 2-10 cm Ø).

### 3.3 Wetterdaten

Für die Simulationen wurden detaillierte Tageswetterdaten der letzten Jahre benötigt, welche von der ZAMG zur Verfügung gestellt wurden. Konkret wurden die Tageswetterdaten vom Jahr 2001 bis zum Jahr 2012 herangezogen. Zu den verwendeten Parametern gehörten unter anderem die Tagesminimum- und Tagesmaximaltemperatur, die minimale relative Tagesluftfeuchtigkeit und die maximale relative Tagesluftfeuchtigkeit, die Netto-Strahlung, die Windgeschwindigkeit und der Niederschlag. Von der ZAMG Wetterstation in Neusiedl am See wurde die Netto-Strahlung und von der Wetterstation der ZAMG in Andau wurden alle anderen aufgezählten Werte verwendet. Die Daten wurden vom Institut für Meteorologie an der Universität für Bodenkultur übermittelt.

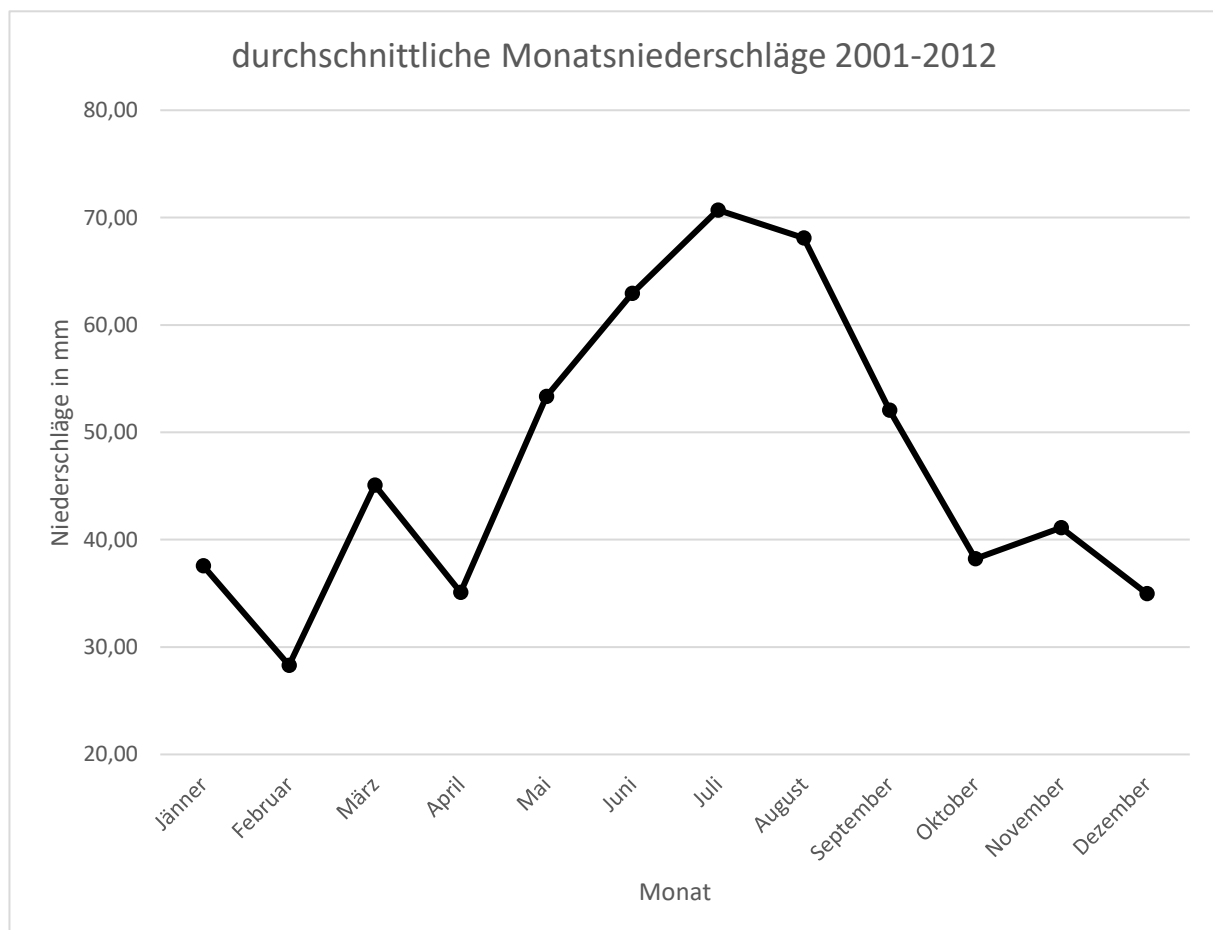


Abbildung 11: durchschnittliche Monatsniederschläge 2001-2012 bei einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 567mm (Quelle: Eigene Darstellung)

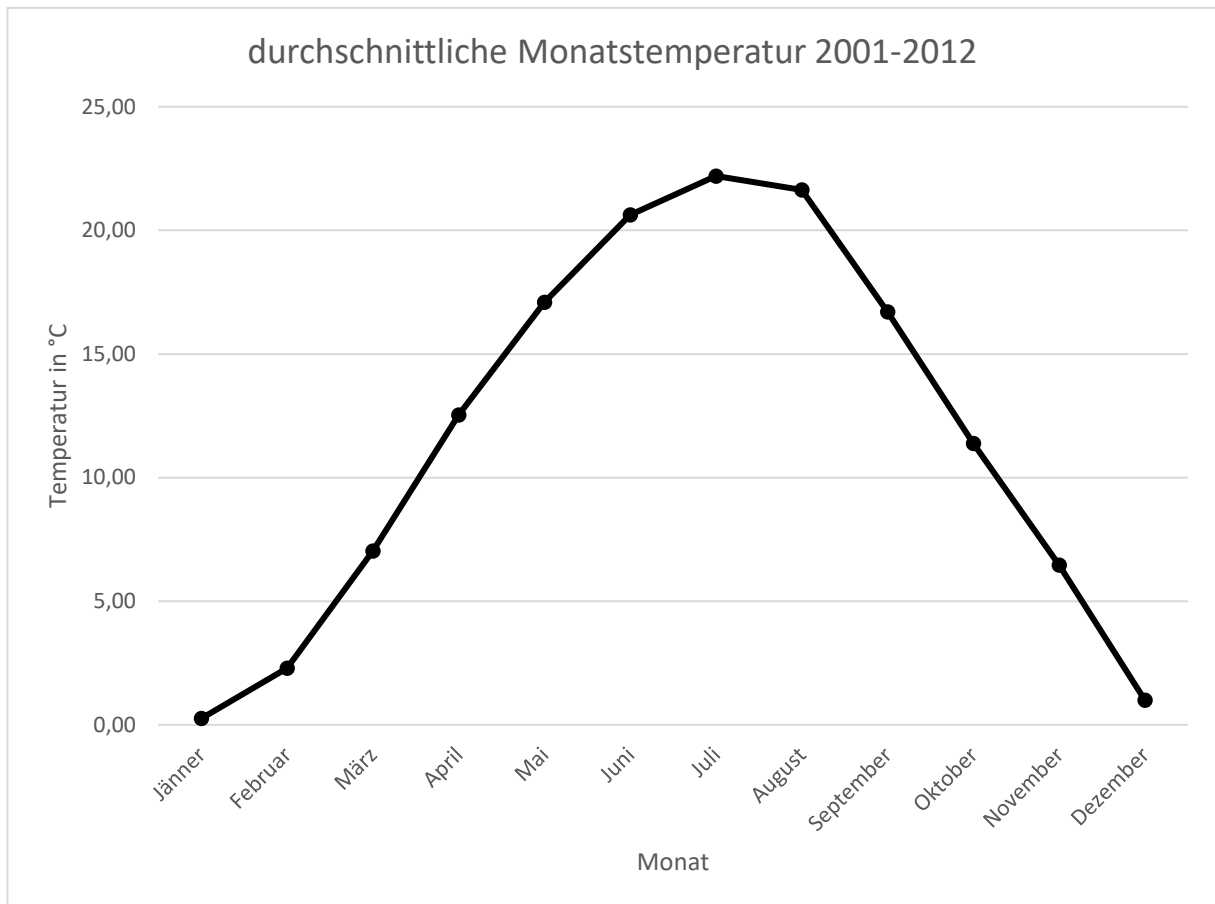


Abbildung 12: durchschnittliche Monatstemperatur 2001-2012 bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 11,60°C (Quelle: Eigene Darstellung)

### 3.3.1 Szenarien

Für die Simulation der zukünftigen Ertragsentwicklung Körnermais und Winterweizen wurden zwei Szenarien ausgewählt welche die zuvor angesprochenen benötigten Wetterparameter für den Zeitraum von 2021-2050 enthalten. Die Szenarien werden als RCPs bezeichnet was für „Representative Concentration Pathways“ steht und sind unter Stützung auf Ergebnisse der wissenschaftlichen Literatur von internationalen, frei arbeitenden Wissenschaftlern erarbeitet worden. Die sogenannten RCP-Szenarien lösen somit die von der ICCP entwickelten SRES- Szenarien ab. Bis dato wurden vier RCP- Szenarien von den frei arbeitenden Wissenschaftlern entwickelt.

Tabelle 2: Überblick über die entwickelten RCP-Szenarien (Quelle: www.wiki.bildungsserver.de)

<b>RCP-Szenarien für den 5. IPCC-Sachstandsbericht</b>				
<i>Bezeichnung</i>	<b>RCP8.5</b>	<b>RCP6.0</b>	<b>RCP4.5</b>	<b>RCP2.6</b>
<i>Treibhausgaskonzentration im Jahre 2100</i>	1370 ppm CO <sub>2</sub> -äq	850 ppm CO <sub>2</sub> -äq	650 ppm CO <sub>2</sub> -äq	400 ppm CO <sub>2</sub> -äq
<i>Strahlungsantrieb 1850-2100</i>	8,5 W/m <sup>2</sup>	6,0 W/m <sup>2</sup>	4,5 W/m <sup>2</sup>	2,6 W/m <sup>2</sup>
<i>Einstufung</i>	sehr hoch	hoch	mittel	sehr niedrig

In der hier zugrundeliegenden Masterarbeit entschied man sich zwei Szenarien aus den RCP 4,5 Pool heranzuziehen. Diese gelten nämlich als Mindesteffekt, der in den nächsten Dekaden durch den Klimawandel nach derzeitigem Erkenntnisstand sehr wahrscheinlich eintreten wird. Die beiden gewählten Szenarien werden als BNU und HadGEM bezeichnet und enthalten unterschiedliche Klimaentwicklungen für den Zeitraum bis zum Jahr 2050. In den unten angeführten Grafiken sollen die Temperatur- und Niederschlagsveränderungen zum Referenzzeitraum 2001-2012 dargestellt werden. Als Referenzzeitraum gelten die Jahre in denen die Erträge erhoben wurden und als Vergleichszeitraum gelten die Jahre von 2021 bis 2050. Anhand der Jahre 2021 bis 2050 möchte man in der zugrundeliegenden Arbeit die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Ertragsentwicklung in Körnermais und Winterweizen bewerten.

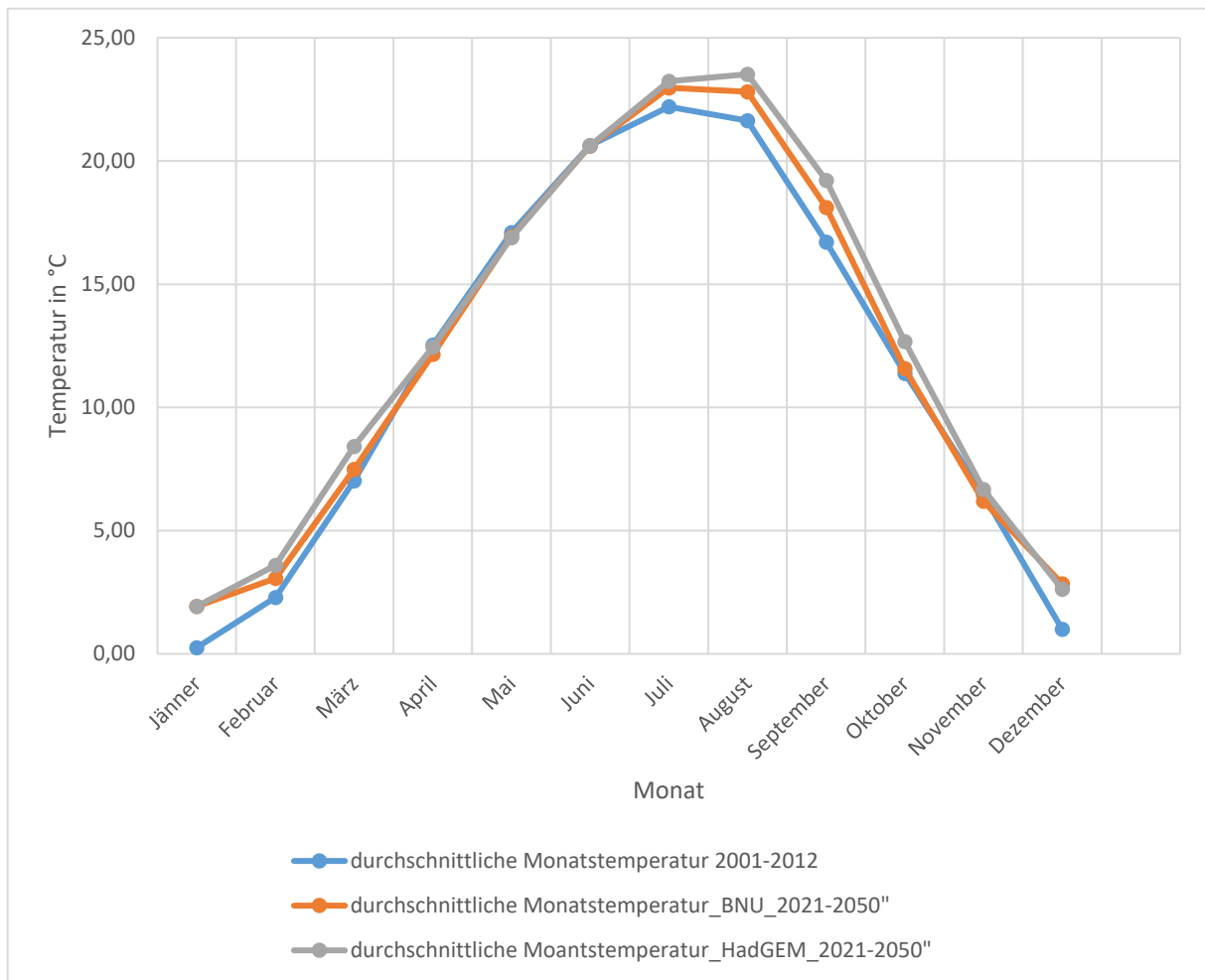


Abbildung 13: Vergleich der Monatsmitteltemperatur des Referenzzeitraumes 2001-2012 mit den beiden Szenarien 2021-2050 (Quelle: Eigene Auswertung)

In Abbildung 13 kann man erkennen, dass es in beiden Szenarien zu einem Temperaturanstieg über die Jahre kommt. Im Szenario BNU steigt die Jahresdurchschnittstemperatur im Durchschnitt um  $0,62^{\circ}\text{C}$ , und im Szenario HadGEM um  $1,05^{\circ}\text{C}$ . Vor allem zu Beginn des Frühlings und im Spätsommer beziehungsweise Herbst, kommt es laut Abbildung 13 zu einem spürbaren Temperaturanstieg, wobei dieser im Szenario HadGEM doppelt so stark ausfällt wie im Szenario BNU. Die Monate mit dem größten Temperaturanstieg sind generell der August und der September, hier steigt die Temperatur um  $1,89^{\circ}$  und  $2,51^{\circ}\text{C}$  im Szenario HadGEM. Nur im Frühsommer, den Monaten von April bis Juni, kommt es zu keinen steigenden Temperaturen.

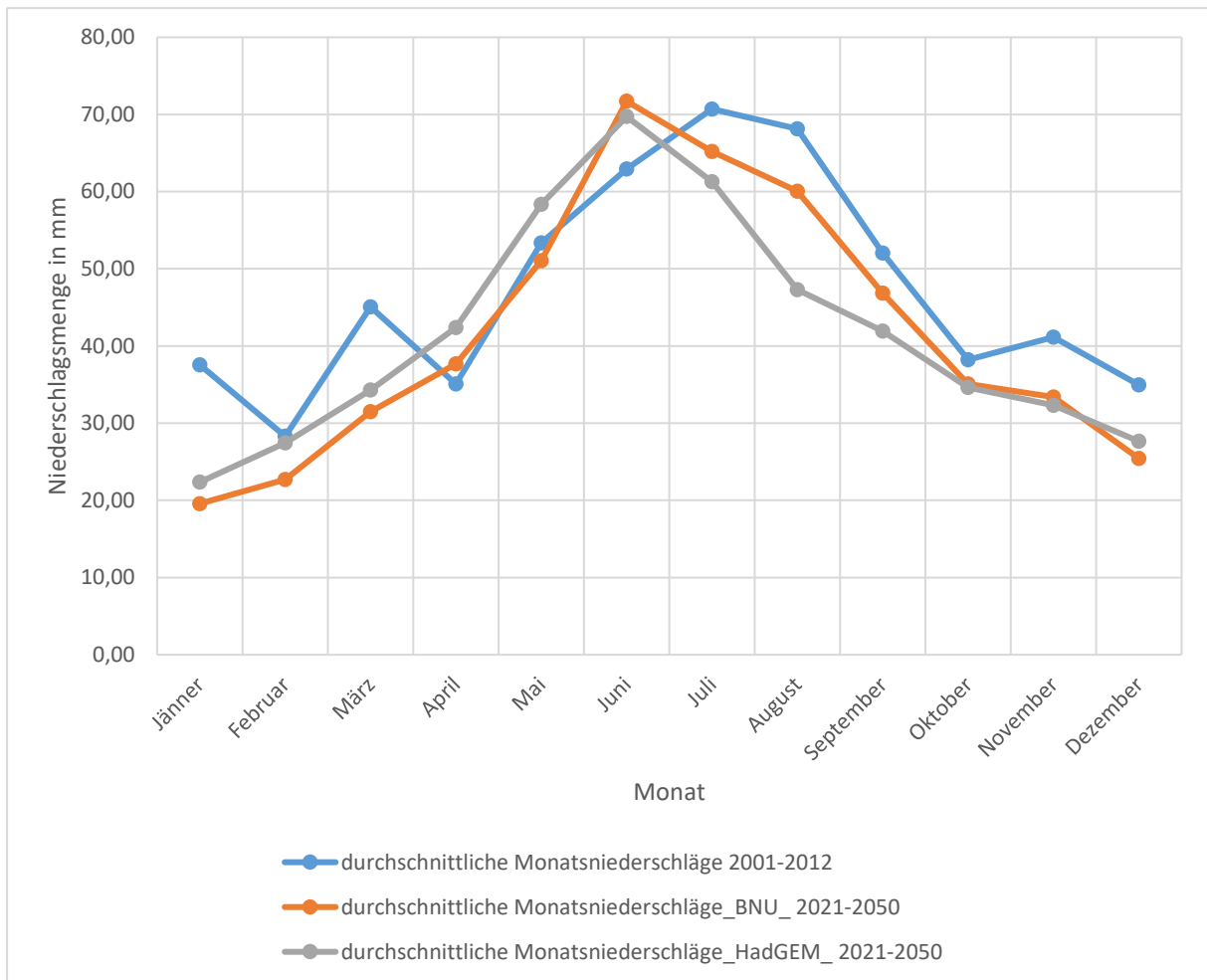


Abbildung 14: Vergleich der Monatsmittelniederschläge des Referenzzeitraumes 2001-2012 mit den beiden Szenarien 2021-2050 (Quelle: Eigene Auswertung)

Hier kommt es bei beiden Szenarien zu sinkenden Niederschlägen, wobei diese mit minus 67mm bei dem Szenario BNU und minus 68mm bei dem Szenario HadGEM annähernd gleich ausfallen. Der Rückgang resultiert aus den geringeren Niederschlägen im Frühjahr, Spätsommer und Winter. Besonders stark sinken die Niederschläge im Szenario BNU im Frühjahr und bei dem Szenario HadGEM im Spätsommer. Im Juni kommt es hingegen bei beiden zu mehr Niederschlag, was sich für Sommerkulturen im Untersuchungsgebiet günstig auswirken würde, wobei die Niederschläge im Szenario HadGEM auch schon im April und Mai leicht steigen. Dadurch steigen die Niederschläge im Frühjahr im Szenario HadGEM um ungefähr 20mm leicht an.

### 3.4 Pflanzendaten

#### 3.4.1 Winterweizen

Für die Kalibrierung des Simulationsmodells Aqua-Crop wurden Ertragsdaten von der Sorte Capo herangezogen. Die Sorte Capo ist eine etablierte und gut angepasste Qualitätsweizensorte (Winterweichweizen) in trockenen und warmen Gegenden, und wird deshalb gerne im Osten Österreichs angebaut (vgl. OBERFERSTER und WEREKER, 2009). In diesen Gegenden vertrauen vor allem die BIO-Landwirte auf diese Sorte, da sie neben den guten und stabilen Erträgen auch ein Garant für gesunde und kräftige Bestände ist. Unüblich für Getreidesorten hält sich die Sorte Capo schon über 25 Jahre am österreichischen Saatgutmarkt und hat bis heute höchste Popularität. In manchen Jahren kann nur die extreme Wuchshöhe zum Problem werden falls die Bestände nicht rechtzeitig eingekürzt wurden.

Tabelle 3: Sortenbeschreibung der Sorte Capo laut AGES beschreibende Sortenliste

	Sorte/ Züchterland	Zulassungsjahr	Grannen-Kolbenweizen	Vergilbung zum Schossen	Auswinterung	Ährenschieben	Reifezeit	Wuchshöhe	Lagerung	Auswuchs	Mehltau	Braunrost	Gelbrost	Schwarzrost	Blattseptoria	Septoria tritici	DTR-Blattdürre	Ährenfusarium	Kornertrag Trockengebiet	Kornertrag Übergangslagen
Capo, A		1989	G	3	3	3	3	7	6	4	5	5	3	4	6	6	5	4	6	7

Legende:

A... Austria

G... Grannenweizen

1= im Allgemeinen günstig,

9= im Allgemeinen ungünstig



### 3.4.2 Körnermais

Für die Kalibrierung des Simulationsmodells im Sektor Körnermais wurden Ertragsdaten von den Jahren 2001-2012 herangezogen. Diese Ertragsdaten stammen dabei von meinem Elternbetrieb in Deutsch Jahrndorf, im Burgenland. Dazu muss jedoch erwähnt werden, dass hier nicht wie bei der Kultur Winterweizen alle Referenzerträge für die Kalibrierung von einer Sorte stammen. Im Falle des Winterweizens wurde in allen Referenzjahren die Sorte Capo angebaut. Bei Körnermais hingegen ändert sich das bei uns am Betrieb eingesetzte Saatgut alle zwei bis drei Jahre. Grund dafür sind sich ändernde Bedingungen in der Bewirtschaftung und ob eine Bewässerungsmöglichkeit bei der geplanten Körnermaisfläche besteht oder nicht. Trotz dieser Thematik ist uns die Kalibrierung im Körnermais erfreulicherweise recht gut gelungen. Was sich dadurch jedoch nicht vermeiden ließ ist der Sortenfehler, der nun im Kalibrierungsergebnis enthalten sein kann.

## 3.5 Ertragsdaten

Die Ertragsdaten wurden im Zeitraum von 2001 bis 2012 am Betrieb in Deutsch Jahrndorf erhoben und dokumentiert. Wie bereits zuvor beschrieben sollen diese erhobenen Daten der Kalibrierung des Simulationsmodells dienen, sodass die gewonnenen Simulationsergebnisse mit großer Sicherheit angenommen werden können. Dabei ist es immens wichtig verlässliche Daten aus jener Umgebung zu haben, am besten aus eigener Hand. Bei unzureichend genauen Ertragsdaten kann die Kalibrierung noch so gut ausfallen, trotzdem wird man auf keine seriösen beziehungsweise auf fälschliche Ergebnisse kommen. Da die Ertragserhebung jedoch über mehrere Jahre notwendig ist um ausreichend gute Kalibrierungsergebnisse zu erhalten, ist diese mit immensen Aufwand verbunden weshalb hier gerne einfacherweise auf Daten Dritter zugegriffen wird.

## 3.6 Anbau und Kulturführung

### 3.6.1 Winterweizen

Die Vorbereitung der Weizenfelder erfolgt überwiegend ohne Pflug. Die Standardvariante für die Bestellung der Felder ist hier der Grubber oder die Scheibenegge. Durch eine mehrmalige Anwendung dieser Geräte können die Ernterückstände gut in den Boden eingearbeitet und der Boden eingeebnet werden.

Winterweizen wird am Betrieb Anfang Oktober mit einer Saatstärke von 300 bis 330 Körner/m<sup>2</sup> angebaut. Eine Düngung im Herbst findet grundsätzlich nicht statt. Die Düngung im Frühjahr erfolgt dahingehend, dass die Pflanzen stets optimal mit den notwendigen Nährstoffen versorgt sind. Die Modelle, mit denen man die Simulationen durchgeführt hat, gehen ebenfalls von einer mit Nährstoffen optimal versorgten Pflanze aus. Der Pflanzenschutz erfolgt ebenfalls nach dem Standardverfahren, so sind eine Unkraut-, Insektizid- und eine Fungizid Behandlung bei uns üblich. Die Ernte des Winterweizens erfolgt meist in einem Zeitfenster welches sich von Anfang bis Ende Juli erstreckt. Eine Bewässerung wird in unserem Umkreis aufgrund von Unrentabilität nicht praktiziert.

### 3.6.2 Körnermais

Die Ernterückstände aus dem Vorjahr werden durch eine wendende Bodenbearbeitung, der Herbstfurche, gut in den Boden eingemischt. Im darauffolgenden Frühjahr wird die Fläche mit einer Ackerschlepe bearbeitet um die Abtrocknung und Einebnung der Fläche sicherzustellen. Ein paar Tage vor dem Anbautermin wird Vollkorn Dünger auf die Fläche ausgebracht. Um diesen in den Boden einzuarbeiten und die Fläche weiter einzuebnen, wird eine zweite Überfahrt mit der Ackerschlepe durchgeführt. Bei uns am Betrieb findet der Anbau von Körnermais üblicherweise in den ersten beiden Aprilwochen mit einer Saatstärke von 72000 Körner/ha statt. Hier wird stets versucht den Körnermais noch bei ausreichend Feuchtigkeit und dennoch schon bei ausreichender Bodentemperatur von mindestens 8°C in den Boden zu bekommen. Danach erfolgen Arbeitsgänge die dem Standard entsprechen, so erfolgen noch eine Düngung der Fläche und eine Herbizid Behandlung. Aufgrund dessen kann eine nahezu optimale Versorgung der Maispflanzen mit Nährstoffen auch hier angenommen werden. Die Ernte erfolgt je nach Witterung und verwendeter Reifezahl zu unterschiedlicher Zeit. Das Erntefenster bei Mais ist sozusagen deutlich größer als jenes des Weizens. Die übliche Ernte findet jedoch von Ende September bis Mitte Oktober statt.

## 3.7 Anpassungsstrategien

Natürlich gibt es eine Reihe von Anpassungsstrategien welche die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels reduzieren oder möglicherweise durch Kombination

sogar kompensieren können. Je nach gewählter Strategie kommt es jedoch zu mehr oder weniger starken Umstellung der Wirtschaftsweise, wobei auch neue Potentiale genutzt werden können. Grundsätzlich kann man hier zwischen zwei Arten von Strategien unterscheiden, jene die kurzfristig und jene die langfristig ausgerichtet sind. Zu den kurzfristigen Anpassungsstrategien zählen jegliche Änderungen in der Produktionsweise, wie eine veränderte Fruchtfolge, andere Kulturarten, andere Bodenbearbeitung und Kulturführung, Einsatz von Bewässerung, veränderter Aussattermin und Veränderungen in der Düngung und des Pflanzenschutzes (vgl. TUBIELLO et al., 2000). Diese Anpassungsstrategien können jedenfalls schnell und unkompliziert in die Praxis umgesetzt werden und verlangen nach keiner völligen Systemumstellung. Bei den langfristigen Anpassungsstrategien sieht die Situation etwas anders aus. Hier spricht man nicht nur von einer Entscheidung des Landwirts, sondern von einer Entscheidung der Forschung, Gesellschaft und der Politik. Derartige Strategien würden zu einer Systemumstellung führen, welcher jedoch eine ökosoziale Planung vorausgehen und eine ordentliche Umsetzung folgen müsste (vgl. EITZINGER et al., 2010). Dazu zählen Änderungen in der Landnutzungsform, in der Züchtung und im Einsatz von Biotechnologie (vgl. ALEXANDROV et al., 2002). Gerade die Zeiten des Übergangs eines Klimazustandes zu einem neuen, veränderten Zustand können zu erheblichen Anpassungsproblemen auf lokaler und regionaler Ebene führen (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Dazu zählt unter anderem die mögliche Änderung der Klimavariabilität bei Witterungsparameter, was selbst Länder mit hochentwickelter Landwirtschaft vor große Herausforderungen stellen kann (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). In dieser Arbeit sollen die ökonomischen Auswirkungen von Strategien untersucht werden welche schnell, einfach und ohne große Betriebsumstellung umzusetzen sind. Dabei entschied man sich für die Untersuchung einer Hecke als Evaporationsschutz und einer reduzierten Bodenbearbeitung inklusive Mulch-Schicht als Verdunstungsreduktion. Hecken verursachen durch die Reduktion der Windgeschwindigkeit einen verringerten Austausch an trockener Luft im Bestand und senken dadurch die unproduktiven Wasserverluste durch die Evaporation. Außerdem kommt es durch eine Hecke, außer in unmittelbarer Heckennähe, durch Windreduktion zu erhöhter Taubildung und -dauer im Bestand, zu verringerter Winderosion und zu erhöhter Schneeakkumulation. Dabei kann die erhöhte Taubildung auch negative Auswirkungen haben bedenkt man die notwendige Blattnässedauer einiger bedeutender Krankheiten. Eine weitere negative Eigenschaft

einer Hecke ist, dass sie mit den Kulturpflanzen in unmittelbarer Nähe um Wasser, Nährstoffe und Licht konkurriert und damit das Ertragspotential der betroffenen Pflanzen mindert (vgl. BRENNER et al., 1995). Zahlreiche Versuche konnten jedoch belegen, dass das Mikroklima im Kulturbestand, je nach Parameter und Art der Hecke in 10 bis 20-facher Höhe der Hecke beeinflusst wird (vgl. EITZINGER et al., s.a.). Dabei treten neben den oben genannten Prozessen noch weitere auf, wie man in der Abbildung 15 sehen kann. Dabei ist die Wirkung einer Hecke von folgenden Faktoren besonders abhängig: von der Dichte der Hecke, deren Höhe und deren Ausrichtung.

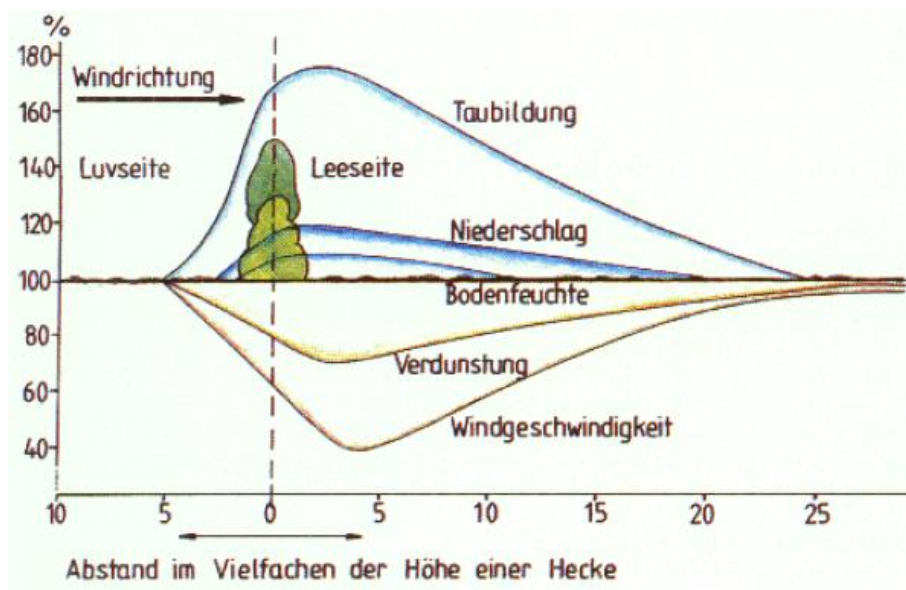


Abbildung 15: Klimaschutzwirkung einer Landschaftsstruktur (Quelle: Frielinghaus et al, 1997)

Bei der zweiten Anpassungsstrategie hat man sich für die Umstellung von Pflug auf eine reduzierte Bodenbearbeitung inklusive einer Mulch-Schicht entschieden. Dadurch soll die Wasserverfügbarkeit erhöht und die unproduktiven Wasserverluste durch Evaporation verringert werden. Dazu kommt noch ein verringerter Energieaufwand pro Hektar und eine Stabilisierung in der Pflanzenproduktion, welche ebenfalls positive Eigenschaften der Anpassungsstrategie sind (vgl. OSUNBITAN et al., 2005). Außerdem kommt es durch eine vorhandene Mulch-Schicht zu einer Reduktion der Krustenbildung an der Bodenoberfläche und zu verringerten Abflussraten (vgl. EITZINGER et al., 2012). Eine negative Eigenschaft einer Mulch-Schicht, welche vom Programm mit dem die Simulationen durchgeführt worden sind jedoch nicht berücksichtigt wird, ist die spätere Erwärmung des Bodens im Frühjahr. Dies ist

aufgrund der am Boden aufliegenden Mulch-Schicht der Fall, wodurch Kulturen auch erst einige Tage später auflaufen können und somit sich der Anbauzeitpunkt etwas verzögern kann. Auch ein möglicher stärkerer Unkraut- und Krankheitsdruck wird in der Simulation nicht berücksichtigt.

### **3.8 Simulationsmodelle**

Für die der Arbeit zugrundeliegenden Simulationen wurden Softwares verwendet die allesamt von der FAO entwickelt worden sind. Dabei wurden das sogenannte Aqua-Crop Programm und der ETo Kalkulator für die Simulationen herangezogen. Die Entscheidung fiel auf diese Software, weil sie bei Vorhandensein der notwendigen Daten relativ schnell und leicht zu bedienen, und daher auch für Praktiker schnell zu erlernen ist. Ein weiterer Vorteil dieser Software ist, dass bei beiden seitens der FAO ein Handbuch entwickelt worden ist, das Standardwerte im Fall von fehlenden Daten beinhaltet und die Funktionsweise der Software erklärt (vgl. STEDUTO et al., 2009).

#### **3.8.1 ETo Kalkulator**

Der ETo Kalkulator wurde von der Abteilung „Land und Wasser“ der FAO entwickelt und wird hauptsächlich für die Berechnung der Referenz-Evaporation (ETo) eingesetzt (vgl. FAO, s.a.). Der ETo repräsentiert die Evaporation einer Referenzfläche die nicht unter dem Einfluss von Wassermangel steht. Weltweit wird eine einheitliche Grasfläche, die vollständig bodenbedeckend ist und unter optimaler Versorgung mit Wasser und Nährstoffen wachsen kann, als Referenzfläche für den ETo angesehen (vgl. FAO, s.a.). Die Grundlage für die ETo Berechnung mit dem ETo Kalkulator stellt dabei die Penman-Monteith Gleichung dar. Je nach Verfügbarkeit kann der ETo mit Tages-, zehn Tages- oder Monatswetterdaten berechnet werden (vgl. FAO, s.a.). In dem Fall der Simulationen die dieser Arbeit zugrunde liegen wurden die ETo-Werte mit Tagesdaten ermittelt. Diese Art der ETo Ermittlung ist auch die exakteste. Selbst wenn nicht alle notwendigen Daten für eine ETo Berechnung zur Verfügung stehen, kann mit dem ETo Kalkulator über Zwischenschritte ein verlässlicher ETo geschätzt werden (vgl. FAO, s.a.). In unserem Fall waren alle notwendigen Daten vorhanden, so wurden die maximale und minimale Tagestemperatur, die minimale und maximale relative Tagesluftfeuchtigkeit, sowie die Windgeschwindigkeit und die Strahlung für die ETo Berechnung verwendet. Die damit errechneten ETo Werte können dann mithilfe

eines Textfiles in die Aqua-Crop Software importiert und weiterverwendet werden. Der ETo Kalkulator ist als praktisches Werkzeug bekannt und dient als Hilfsmittel unter Agro-Meteorologen, Agronomen und Bewässerungsingenieuren für die Durchführung von ETo Berechnungen (vgl. FAO, s.a.).

### 3.8.2 AquaCrop

Die Software namens „Aqua-Crop“ wurde ebenfalls von der Abteilung „Land und Wasser“ der FAO entwickelt (vgl. STEDUTO et al., 2009). Ihre Hauptaufgabe ist es die Wasserabhängigkeit von Erträgen in verschiedenen Kulturarten zu berechnen, weshalb sie vor allem in Regionen eingesetzt wird, in denen Wasser als limitierender Faktor auf die Erträge der Kulturpflanzen wirkt (vgl. FAO, s.a.). Die Software Aqua-Crop gilt dabei als Versuch der FAO ein Programm zu entwickeln, dass trotz des einfachen Aufbaus, robust und verlässlich arbeitet und somit genaue Berechnungen zulässt (vgl. STEDUTO et al., 2009). So benötigt die Software auch nur wenige Eingabeparameter, die oft mit einfachen Methoden ermittelt werden können, um Berechnungen durchzuführen. Die Einsatzgebiete der Software sind deshalb auch sehr vielfältig, dazu zählen: die Bestimmung der Maximalerträge an einem bestimmten Ort mit Wasser als ertragslimitierender Faktor; der Einsatz als Vergleichsinstrument zwischen möglichen und aktuellem Ertrag unter Bestimmung der beschränkenden Faktoren; Entwicklung von Bewässerungsstrategien in verschiedenen Regionen; Berechnung ob eine neue Kultur in einer Region in der sie zuvor noch nicht kultiviert worden ist Chancen hat oder der Einsatz zur Analyse von zukünftigen Klimaszenarien und deren Wirkung auf die Ertragsentwicklung (vgl. STEDUTO et al., 2009). Aqua-Crop wurde ganz bewusst für die Verwendung in der Praxis entwickelt, so arbeiten heute zahlreiche Regierungsbehörden, Wasserbehörden, NGO`s und unterschiedliche Vereinigungen der Landwirte mit dieser Software (vgl. FAO, s.a.). Aber auch Wissenschaftler arbeiten mit diesem Programm, so wird es teilweise auch zum Einstieg in die Simulationsmodelle oder als Lehrwerkzeug verwendet (vgl. FAO, s.a.).

Ähnlich zu anderen Modellen ist auch Aqua-Crop in mehrere zusätzliche Untermodellkomponenten gegliedert, sodass es zu Übergreifungen in den Beziehungen zwischen Boden-Pflanze und Atmosphäre kommt (vgl. RAES et al., 2009). (siehe Abbildung 16)

Diese Untermodellkomponenten umfassen den Boden und dessen Wasserbilanz; die Kulturpflanze mit ihren Entwicklungs-, Wachstums- und Ertragsbildungsprozessen und die Atmosphäre mit ihren Temperaturschwankungen, Niederschlägen, Evaporationsaufkommen und der CO<sub>2</sub> Konzentration (vgl. RAES et al., 2009). Zusätzlich werden gewisse Managementsysteme im Modell berücksichtigt, wie die Bewässerung, Düngung oder das Vorhandensein einer Mulch-Schicht, weil sie Einfluss auf die Bodenwasserbilanz, die Entwicklung der Pflanze und somit auf den Ertrag haben (vgl. RAES et al., 2009). Krankheiten, Schädlinge und der Unkrautdruck werden hingegen nicht erfasst. Die funktionalen Beziehungen zwischen den Modellkomponenten kann man auch in der Abbildung 16 sehen (vgl. RAES et al., 2009).

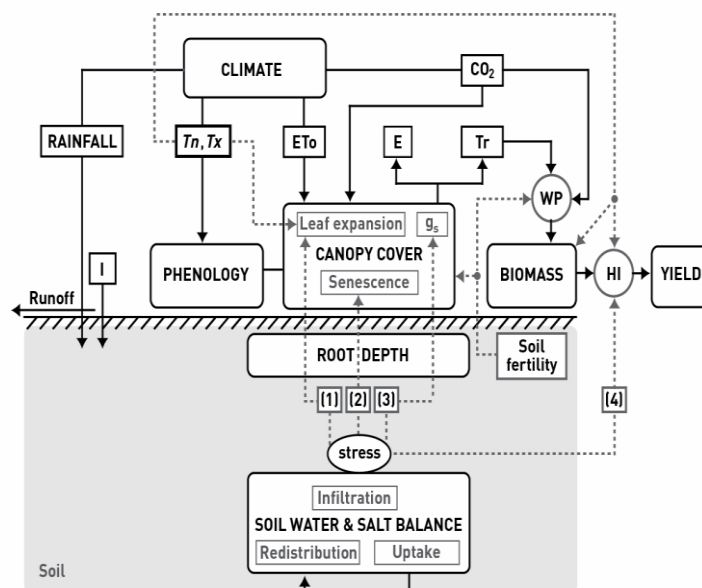


Abbildung 16: Eine FlowChart der Software AquaCrop welche die Hauptbeziehungen zwischen Boden-Pflanze und Atmosphäre zeigt (vgl. RAES et al., 2009)

Zur besseren Veranschaulichung des Modells wurde die Abbildung 17 eingefügt, welche das Hauptmenü von Aqua-Crop zeigt, und anhand dem die Inputs der für die Arbeit zugrundeliegenden Simulationen kurz erläutert werden sollen.

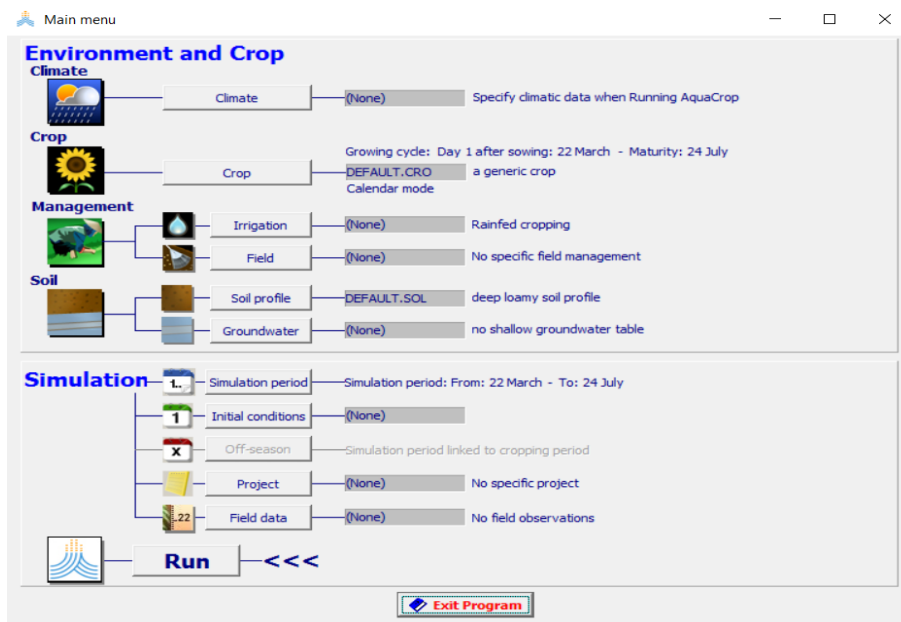


Abbildung 17: Hauptmenü des Aqua-Crop Modells (Quelle: Aqua-Crop)

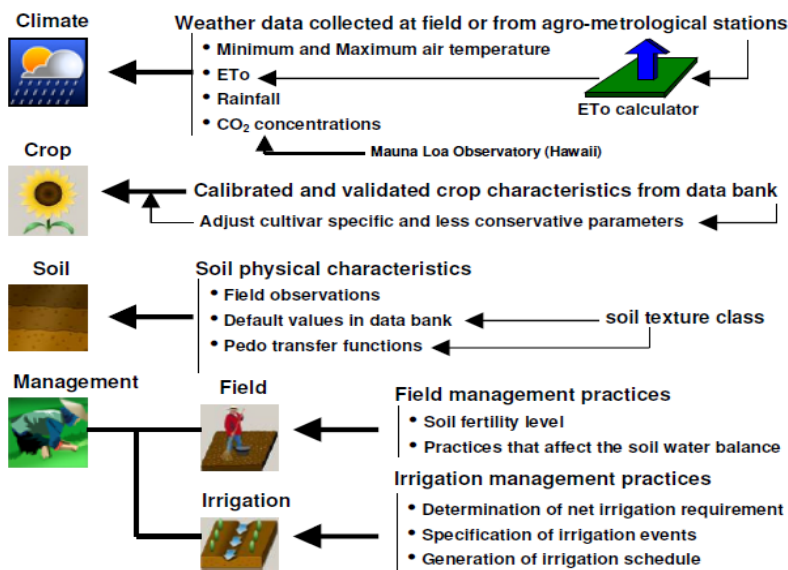


Abbildung 18: Inputdateien welche die Umwelt in der die Pflanze wächst definieren (vgl. STEDUTO et al., 2009)

In Abbildung 17 und Abbildung 18 kann erkannt werden wie das Modell Aqua-Crop aufgebaut ist. Die Haupteingabefenster sind dabei in Klima, Kulturpflanze, Feld-Management und Boden unterteilt. Außerdem gibt es dann noch die Simulation als weiteres Haupteingabefenster. Hiermit können überjährige Fruchtfolgen und Zukunftsszenarien berechnet und unter den Reiter „Initial Conditions“ die außerhalb



der Vegetationsperiode der Kultur liegenden Einflussfaktoren erfasst werden (vgl. RAES et al., 2009).

### **3.9 Beschreibung der Simulationsszenarien**

Im Haupteingabefenster Klima sind bei der Durchführung der Simulationen insgesamt zwei Parameter abgeändert worden. Zum einen wurden die Simulationen mit zwei unterschiedlich erfassten ETo-Werten und zum anderen mit drei verschiedenen CO<sub>2</sub> Gehältern der Atmosphäre durchgeführt. Die Erfassung der ETo-Werte wurde dahingehend abgeändert, dass die Ausgangswinddaten von der ZAMG Messstation in Andau um 30 Prozent reduziert wurden. Das Ausmaß der Reduktion wurde aufgrund der vorhandenen Literatur gewählt (vgl. EITZINGER, et al., s.a.). Der Grund für die Reduktion der Winddaten war die Anpassungsstrategie Hecke, um ihre Auswirkungen auf den Ertrag der Kulturen bestimmen zu können. Dabei wurden nur die Wirkung der Windreduktion und keine weiteren Wirkungen der Hecke, wie Schneeakkumulation, verringerte Winderosion oder erhöhte Taubildung, bei den Simulationen berücksichtigt. Um die Auswirkungen eines erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalts in der Atmosphäre welcher im Gleichschritt mit dem Klimawandel auf uns zukommt zu bewerten, wurden die Simulationen mit drei verschiedenen CO<sub>2</sub> Gehältern durchgeführt. Dabei wurden die CO<sub>2</sub> Files „Klimaziel“, mit dem die ursprünglichen Simulationen durchgeführt worden sind, das CO<sub>2</sub> File „400ppm“ das jene Kulturarten und Sorten repräsentieren soll, welche nicht auf die steigenden CO<sub>2</sub> Gehälter mit höheren Erträgen reagieren und das CO<sub>2</sub> File „ML“, welches die möglichen Auswirkungen des CO<sub>2</sub> Düngeeffekts an Kulturarten und Sorten zeigen soll, wenn der Ausstoß an CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre in den nächsten Dekaden nicht gebremst wird.

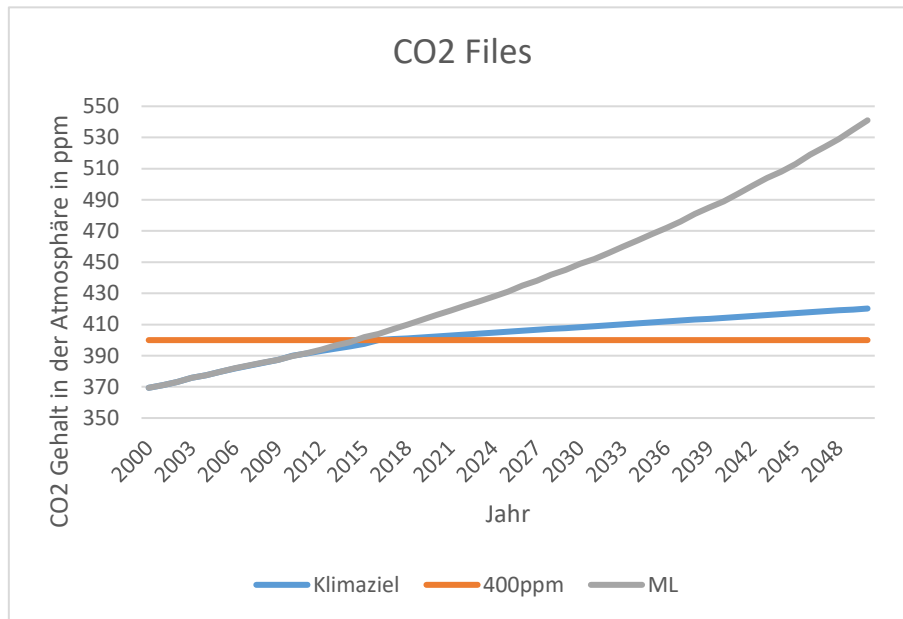


Abbildung 19: Übersicht zu den CO2 Files und deren Entwicklung (Quelle: Eigene Auswertung)

Im Haupteingabefenster „Kultur“ sind hingegen während der Simulationen keine Änderungen vorgenommen worden. Hier wurden vor Simulationsbeginn die spezifischen Kulturdaten für die Region des Pannonikums eingegeben, sowie die Standarddaten der Kultur, die nicht regionsspezifisch sind, aus dem Aqua-Crop Modell übernommen.

In dem Haupteingabefenster „Feld-Management“ ist es während der Simulationsdurchführung wieder zu Änderungen gekommen. Auch hier hat die Änderung der Ausgangdaten wieder mit einer Anpassungsmaßnahme zu tun, diesmal jedoch mit der Mulch-Schicht. Die ursprünglichen Berechnungen wurden mit einer Bodenbedeckung von 20 Prozent durchgeführt. Dies sollte jenen Teil der Ernterückstände simulieren, der auch nach zweimaliger Bodenbearbeitung noch an der Bodenoberfläche verbleibt. Als Anpassungsmaßnahme an sich verändernde Klimabedingungen soll die Wirkung einer Umstellung auf minimale Bodenbearbeitung und damit einer nahezu hundert prozentigen Bodenbedeckung durch eine Mulch-Schicht berechnet werden. Dazu wurde der Prozentsatz der Bodenbedeckung bei den Simulationen zur Anpassungsstrategie Mulch-Schicht von 20 auf 100 Prozent abgeändert. Wie bereits in der vorhergehenden Ausarbeitung erwähnt, ist in unserer Gegend in der Kultur Körnermais auf schlechten Standorten eine Bewässerung notwendig. Aufgrund dessen wurde in den Simulationen auf Boden 2, also auf jenen

mit geringerer Wasserspeicherkapazität, eine Bewässerung berücksichtigt. Die Bewässerungstermine wurden dabei vom Programm selbst gewählt und zwar immer dann, wenn die nutzbare Feldkapazität um mehr als 77 Prozent erschöpft war. Die Bewässerungsmenge blieb dabei mit 30mm immer gleich. Die Eingaben erfolgten dabei so, dass die automatische Bewässerung durch das Modell nur ein bis viermal in einer Vegetationsperiode stattfinden durfte, damit der Bewässerungsaufwand der Simulationen auch mit den in der Praxis üblichen Werten übereinstimmt.

Im Haupteingabefenster „Boden“ hingegen kam es wiederum während der Simulationen zu keinen Änderungen. Diese Werte wurden wie die Kultur-Werte zu Beginn der Simulationen eingegeben und nicht mehr abgeändert.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Kalibrierung des Modells bei Winterweizen

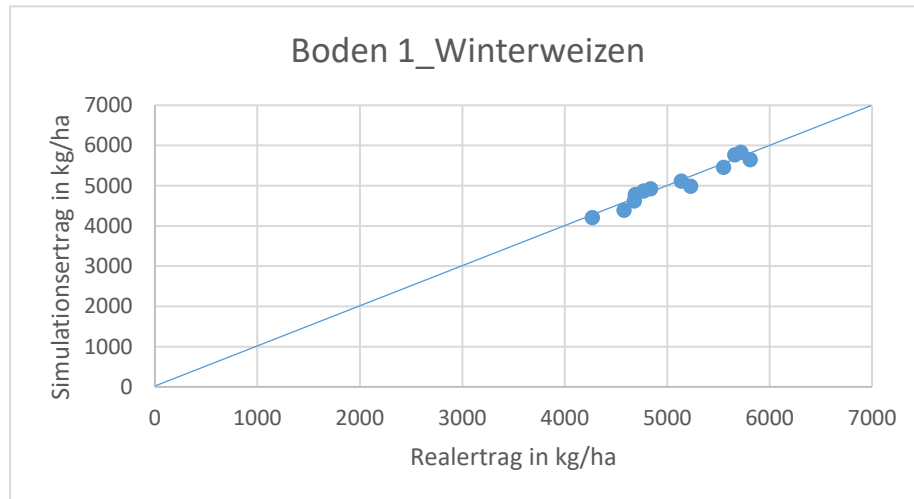


Abbildung 20: Kalibrierungsergebnis auf Boden 1 bei Winterweichweizen

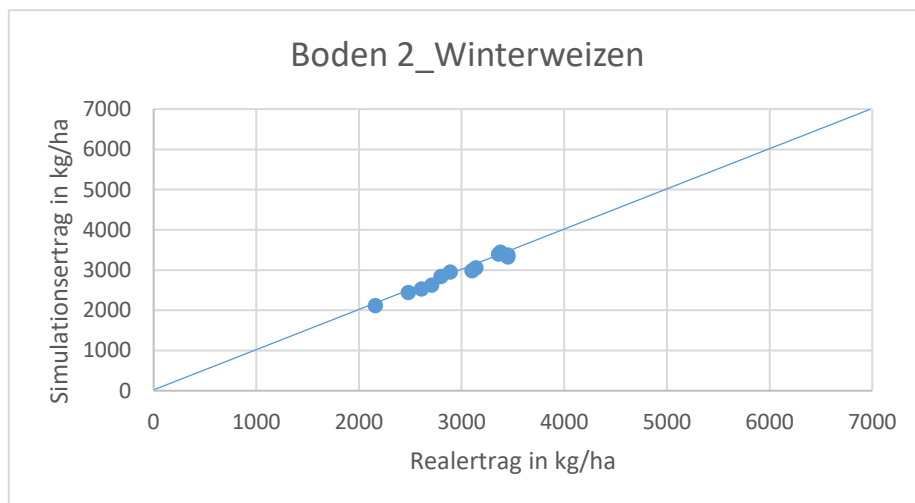


Abbildung 21: Kalibrierungsergebnis auf Boden 2 bei Winterweichweizen

Die Kalibrierung des Modells an die Praxiserträge der Jahre 2001 bis 2012 bei der Kultur Winterweizen ist sowohl auf Boden 1, als auch auf Boden 2 überdurchschnittlich gut gelungen (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21). Mit einer RMSE von 125kg/ha auf Boden 1 und 79kg/ha auf Boden 2 konnte die Kalibrierung als ideale Grundlage für die nachfolgenden Simulationen akzeptiert werden. In anderen Worten ausgedrückt

konnten die Praxiserträge mit einem durchschnittlichen Fehler von 103kg/ha auf Boden 1 und 72kg/ha auf Boden 2 simuliert werden. Da über den gesamten Referenzzeitraum in dem die Erträge in der Praxis erfasst wurden die gleiche Sorte angebaut war, konnte ein Sortenfehler vollständig ausgeschlossen werden.

## 4.2 Kalibrierung des Modells bei Körnermais

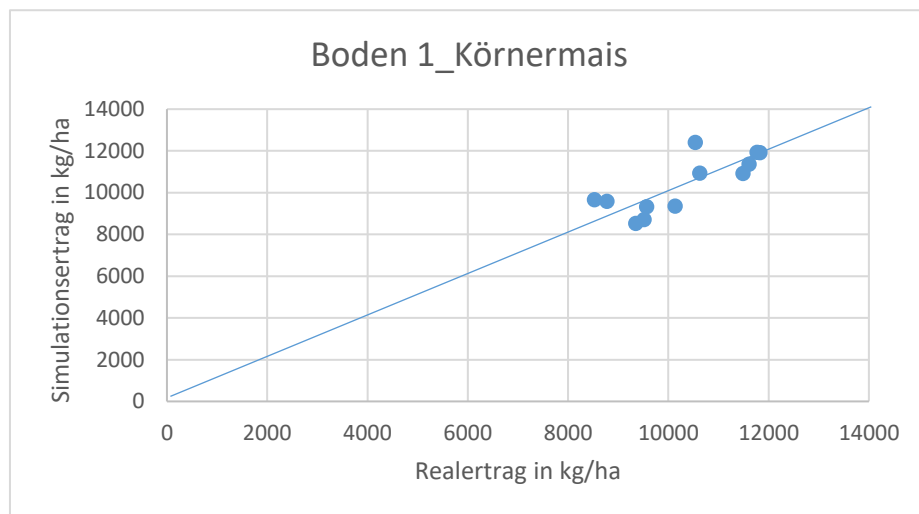


Abbildung 22: Kalibrierungsergebnis auf Boden 1 bei Körnermais

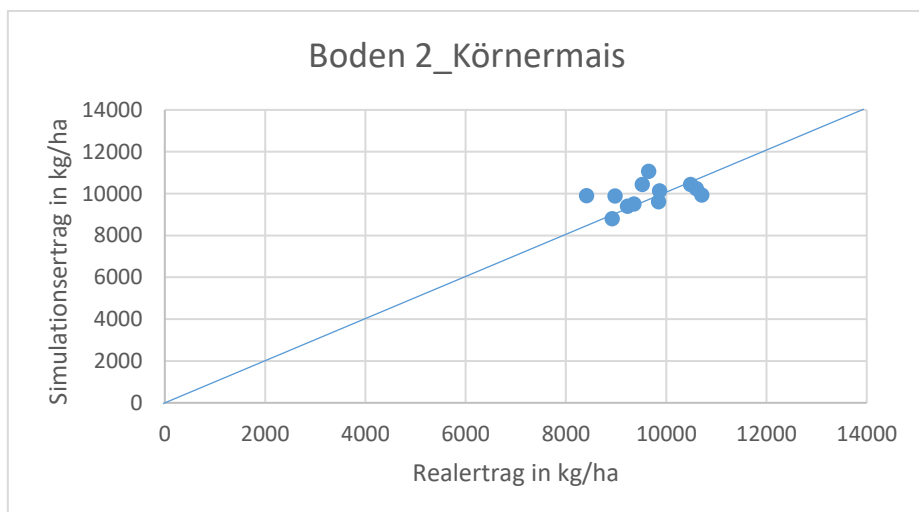


Abbildung 23: Kalibrierungsergebnis auf Boden 2 bei Körnermais

Die Kalibrierung des Modells an die Praxiserträge der Jahre 2001 bis 2012 bei der Kultur Körnermais kann zwar mit den Kalibrierungsergebnissen der Kultur Winterweizen nicht mithalten, dennoch aber als Grundlage für die weiteren Simulationen angewendet werden. Wir sprechen bei der Kultur Körnermais von einer RMSE von 815kg/ha auf Boden 1 und 753kg/ha auf Boden 2. In anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies wiederum einen durchschnittlichen Fehler von 653kg/ha auf Boden 1 und 338kg/ha auf Boden 2. Die dieser Arbeit vorgegangenen wissenschaftlichen Untersuchungen basieren dabei auf ähnlichen Fehlerwerten (vgl. THALER et al., 2012). In den Kalibrierungsfehler ist auch ein sogenannter Sortenfehler enthalten, da nicht in allen Referenzjahren die gleiche Sorte angebaut worden ist. Bei Körnermais ändern sich die von uns verwendeten Sorten generell in kürzeren Abständen als das beispielweise bei Winterweizen der Fall ist. Dafür gibt es viele Gründe, wie unterschiedliche Bodenbonitäten, ob eine Bewässerungsmöglichkeit bei den geplanten Körnermaisflächen besteht und so weiter. Trotz dieses Fehlers ist die Kalibrierung gelungen und kann als Basis für die weiteren Simulationen dienen.

### 4.3 Ertragsabschätzung bei Klimaveränderung ohne Anpassungsstrategie

In der Abbildung 24 werden die Ergebnisse der Simulationen für den Referenzzeitraum und den Zeitraum von 2021-2050 für beide Szenarien gezeigt. Zusätzlich zu diesen Werten wurden auch die Simulationsergebnisse für das CO2 File „400ppm“ für beide Zukunftsszenarien der Abbildung 24 angeschlossen. Dies wurde zur besseren Veranschaulichung und Bewertung des CO2 Düngeffekts getan.

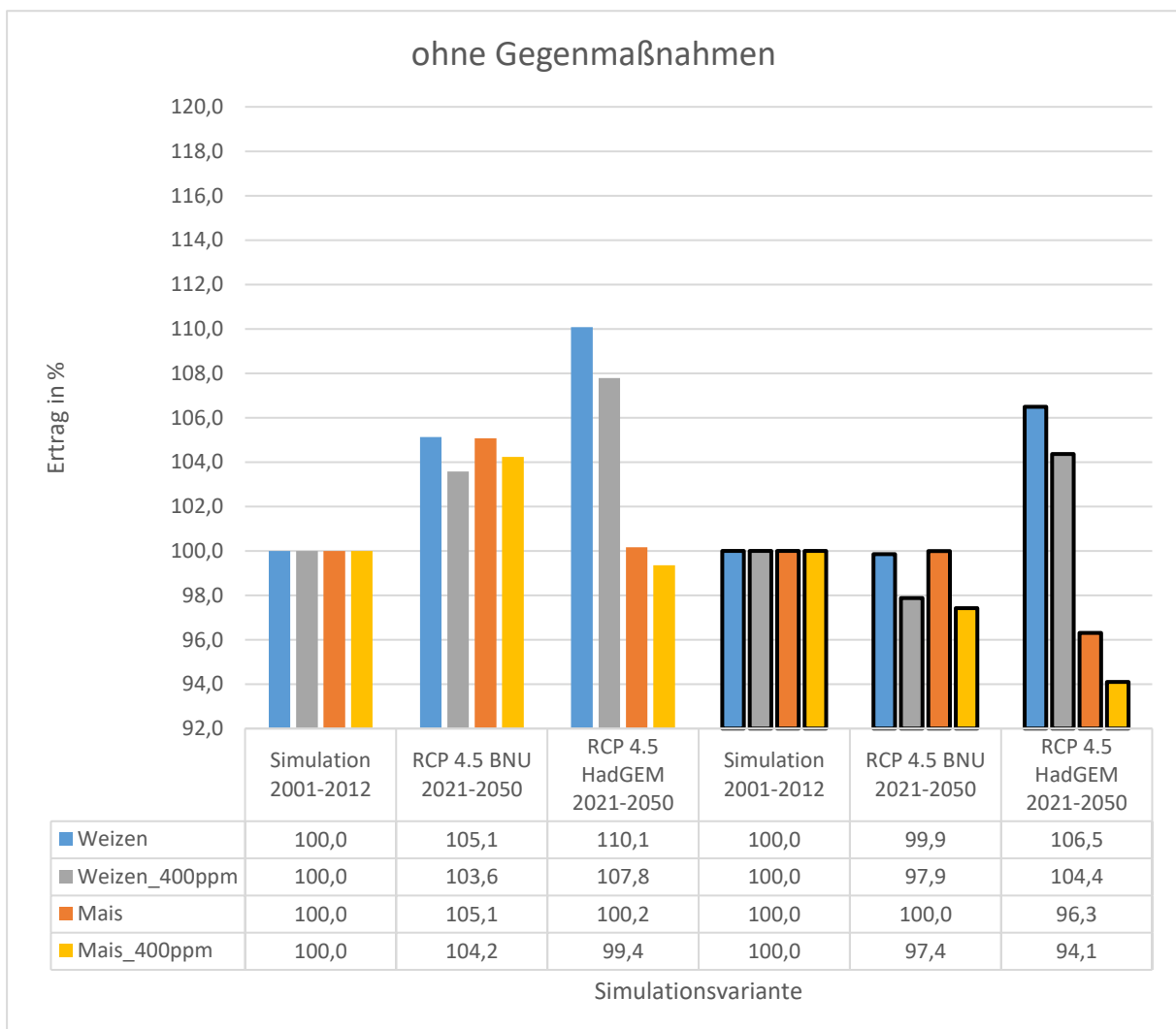


Abbildung 24: Ertragsabschätzung bei Winterweichweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm) ohne Anpassungsstrategie. (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)

Absolutertrag Referenzperiode 2001-2012			
<b>BODEN 1</b>			
Weizen	100 %	-->	<b>5048 kg/ha</b>
Mais	100 %	-->	<b>10384 kg/ha</b>

Absolutertrag Referenzperiode 2001-2012			
<b>BODEN 2</b>			
Weizen	100 %	-->	<b>2921 kg/ha</b>
Mais	100 %	-->	<b>9949 kg/ha</b>

Abbildung 25: Absoluterträge des Referenzzeitraumes 2001-2012 differenziert nach Kulturart und Boden. Die Absoluterträge für Körnermais und Winterweizen gelten in gleicher Weise für alle weiteren Abbildungen die mit dem CO2 File „Klimaziel“ berechnet worden sind.

Eindeutig aus der Abbildung 24 erkennbar, ist die unterschiedliche Wirkung der Szenarien BNU und HadGEM bei den Kulturarten Körnermais und Winterweizen. So sind die Ergebnisse der Simulation bei der Kultur Winterweizen im Szenario HadGEM immer besser als jene des Szenario BNU. Bei Körnermais hingegen ist die Situation umgekehrt, hier sind die Simulationserträge im Szenario BNU generell höher als jene im Szenario HadGEM. erinnert man sich hier an die Abbildung 13 und Abbildung 14 zurück, ist dies auch weitgehend nachvollziehbar. Im Szenario HadGEM kommt es nämlich zu einem um ungefähr 20mm erhöhten Niederschlag in den Monaten April bis Juni und einem durchschnittlichen Jahrestemperaturanstieg von 1,05°C, wobei hier der stärkste Anstieg in den Monaten Juli bis Oktober stattfindet. Ausschlaggebend dabei ist, dass der starke Temperaturanstieg in den Monaten Juli bis Oktober sich nur auf den Körnermais und nicht auf den Winterweizen auswirkt, da dieser zu diesem Zeitpunkt bereits geerntet ist, und dass die erhöhten Niederschläge in den Monaten April bis Juni optimal von den Weizenpflanzen genutzt werden können und der Körnermais in dieser Phase der Entwicklung keinen hohen Wasserbedarf hat. Außerdem befinden sich die Weizenpflanzen in diesem Zeitraum in den wichtigsten Entwicklungsstadien der gesamten Entwicklung, in denen eine gute Wasserversorgung für hohe Erträge notwendig ist. Zusätzlich kommt es im angesprochenen Szenario in den für die Maisentwicklung wichtigen Monaten Juli bis September zu verringerten Niederschlägen, welche für die Weizenentwicklung eher unbedeutend sind. Im BNU Szenario kommt es hingegen über das ganze Jahr zu leichten, kontinuierlichen Niederschlagsrückgängen, wobei die stärksten Rückgänge in den Monaten Dezember bis März auftreten.

Eine weitere Angelegenheit die bei genauer Betrachtung der Abbildung 24 sofort ins Auge sticht, ist die unterschiedliche Wirkung der erhöhten CO2 Gehälter in der Atmosphäre auf die Erträge von Körnermais und Winterweizen. Dabei reagiert der Weizen als C3 Pflanze nahezu doppelt so stark auf die steigenden CO2 Gehälter wie der Mais als C4 Pflanze. Das beruht auf Erkenntnissen der Literatur, dass C3 Pflanzen



stärker von den steigenden CO<sub>2</sub> Gehältern in der Luft profitieren werden (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Außerdem kann aus der Abbildung 24 herausgelesen werden, dass es auf Boden 2 ohne CO<sub>2</sub> Düngeeffekt zu Ertragsrückgängen von bis zu drei Prozent kommen könnte, hier würde nur im Falle des Winterweizens im Szenario HadGEM der Referenzertrag gehalten werden können. Die vorhandene Literatur beschreibt dabei, dass die CO<sub>2</sub> Dünge Wirkung sich vor allem auf schlechten Standorten mit geringer Wasserhaltekapazität bemerkbar machen kann (vgl. THALER et al., 2012). Bei der Kultur Körnermais in der Abbildung 24 wird diese unterschiedliche Wirkung gut dargestellt. Während der erhöhte CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre auf Boden 1 bei Mais nach Abbildung 24 zu einer Ertragssteigerung von einem Prozent führt, verdoppelt sich dessen Wirkung auf Boden 2 auf über zwei Prozent. Dieser Wirkungseffekt beruht auf den Nebenwirkungen eines erhöhten CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre, durch welchen die Transpiration einzelner Blattebenen der Pflanzen sinken, es dadurch zu einer verringerten Bestandeswasserabgabe und Evapotranspiration kommt und sich daher positiv auf die Wassernutzungseffizienz und den Bestandeswasserhaushalt auswirkt (vgl. WEIGEL et al., 2014). Aufgrund dessen kommt diese Nebenwirkung des erhöhten CO<sub>2</sub> Gehaltes vor allem auf jenen Standorten und Böden zu tragen, die von Trockenheit geprägt sind und geringes Wasserspeichervermögen aufweisen. Ein Wegfall des CO<sub>2</sub> Düngeeffekts auf Boden 1 würde daher leichter zu verkraften sein, hier würden die Erträge dadurch etwas leichter steigen, gleichbleiben oder eventuell etwas sinken. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Ertragsrückgang auf Boden 2, ohne wirksame Gegenmaßnahme, sehr hoch ist. (Abbildung 24)

#### **4.4 Mulch-Schicht als Anpassungsstrategie**

In der Abbildung 26 werden die Ergebnisse der Simulationen für den Referenzzeitraum und den Zeitraum von 2021-2050 für beide Szenarien gezeigt. Zusätzlich zu diesen Werten wurden auch die Simulationsergebnisse für die Anpassungsstrategie der minimalen Bodenbearbeitung inklusive einer Mulch-Schicht für beide Zukunftsszenarien der Abbildung 26 angeschlossen. Dies wurde zur besseren Veranschaulichung und Bewertung des Mulch-Effekts getan. So können die Differenzen zwischen den Simulationsergebnissen von Weizen und Weizen\_Mulch und zwischen Mais und Mais\_Mulch nun als Mulch Effekt bewertet werden. Nicht ganz vernachlässigen sollte man hier den darin enthaltenen CO<sub>2</sub> Düngeeffekt, der ebenfalls

positiv auf die Erträge der Kulturpflanzen wirken kann, wobei hier das Ausmaß der positiven Wirkung noch nicht ganz geklärt ist (vgl. WEIGEL et al., 2014). Hier müsse man auch die Entwicklung anderer Luftinhaltsstoffe im Auge behalten, da sie die Wirkung eines erhöhten CO<sub>2</sub> auf die Pflanzenentwicklung beeinflussen können. In dieser Diskussion wird auch gerne das Ozon genannt, das Gegenspieler zu CO<sub>2</sub> sein soll (vgl. FUHRER and BOCKER, 2003). Alle in der Abbildung 26 enthaltenen Simulationen wurden mit dem CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ durchgeführt, das die CO<sub>2</sub> Gehälter der Atmosphäre enthält, die bei Einhaltung der Klimaziele bis zum Jahr 2050 zu erwarten sind. Außerdem gelten hier wieder die Absoluterträge der Abbildung 25.

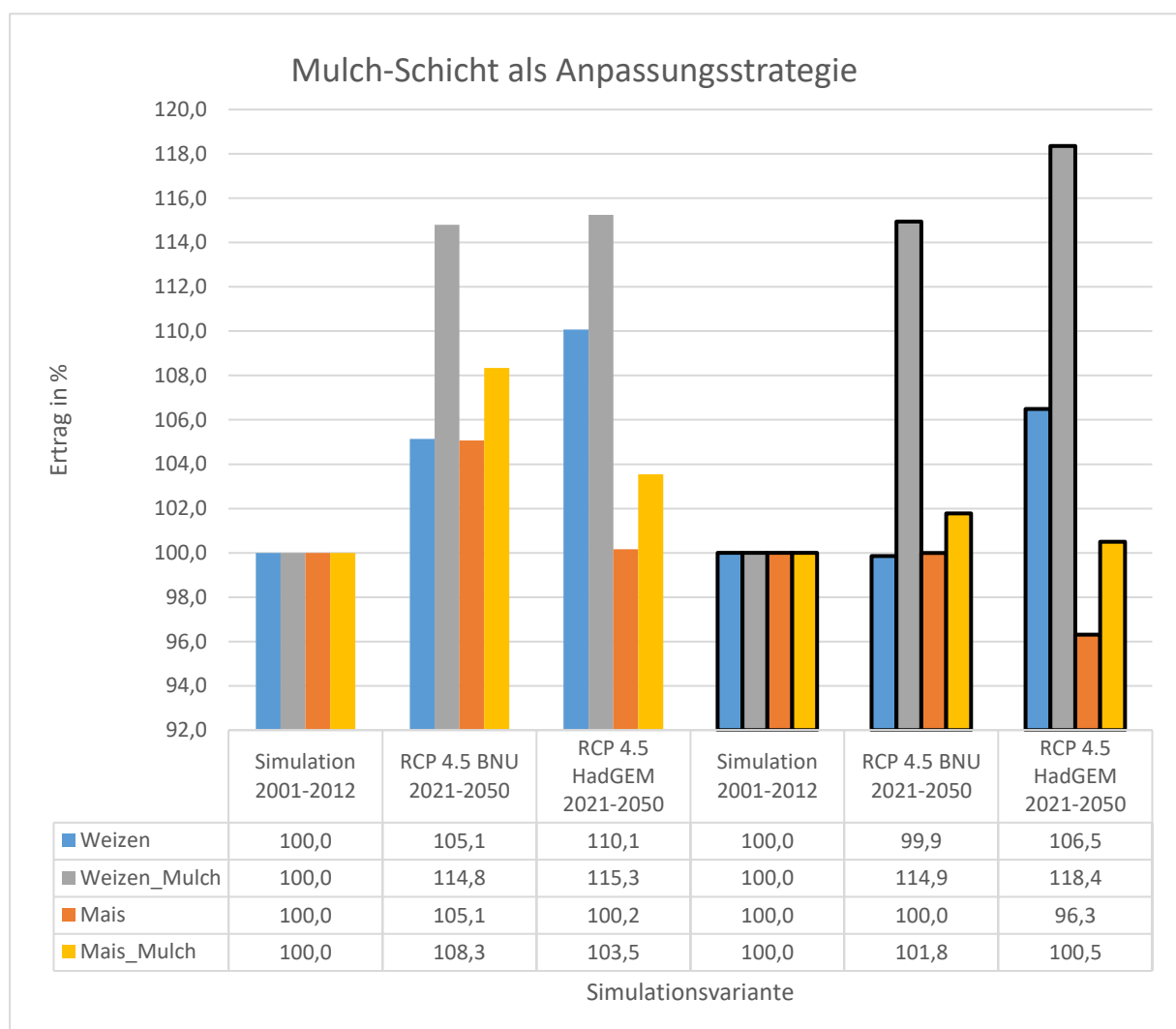


Abbildung 26: Ertragsabschätzung bei Winterweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm), mit flächendeckender Mulch-Schicht (100 Prozent Bodenbedeckung) als Anpassungsstrategie unter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub> Düngeeffektes (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)

Was allgemein bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse auffällt ist, dass durch den Mulch und den CO<sub>2</sub> Düngeeffekt alle Erträge auf Boden 1 und Boden 2 zumindest gehalten, wenn nicht sogar gesteigert werden können. Bei der Kultur Winterweizen kann es dabei zu Ertragssteigerungen von 14,8 bis 18,4 Prozent kommen, wobei hier die generell verbesserten Wachstumsbedingungen unberücksichtigt bleiben. Bei Körnermais ist die Situation etwas anders. Während hier die Erträge auf Boden 1 gesteigert werden, können sie auf Boden 2 nicht mehr als gehalten werden. Daran ist deutlich zu erkennen, dass der ertragssteigernde Effekt einer Mulch-Schicht bei der Kultur Winterweizen deutlich größer ist als bei Körnermais. Die Ursache dafür ist der mitberücksichtigte CO<sub>2</sub> Düngeeffekt, der bei der Kultur Winterweizen massiv stärker auftreten kann als bei C<sub>4</sub>-Pflanzen, zu welchen der Körnermais gehört. Vergleicht man die Simulationsergebnisse der beiden Böden, so lässt sich rasch erkennen, dass die Effekte bei der Kultur Weizen auf Boden 2 nahezu doppelt so hoch wie auf Boden 1 sind. In Zahlen bedeutet dies eine Ertragssteigerung auf Boden 1 von 5,2 bis 9,7 Prozent und auf Boden 2 von 11,9 bis 15%. Dieses Ergebnis der durchgeführten Simulationen kann von der Literatur bestätigt werden. Demnach sind durchschnittliche Ertragsteigerungen von zehn Prozent bei Weizen möglich (vgl. EITZINGER et al., 2012). Besonders auf Böden mit geringer Wasserhaltekapazität, können die Ertragspotentiale durch minimale Bodenbearbeitung inklusive Mulch-Schicht signifikant verbessert werden (vgl. EITZINGER, et al., 2012). Die in den Simulationsergebnissen dieser Abbildung enthaltenen ertragssteigernden Effekte eines erhöhten CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre bei der Kultur Winterweizen konnten in Freilandversuchen der Universität Braunschweig mit 9 bis 15 Prozent erfasst werden (vgl. WEIGEL et al., 2014). Die durchschnittliche Ertragssteigerung durch den CO<sub>2</sub> Düngeeffekt in den auf FACE- Technik basierenden Versuchen betrug bis dato ungefähr 15 Prozent (vgl. LONG et al., 2006).

Die ertragssteigernden Effekte einer Mulch-Schicht lassen sich auf eine verbesserte Wasserverfügbarkeit, verringerte unproduktive Wasserverluste und einer verringerten Wasser- und Winderosion zurückführen, wobei letztere als Langzeiteffekt in unserem Fall in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Dazu kommt, dass es durch die minimale Bodenbearbeitung zu einem verringerten Energieinput und damit zu einer Kostenersparnis kommt, welche das Produktionsrisiko vermindern und die Elastizität eines Betriebes in der Wirtschaftsweise fördern könnte. Die ertragssteigernden Effekte einer Mulch-Schicht können durch bestimmte Faktoren auch reduziert werden, so

spricht man von einer negativen Korrelation in Bezug auf den vorkommenden Wasserinput durch Niederschläge und Bewässerung (vgl. QIN et al., 2015). Außerdem verzögert eine flächendeckende Mulch-Schicht auch die Erwärmung des Bodens, was zu einer Verzögerung im Auflaufen der Kultur und der Jugendentwicklung führen kann. (vgl. QIN et al., 2015). Besonders stark können diese Effekte in kälteren Regionen oder bei Schlechtwetterperioden auftreten. Somit kann dieser negative Effekt durchaus auch in dem von hohen Temperaturen geprägten Pannonikum auftreten. In den Simulationen findet aber auch dieser Nebeneffekt der Anpassungsstrategie keine Berücksichtigung, der Fokus liegt hier ausschließlich auf der Versorgung der Pflanzen mit Wasser.

## 4.5 Hecke als Anpassungsstrategie

In der Abbildung 27 werden die Ergebnisse der Simulationen für den Referenzzeitraum 2001-2012 und den Zeitraum von 2021-2050 für beide Szenarien gezeigt. Zusätzlich zu diesen Werten wurden auch die Simulationsergebnisse für die Anpassungsstrategie der Hecke als Evaporationsschutz für beide Zukunftsszenarien der Abbildung 27 angeschlossen. Auch hier gelten die Absoluterträge des Referenzzeitraumes der Abbildung 25.

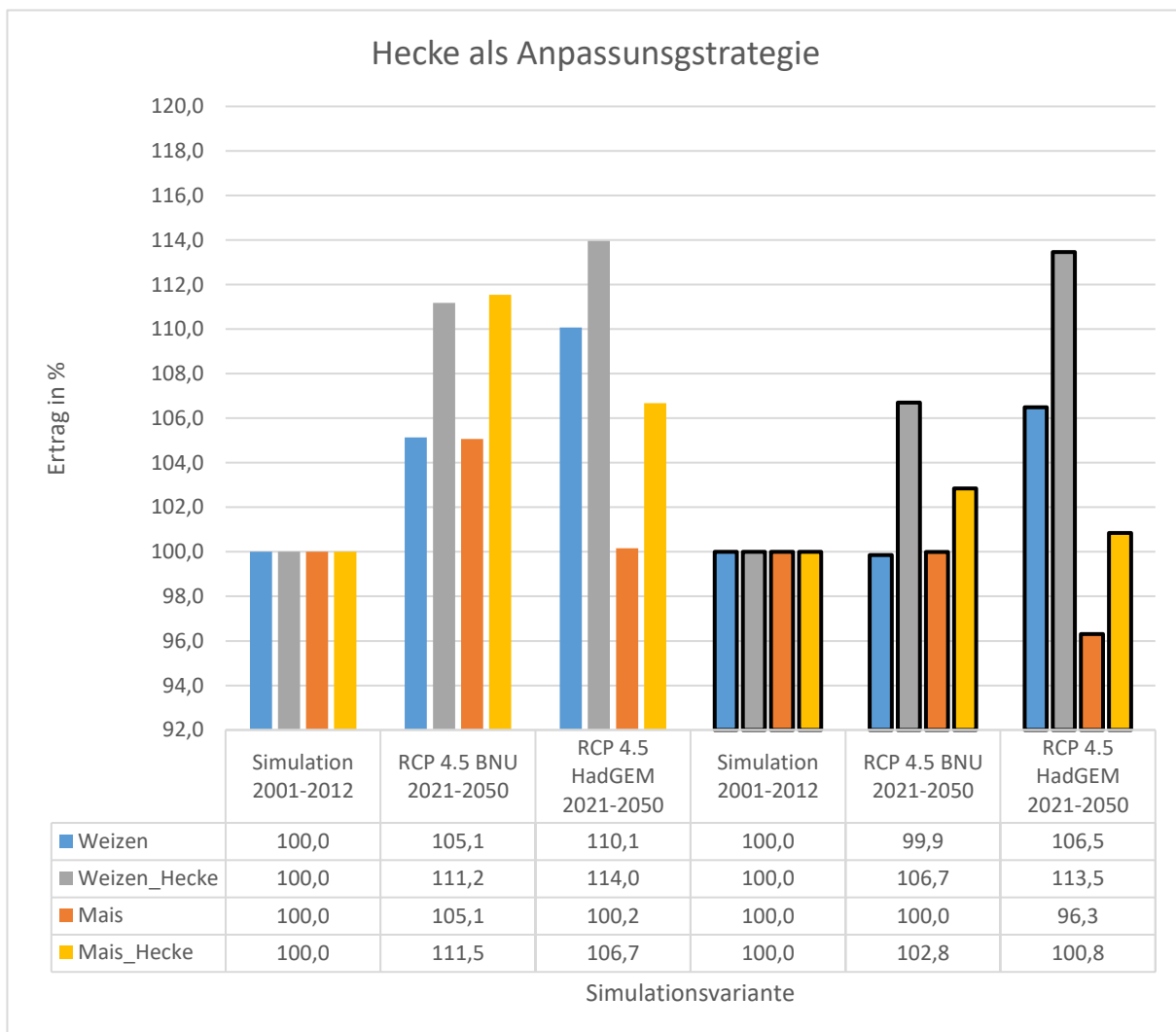


Abbildung 27: Ertragsabschätzung bei Winterweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden2 (nFK= 52,7mm), mit Hecke als Anpassungsstrategie (30 Prozent Windreduktion) In den in der Abbildung enthaltenen Simulationen ist der CO<sub>2</sub> Düngeeffekt laut CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ wie bei der Mulch-Schicht Strategie enthalten. (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)

In allen Fällen konnten die Erträge durch die Anpassungsstrategie Hecke gesteigert werden. Die Ertragssteigerung bei Winterweizen war prozentuell etwas höher als bei

Körnermais. Bis auf den Weizenertrag auf Boden 1 im Szenario HadGEM konnten alle Weizenerträge um sechs bis sieben Prozent gesteigert werden. Der Weizenertrag auf Boden 1 im Szenario HadGEM stieg nur halb so stark, jedoch ist das Ertragsniveau mit 110,08 Prozent ohne Anpassungsstrategie bereits sehr hoch. Bei Körnermais hingegen war die Wirkung der Anpassungsstrategie augenscheinlich vom Boden abhängig. Hier ist es auf Boden 1 zu Ertragssteigerungen von ungefähr sechs Prozent gekommen, wobei die Erträge auf Boden 2 nur halb so stark stiegen. Jedenfalls konnte aufgrund der Anpassungsstrategie der Ertragsrückgang bei Körnermais auf Boden 2 unterdrückt werden, sodass hier sogar leicht steigende Erträge erzielt werden konnten. Die ertragssteigernde Wirkung der Hecke ist vor allem auf deren Windgeschwindigkeitsreduktion zurückzuführen. Dadurch kommt es zu einem verringerten Austausch der trockenen Luft am Boden des Pflanzenbestandes und somit zu einer reduzierten Verdunstung. Wie man in der Abbildung 28 sehen kann, betrug die Reduktion der Verdunstung dabei rund acht Prozent in beiden Szenarien.

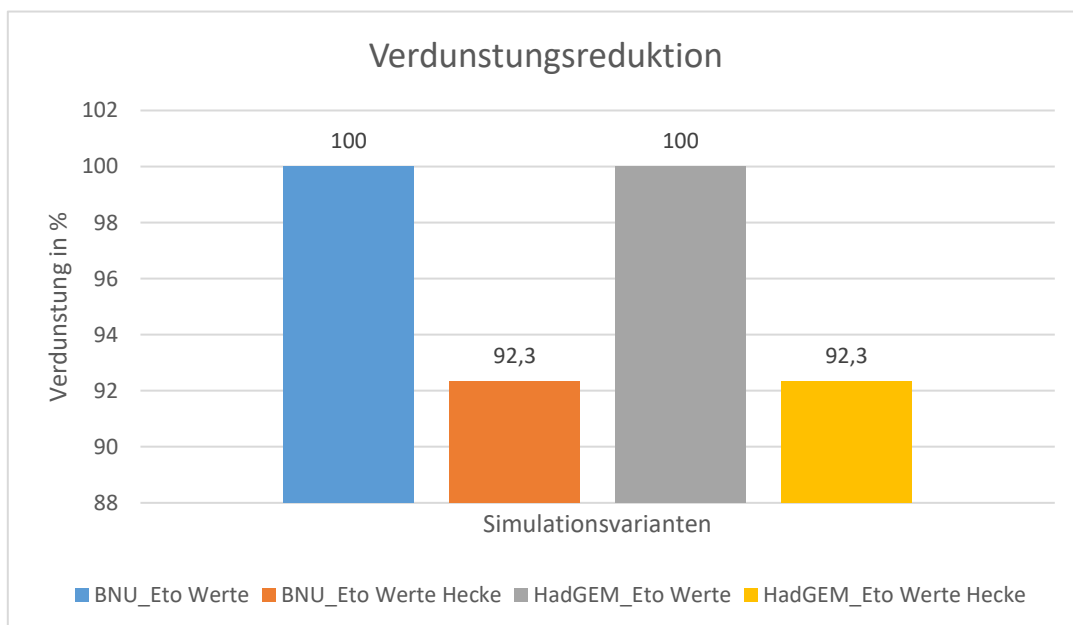


Abbildung 28: Die Wirkung einer Hecke als Windschutz auf die Verdunstung am Feld in beiden Szenarien (durchschnittliche Windreduktion von 30 Prozent durch die Hecke)

## 4.6 Vergleich der Mulch-Schicht und Hecke als Anpassungsstrategie

In der Abbildung 29 werden die Ergebnisse der Simulationen für den Referenzzeitraum 2001 bis 2012 und den Zeitraum von 2021 bis 2050 für beide Anpassungsstrategien gezeigt. Außerdem gelten auch hier wieder die Absoluterträge des Referenzzeitraumes der Abbildung 25.

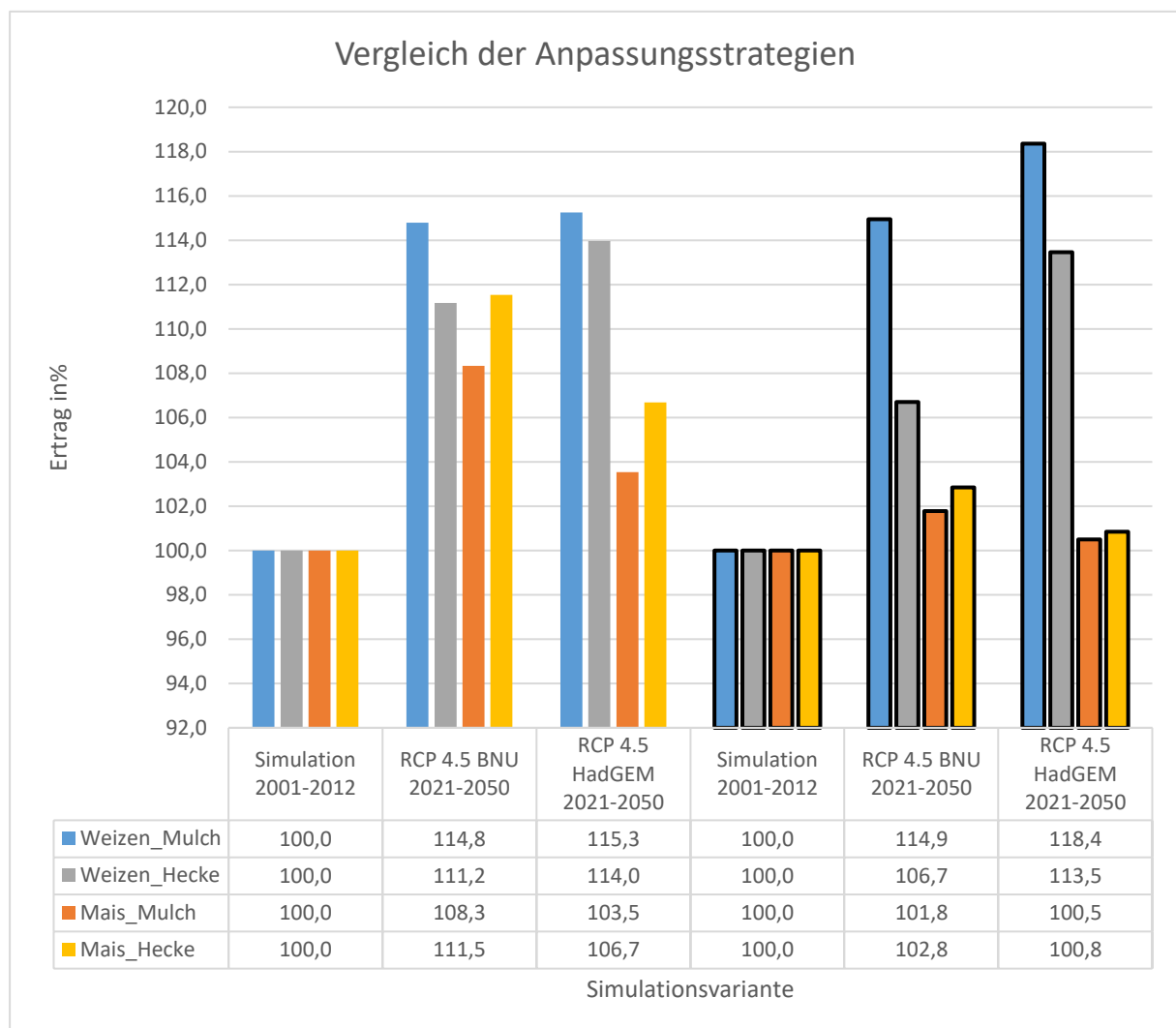


Abbildung 29: Vergleich der beiden Anpassungsstrategien bei Winterweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm). In den in der Abbildung enthaltenen Simulationen ist der CO<sub>2</sub> Düngeeffekt laut CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ enthalten (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)

Laut Grafik kann die Mulch-Schicht als insgesamt bessere Anpassungsstrategie bei Winterweizen und die Hecke bei Körnermais gesehen werden. Denn quer durch alle Simulationen erzielte stets die Mulch-Variante bei Winterweizen und die Variante rund

um die Hecke bei Körnermais die besseren Erträge. Was in dieser Grafik besonders auffällt, ist die geringe ertragssteigernde Wirkung von der Mulch-Schicht und der Hecke auf Boden 2 bei Körnermais. Auf diesem Boden wäre es zwar ohne diese Anpassungsmaßnahmen zu Ertragsrückgängen gekommen, dennoch ist die prozentuelle Steigerung des Ertrages deutlich hinter jener des Bodens 1 zurückgeblieben. Genau das Gegenbild sehen wir bei der Kultur Winterweizen. Hier konnten auf Boden 2 prozentuell höhere Ertragssteigerungen erzielt werden als auf Boden 1. Auf Boden 2 bei Winterweizen war der prozentuelle Unterschied der beiden Anpassungsstrategien aber auch am stärksten. Nur auf Boden 2 bei der Kultur Winterweizen differierten die beiden Anpassungsstrategien mehr als vier Prozent untereinander. Hier konnte die Anpassungsstrategie der Hecke als Windschutz mit der Mulch-Schicht Variante nicht Schritt halten. Mit beiden Anpassungsstrategien inklusive des in den Simulationen enthaltenen CO<sub>2</sub> Düngeeffekts konnte bei beiden Kulturen und auf beiden Versuchsböden eine Ertragsreduktion erfolgreich verhindert werden. Unter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub> Düngeeffekts und einer gezielten und wirksamen Anpassungsstrategie können die Erträge im Vergleich zum Referenzzeitraum bei Körnermais um 2,8 bis 11,5 Prozent und bei Winterweizen um 6,7 bis 18,4 Prozent ansteigen. In diesen Ergebnissen sind jedoch die teilweise verbesserten Wachstumsbedingungen durch die 4.5 RCP Szenarien inkludiert, die wie zuvor bereits erwähnt, nach derzeitiger wissenschaftlicher Meinung, sehr wahrscheinlich mindestens eintreten werden.



## 4.7 Vergleich der Anpassungsstrategien ohne CO2 Düngeeffekt

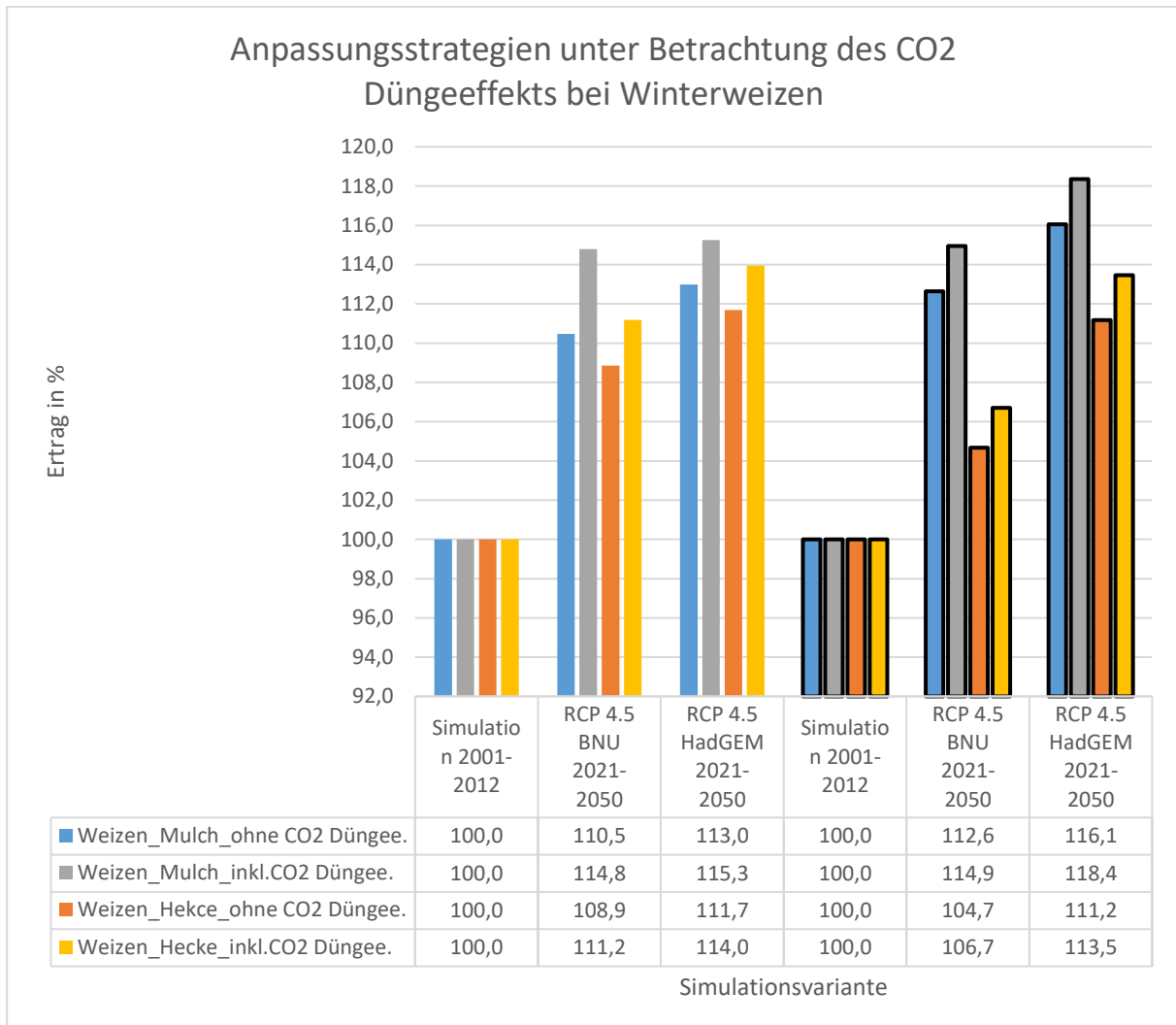


Abbildung 30: Vergleich der Anpassungsstrategien bei Winterweizen auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm), mit und ohne Berücksichtigung des CO2 Düngeeffekts nach dem CO2 File „Klimaziel“, wodurch der „reine“ Mulch- und Heckeneffekt bestimmt werden kann.

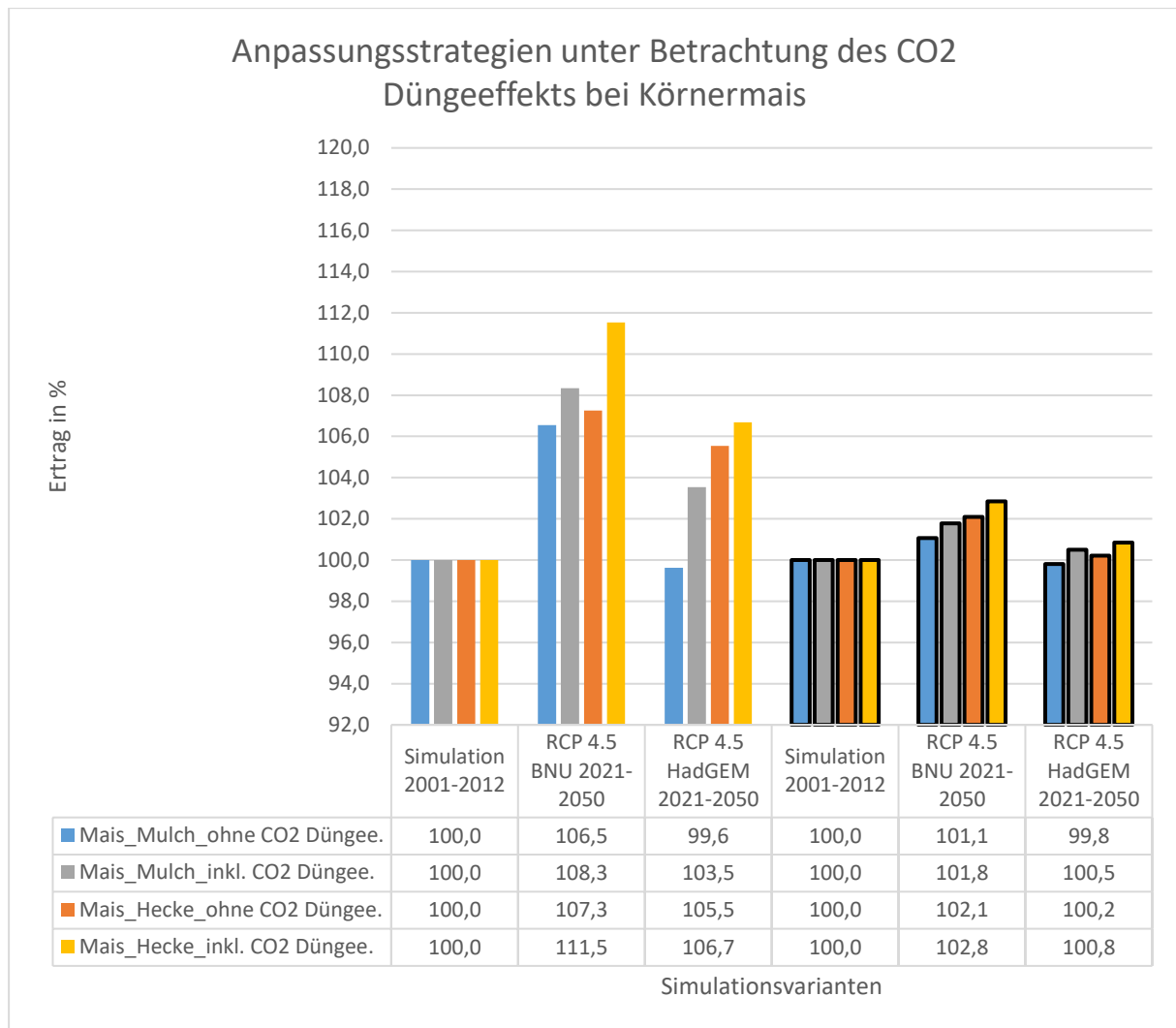


Abbildung 31: Vergleich der Anpassungsstrategien bei Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm), mit und ohne Berücksichtigung des CO2 Düngeeffekts, wodurch der „reine“ Mulch- und Heckeneffekt bestimmt werden kann.

Hier gelten ebenso wie bei den vorherigen Abbildungen die Absoluterträge des Referenzzeitraumes der Abbildung 25, nachdem die Berücksichtigung des erhöhten CO2 Gehaltes in der Atmosphäre erst im Untersuchungszeitraum 2021 bis 2050 erfolgt. Der ertragssteigernde Effekt eines erhöhten CO2 Gehaltes in der Atmosphäre kann auch anhand der Abbildung 30 und Abbildung 31 bestätigt werden. Während bei Winterweizen das Ertragsplus bei konstanten zwei bis zweieinhalb Prozent liegt, schwankt der Effekt bei Körnermais etwas, wodurch die Ertragssteigerungen von einem halben bis vier Prozent reichen. Nachdem man auch die ertragssteigernde Wirkung des erhöhten CO2 Gehaltes in der Atmosphäre mit ohne Anpassungsstrategie bestimmt hat und diese bei Winterweizen konstante zwei und bei Körnermais konstante ein bis zwei Prozent betrug, kann hier von Wechselwirkungen

im Simulationsprozess zwischen den Anpassungsstrategien und dem erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre gesprochen werden. Durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse der Abbildung 30 und Abbildung 31 kann hier auch der „reine“ ertragssteigernde Effekt der beiden Anpassungsstrategien beurteilt werden, siehe auch Abbildung 37 und Abbildung 38 im Anhang. Konkret kann es daher bei Winterweizen zu einer ertragssteigernden Wirkung von bis zu 16,1 Prozent durch die Anpassungsstrategie „Mulch-Schicht“ und bis zu 11,7 Prozent durch die „Hecke“ kommen. Bei Körnermais waren die ertragssteigernden Wirkungen etwas niedriger, so kann es zu einem Ertragsplus von bis zu 8,3 Prozent durch die Anpassungsstrategie „Mulch-Schicht“ und bis zu 11,5 Prozent durch die „Hecke“ kommen. Speziell am Simulationsergebnis für Körnermais war, dass die reine Wirkung der Mulch-Schicht im Szenario HadGEM einen sinkenden Ertrag nicht verhindern konnte. Wie bereits am Anfang der Arbeit erwähnt, hat man sich bei dieser Arbeit für Szenarien entschieden, welche mit höchster Wahrscheinlichkeit bestimmt eintreten werden. Dadurch ist es zum Teil auch zu verbesserten Wachstumsbedingungen für die einzelnen Kulturen gekommen. Würde man diese zum Teil verbesserten Wachstumsbedingungen aus den genannten ertragssteigernden Wirkungen der Anpassungsmaßnahmen abziehen, wären diese natürlich um einiges geringer und würden zwischen 1,6 bis 12,8 Prozent bei Winterweizen und -0,5 bis 5,4 Prozent bei Körnermais betragen (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38 im Anhang).

## 4.8 Auswirkungen eines erhöhten CO<sub>2</sub> Gehaltes bei Klimaveränderung

In der Abbildung 32 und Abbildung 33 werden die Ergebnisse der Simulationen für den Zeitraum von 2021 bis 2050 für unterschiedliche CO<sub>2</sub> Gehälter in der Atmosphäre bei den Kulturen Körnermais und Winterweizen gezeigt. Als Ausgangsbasis, also als 100 Prozent Basis, wird das Simulationsergebnis des Referenzzeitraumes 2001 bis 2012 herangezogen, welches mit dem CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ berechnet worden ist (siehe Abbildung 25).

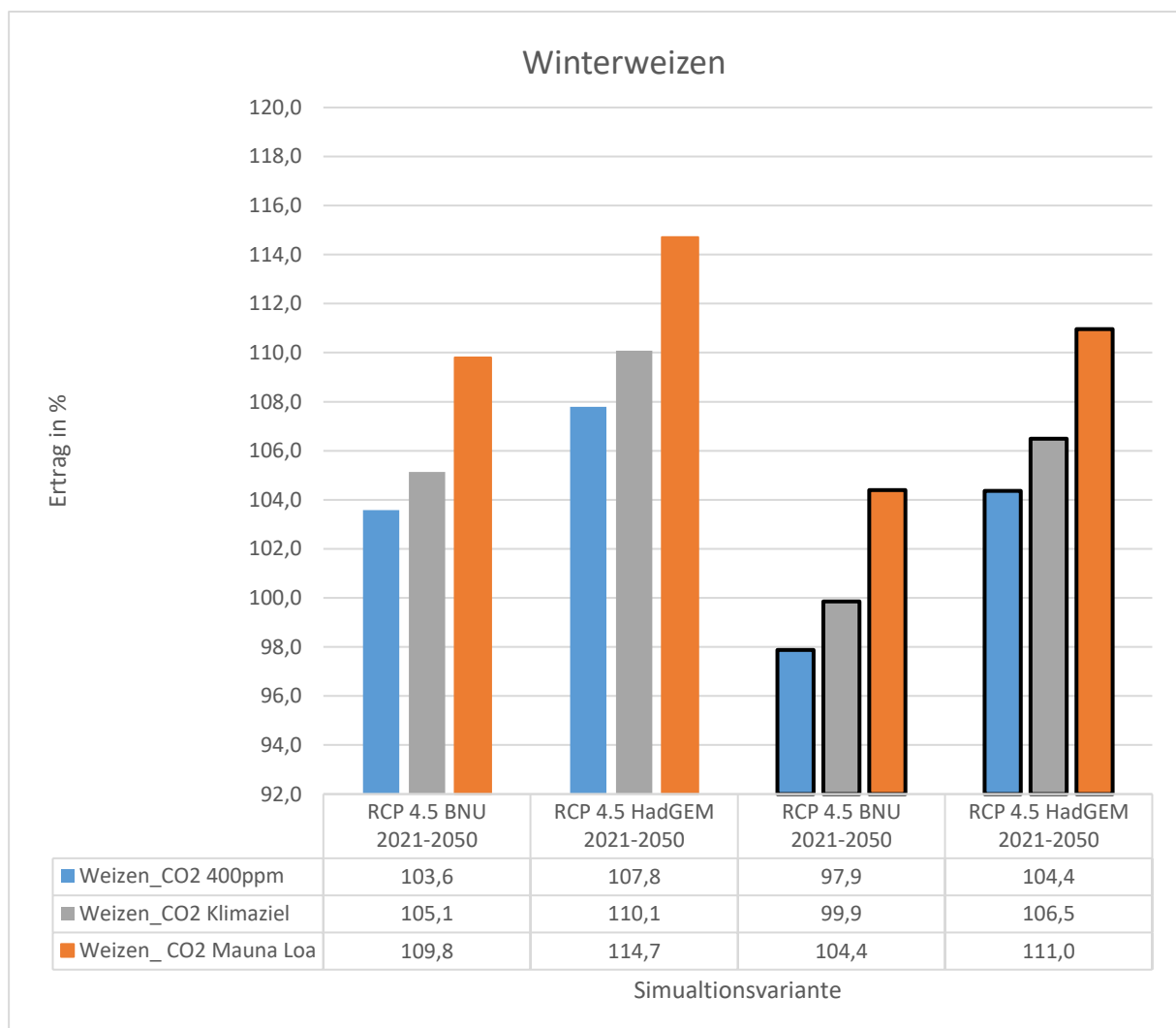


Abbildung 32: Auswirkungen eines sich ändernden CO<sub>2</sub> Gehaltes auf die Ertragsabschätzung 2021-2050 bei einer Klimaveränderung nach den Szenarien BNU und HadGEM bei Winterweizen auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm). (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben).

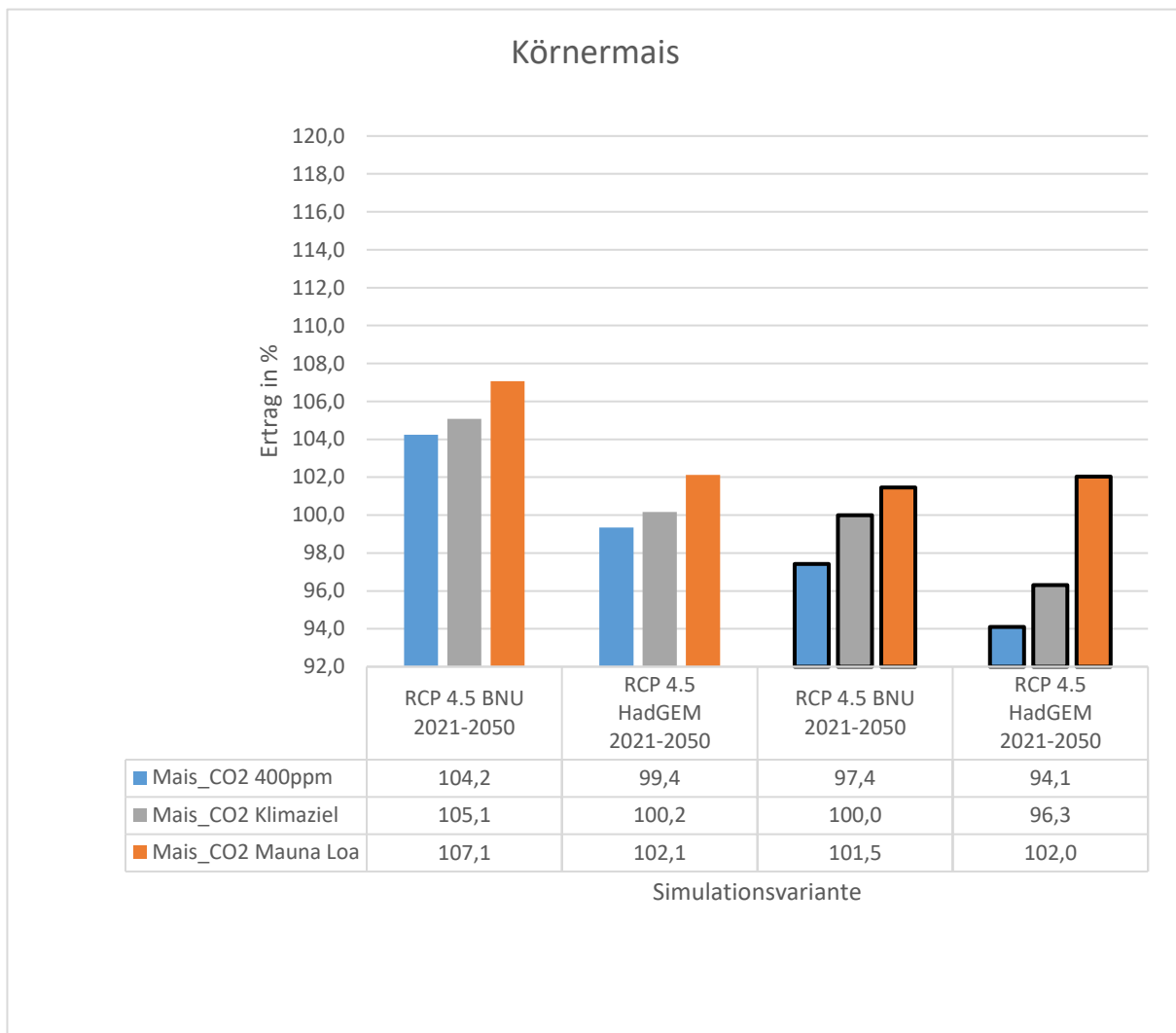


Abbildung 33: Auswirkungen eines sich ändernden CO<sub>2</sub> Gehaltes auf die Ertragsabschätzung 2021-2050 bei einer Klimaveränderung nach den Szenarien BNU und HadGEM bei Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm). (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)

Insgesamt wurden die drei bereits erwähnten CO<sub>2</sub> Files bei der Berechnung verwendet, also neben dem CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ auch die CO<sub>2</sub> Files namens „400ppm“ und „Mauna Loa“ (ML) (siehe Abbildung 19). Die Simulationen die in der Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt sind, sind außerdem alle ohne jegliche Anpassungsstrategie berechnet worden, sodass eine eindeutige Wirkungszuweisung gewährleistet werden kann und keine Wechselwirkungen enthalten sind.

Deutlich in den beiden Tabellen ist die unterschiedliche Wirkung eines sich verändernden CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre auf die beiden Kulturen zu erkennen. Während der Winterweizen als C<sub>3</sub> Pflanze relativ stark reagiert, sind die Auswirkungen eines sich verändernden CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre bei der Kultur Körnermais

gerade einmal halb so stark. Grund für diese unterschiedliche Wirkung ist, dass ein erhöhter CO<sub>2</sub> Gehalt C<sub>3</sub> Pflanzen zu einer effizienteren Photosynthese verhilft und es dadurch zu einer Steigerung der Photosyntheseleistung kommt, während er bei Mais nur zu einer besseren Wassernutzungseffizienz führt (vgl. WEIGEL et al., 2014). Nachdem es aber auch bei den C<sub>3</sub> Pflanzen zu einer verbesserten Wassernutzungseffizienz kommt und hier zusätzlich die Photosyntheseleistung der Pflanzen steigt, können diese einen höheren Nutzen aus den steigenden CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre ziehen. Konkret kann bei der Kultur Winterweizen davon ausgegangen werden, dass sich der Ertrag, je nach auftretendem CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre, um 3,5 bis 14,7 Prozent auf Boden 1 steigern könnte. Auffällig ist außerdem, dass der Ertrag bei Winterweizen in dem Szenario HadGEM stets um fünf Prozent stärker steigt als im Szenario BNU. Ein gutes Merkmal dafür, dass die Ertragssteigerungen und Ertragsrückgänge nicht alleinig auf den CO<sub>2</sub> Gehalt, sondern auf die gesamten sich verändernden Wetterverhältnisse, die das jeweilige Szenario mit sich bringt, zurückzuführen sind. Deshalb wird hier das Simulationsergebnis für den Zeitraum 2021 bis 2050, welches mit dem CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ errechnet worden ist, als neue Ausgangsbasis herangezogen. Ein völlig neuer Betrachtungswinkel aufgrund dessen sich auch die Prozentsätze der Ertragsentwicklung ändern. Entwickelt sich der CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre ähnlich des CO<sub>2</sub> Gehalts des Mauna Loa File, dann sind Ertragssteigerungen von bis zu viereinhalb Prozent möglich. Der laut Simulationsergebnissen maximale CO<sub>2</sub> Düngeeffekt würde also knapp sieben Prozent ausmachen. Bei einem CO<sub>2</sub> Gehalt ähnlich des 400ppm File kommt es hingegen zu einem Ertragsrückgang von bis zu 2,3 Prozent. Nachdem der CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre aber mit hoher Wahrscheinlichkeit rapide steigen wird, soll das 400ppm File jene Pflanzen repräsentieren, welche nicht auf den höheren CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre ansprechen. Je nach Sorte und Kultur kann der CO<sub>2</sub> Düngeeffekt unterschiedlich stark wirksam werden. Außerdem sind viele weitere Aspekte bei der möglichen Wirkung des erhöhten CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre auf die Pflanzenentwicklung und insbesondere auf den Ertrag noch nicht restlos geklärt. Forschungsbedarf herrscht hier noch in Richtung des Einflusses unterschiedlicher Umweltbedingungen und der Wechselwirkung verschiedener Gase in der Atmosphäre auf den CO<sub>2</sub> Düngeeffekt (vgl. WEIGEL et al., 2014). Außerdem konnte bereits nachgewiesen werden, dass sich auch die chemische Zusammensetzung der Weizenpflanzen bei einem erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der

Atmosphäre ändert (vgl. KIMBALL, 2004). Reduzierte Stickstoffgehalte in Pflanzen die in einer Umgebung mit erhöhter CO<sub>2</sub> Konzentration in der Luft herangewachsen sind, konnten bereits in Versuchen nachgewiesen werden. Diese hatten dabei auch Auswirkungen auf den Proteingehalt des Winterweizens, wodurch in Zukunft sich auch die Qualitäten in der Produktion ändern könnten, aber auch in diesem Bereich sind noch nicht alle Fragen beantwortet (vgl. HÖGY and FANGMEIER, 2008). Bei Mais sind die Wirkungen des CO<sub>2</sub> Gehaltes zwar schwächer, aber jenen des Weizens sehr ähnlich.

#### **4.9 Veränderung des Bewässerungsaufwands auf Boden 2 bei Mais**

Wie bereits zuvor erwähnt wurde bei den Simulationen auf Boden 2 (nFK= 52,7mm) bei Mais auch die künstliche Bewässerung mitberücksichtigt. Dadurch soll die bei uns ortsübliche Bewirtschaftung bestens nachgebildet und die Basis für gute Simulationsergebnisse gelegt werden. Der Bewässerungszeitpunkt wird dabei automatisch durch das Programm bestimmt, und zwar immer dann, wenn die nutzbare Feldkapazität unter 30 Prozent sinkt, maximal jedoch viermal. Die Berechnungen wurden mit dem CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“ durchgeführt, bei welchem der CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre bis 2050 steigt. In Abbildung 36 kann man deutlich erkennen, dass sich dieser Bewässerungsumfang im Laufe der Zeit je nach Szenario unterschiedlich entwickelt. Während sich der Bewässerungsaufwand im Szenario HadGEM kaum verändert, kommt es im Szenario BNU zu deutlicher Reduktion. Auffällig dabei ist, dass im gleichen Zeitraum die natürlichen Niederschlagsmengen in beiden Szenarien im Gleichschritt sinken. Der Niederschlagsrückgang vom Referenzzeitraum zu den Jahren 2021 bis 2050 beträgt dabei durchschnittlich 67 bis 68mm. Trotzdem kommt es nicht nur auf die Niederschlagsmenge an, denn besonders eine gute Niederschlagsverteilung ist wichtig für gute und stabile Erträge. Wie bereits erwähnt, kommt es in den Szenarien zu unterschiedlichen Änderungen der Niederschlagsverteilung des Referenzzeitraumes. Während im Szenario BNU der mengenmäßige Niederschlagsrückgang über das Jahr verteilt auftritt, kommt es im Szenario HadGEM zu starken Niederschlagsrückgängen in den Monaten Juli bis September. Der Niederschlagsrückgang im Szenario HadGEM tritt also in einer wichtigen Entwicklungsphase der Kultur Körnermais auf, weshalb hier von keinem sinkenden Bewässerungsaufwand gesprochen werden kann. Die möglichen Auswirkungen beziehungsweise das Ausmaß an Einfluss einer guten oder schlechten

Niederschlagsverteilung kann in einem generellen Ertragsvergleich der beiden Szenarien beobachtet werden. An dieser Tatsache eines unverändert notwendigen Bewässerungsaufwandes im Szenario HadGEM ändert auch die sinkende Verdunstung, laut Abbildung 35, nichts. Demnach kommt es im Durchschnitt des Vergleichs zu einer um 26 mm verringerten Verdunstung im Szenario BNU, und einer etwas schwächeren Reduktion im Szenario HadGEM. Diese Verringerung der Verdunstung basiert vermutlich auf die verbesserte Wassernutzungseffizienz der Kulturpflanzen, die ein steigender CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre mit sich bringt. In Versuchen konnte dadurch eine Wassereinsparung von fünf Prozent über die Vegetationsdauer festgestellt werden (vgl. WEIGEL et al., 2014). In unserer Region bei einer durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge von ungefähr 550mm/Jahr, würde dies also nahezu exakt die 26mm ausmachen. Unter Gesamtbetrachtung der genannten Änderungen würden die Erträge auf Boden 2 bei Mais im Szenario BNU gehalten werden können, wogegen sie im Szenario HadGEM um durchschnittlich vier Prozent sinken würden. Daraus kann man schlussfolgern, dass durch die negative Niederschlagsverteilungsentwicklung im Szenario HadGEM die Erträge bei gleichbleibenden Bewässerungsaufwand nicht gehalten werden können. Dazu kommt, dass in den kommenden Dekaden häufiger mit Extremjahren zu rechnen ist, weshalb in manchen Jahren keine Bewässerung und in anderen Jahren eine Bewässerung über das bisherige Höchstmaß des Bewässerungsaufwandes nötig sein wird. Diese Entwicklung kann auch durch die Bewässerungsaufzeichnungen des Elternbetriebes bestätigt werden.



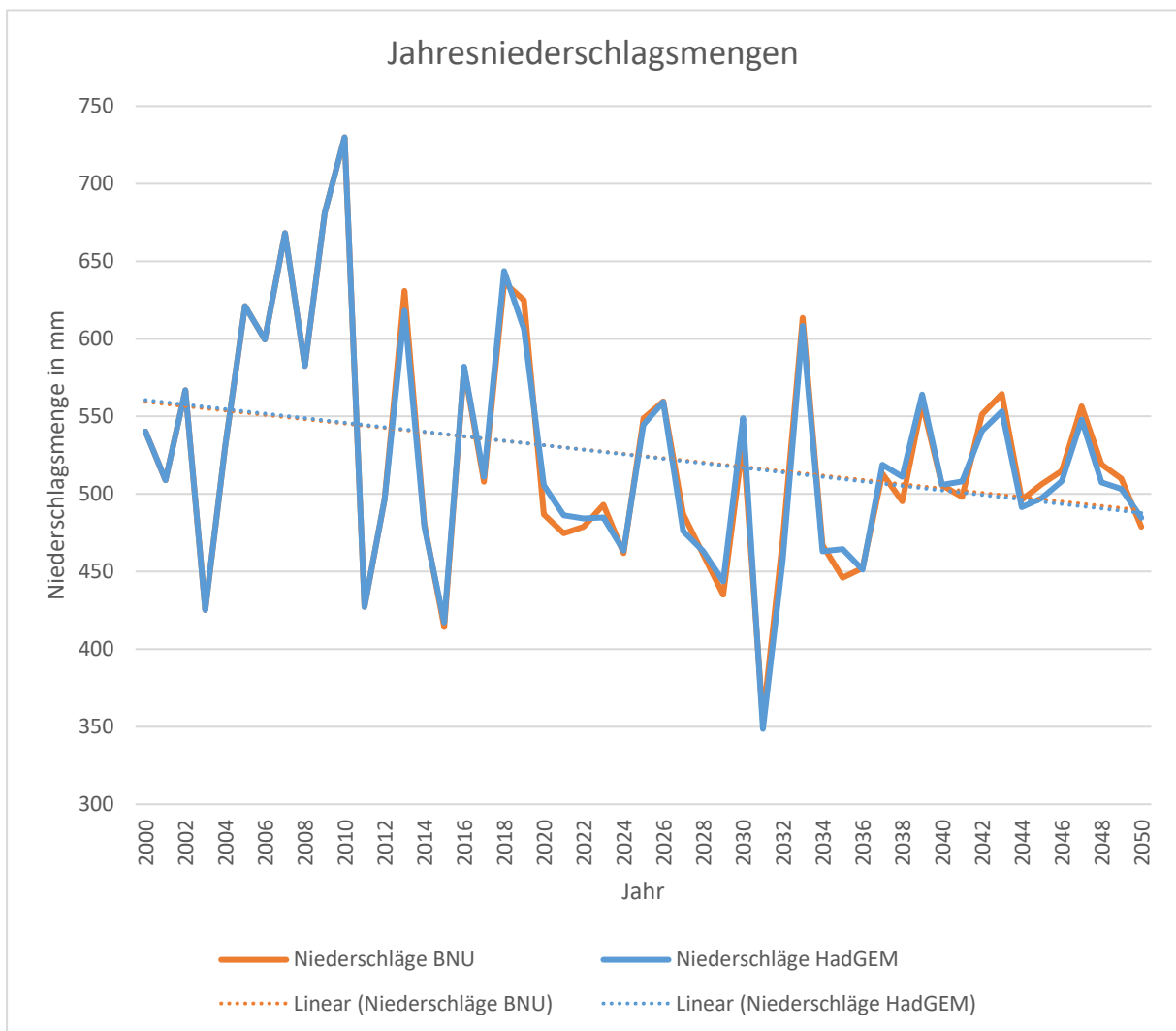


Abbildung 34: Jahresniederschlagsentwicklung von 2000-2050 nach den Szenarien BNU und HadGEM inklusive Trendlinien

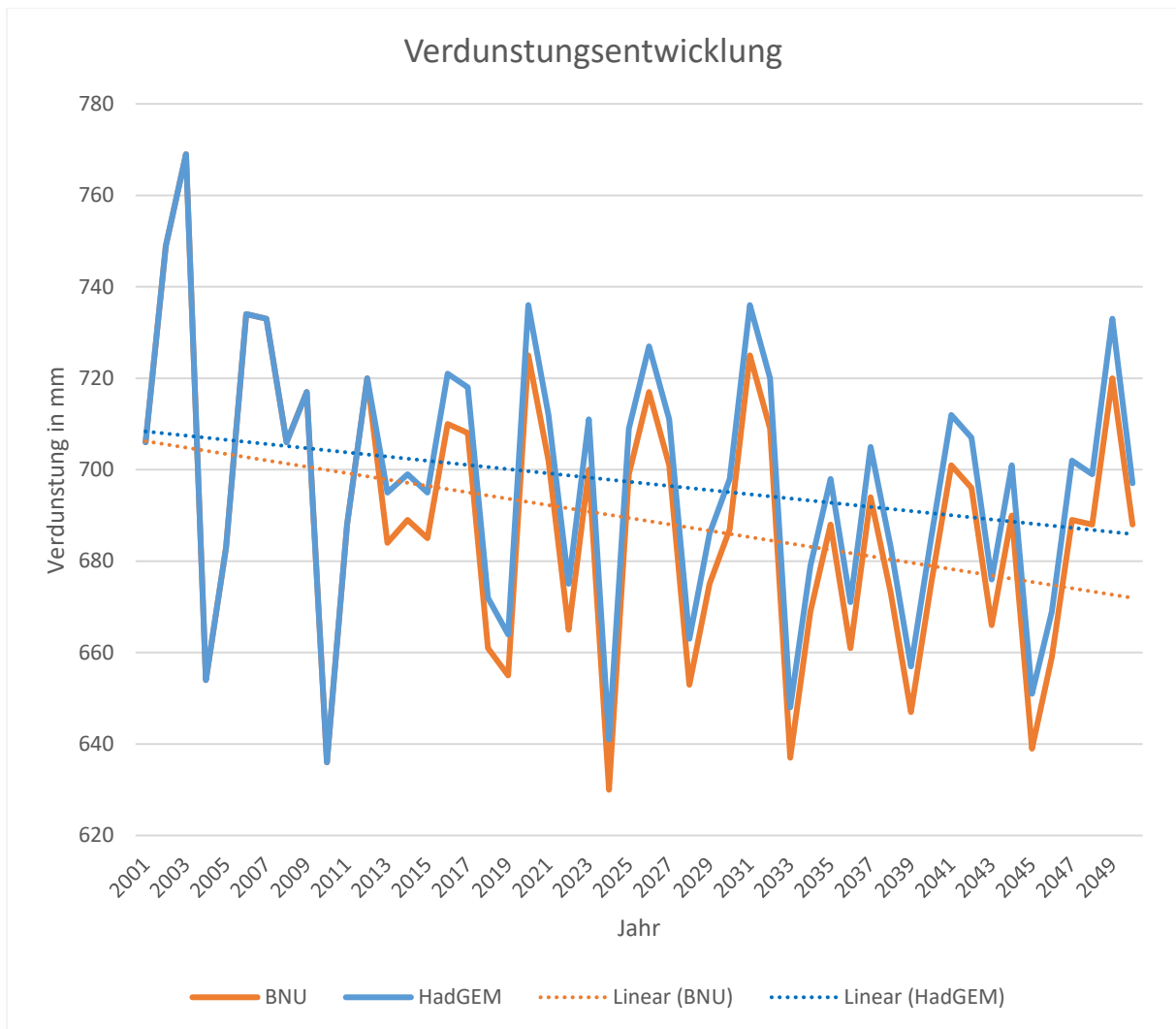


Abbildung 35: Entwicklung der Jahresverdunstung von 2001-2050 nach den Szenarien BNU und HadGEM inklusive Trendlinien

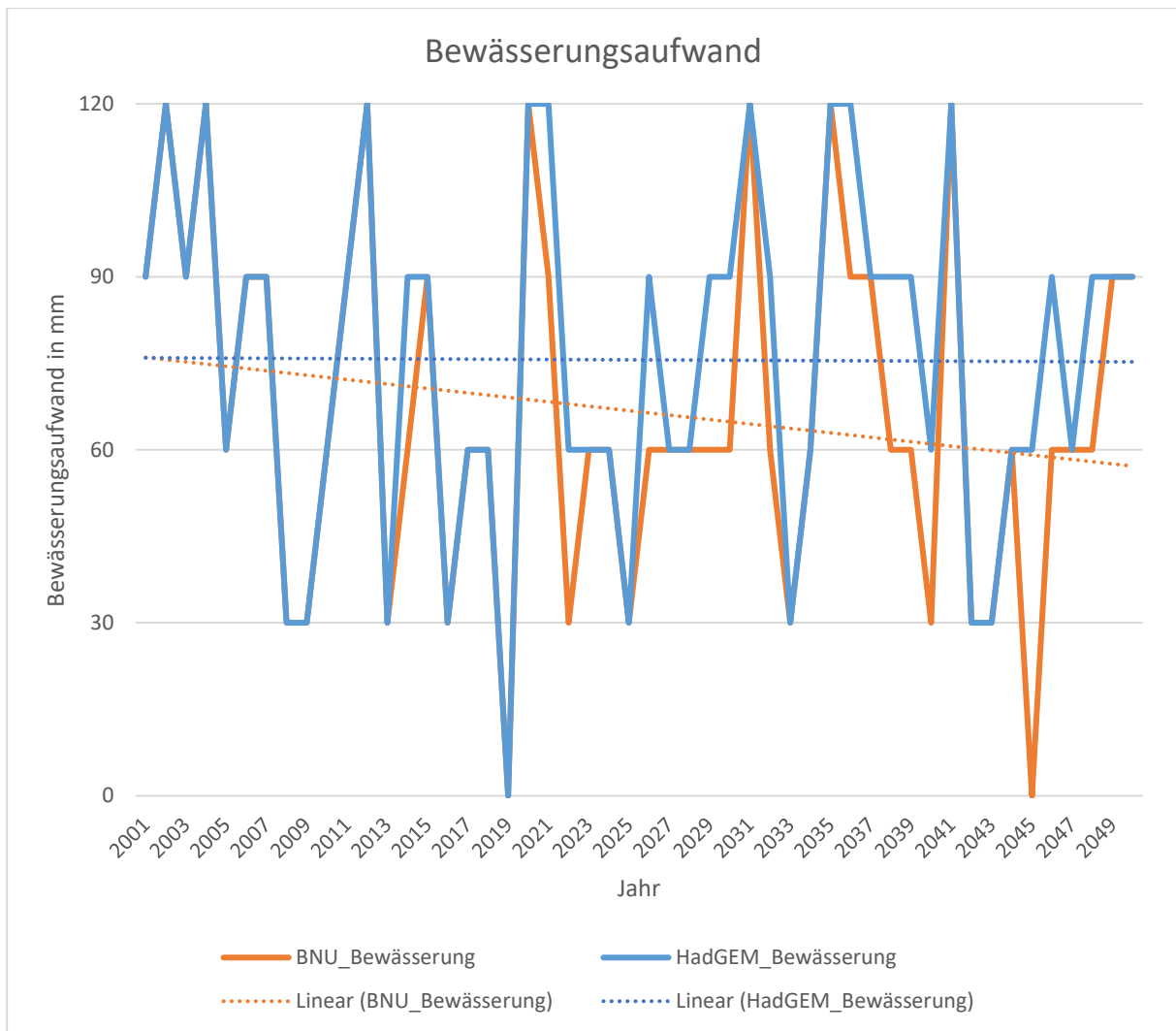


Abbildung 36: Entwicklung des Bewässerungsaufwands von 2001-2050 nach den Szenarien BNU und HadGEM auf Boden 2 (nFK= 52,7mm) bei Mais (inklusive Trendlinien und unter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub> Düngereffekts, durch Berechnung mit den CO<sub>2</sub> File „Klimaziel“)

## 5 Diskussion

Verändert sich das Klima, so ändern sich auch die Gegebenheiten für Wachstum und Entwicklung der Pflanzen. Positive aber auch negative Einflüsse auf Ertragshöhe, Ertragsstabilität und Ertragsqualität können dabei die Folge sein.

Die Einflüsse sich ändernder Klimabedingungen auf die Erträge der Kulturpflanzen Körnermais und Winterweizen werden unter anderem im Ergebnisteil dieser Arbeit intensiv dargestellt. Wie man aus diesem entnehmen kann, kommt es je nach Kultur, Standortbonität und der eintreffenden Klimabedingungen (Szenarien) zu unterschiedlichsten Ergebnissen. Vor allem die großen Unterschiede in den Simulationsergebnissen zwischen den Szenarien BNU und HadGEM unterschiedlicher Klimamodelle, bei sonst gleichen Bedingungen, fielen dabei ins Auge. Gerade deshalb, weil die Szenarien auf den ersten Blick sehr ähnlich wirken, beide aus den RCP 4.5 Pool, bei beiden kommt es zu einem durchschnittlichen Niederschlagsrückgang von ungefähr 67 bis 68 mm/Jahr und die Temperaturerhöhung ist bei beiden eher niedrig. Im Detail beträgt die durchschnittliche Temperaturerhöhung im Szenario BNU 0,62°C und im Szenario HadGEM 1,05°C. Eine eher niedrig angenommene Temperaturerhöhung in Bezug auf die Schätzungen zahlreicher Wissenschaftler, welche eine Temperaturerhöhung von nahezu 2°C bis zum Jahr 2050 (vgl. EITZINGER et al., 2012) und eine Temperatursteigerung von drei bis fünf Prozent bis zum Jahr 2100 prognostizieren (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Ein genauere Vergleich der beiden Szenarien schaffte jedoch Klarheit. Die beiden Szenarien unterscheiden sich demnach eklatant in ihrer Niederschlagsverteilung, welche als Grund für die stark unterschiedlichen Ergebnisse angenommen werden kann.

So führt die in Szenario HadGEM angenommene Sommerniederschlagsreduktion (Juli bis September) bei Körnermais zu erhöhtem Wassermangel und dadurch zu verringerter Biomasseproduktion, beziehungsweise Ertragseinbußen, während andere Kulturpflanzen wie der Winterweizen zu dieser Zeit schon geerntet und dadurch nicht unmittelbar betroffen sind (vgl. CHMIELEWSKI, 2007).

Des Weiteren kann unter dem Verhältnis des Wasserdefizits, das durch erhöhte Einstrahlung und den erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre resultierende verbesserte Wachstumspotential für C<sub>3</sub> Pflanzen, durch den Körnermais als C<sub>4</sub> Pflanze kaum genutzt werden (vgl. EITZINGER et al., 2012). Aufgrund dieser

Tatsachen kann auf Standorten mit geringer Wasserspeicherfähigkeit (Boden 2; nFK= 52,7mm) auch von sinkenden Erträgen ausgegangen werden, während man auf Standorten mit ausreichender Wasserspeicherfähigkeit (Boden 1; nFK= 133,7mm), in Bezug auf die verbesserten Wachstumsbedingungen hinsichtlich der höheren Temperaturbedürfnisse bei Körnermais, gleichbleibende bis leicht steigende Erträge in Mitteleuropa erwartet (vgl. EITZINGER et al., 2012). Dies bestätigen auch die Simulationsergebnisse dieser Masterarbeit. In wärmeren und sommertrockenen Anbaugebieten, wie zum Beispiel in Kroatien, erwarten Wissenschaftler hingegen ohne gezielte Anpassungsmaßnahmen einen generellen Ertragsrückgang bei Körnermais, unabhängig von der Bonität der Ackerflächen (vgl. VUCETIC, 2011). Anhand dieses Beispiels kann die Bedeutung der Sommerniederschläge und generell einer guten Niederschlagsverteilung erkannt werden. Jedenfalls konnten in den Simulationen die dieser Arbeit zugrunde liegen, mit ausgewählten Anpassungsstrategien, gleichbleibende bis minimal steigende Erträge auf Standorten mit geringer Wasserspeicherfähigkeit erzielt werden.

Bei einem Vergleich der nutzbaren Feldkapazitäten von Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm) mit den durchschnittlichen Erträgen der Referenzperiode 2001 bis 2012 und der Simulationsperiode von 2021 bis 2050, kann die unterschiedliche Ertragsentwicklung in Bezug auf den Ertragsunterschied zwischen guten (Boden 1) und schlechteren (Boden 2) Standort veranschaulicht werden. Demnach beträgt der Unterschied in der nutzbaren Feldkapazität zwischen den beiden Böden 81mm, wobei der Boden 2 selbst nur eine nutzbare Feldkapazität von 52,7mm aufweist. Während hier der (dadurch) resultierende Ertragsunterschied zwischen den beiden Böden in der Referenzperiode noch um die vier Prozent bei der Kultur Körnermais ausmachte, stieg dieser je nach Szenario auf acht bis zehn Prozent in der Simulationsperiode an. Die Bewässerung bei Körnermais auf schlechten Standorten darf hier natürlich nicht unberücksichtigt bleiben. Würde diese nicht stattfinden, wäre der prozentuelle Anfangs-Ertragsunterschied zwischen Boden 1 und Boden 2 deutlich größer. Anhand dieser Simulationsergebnisse kann man aufgrund von unterschiedlicher Bodenbonität und Wasserspeicherfähigkeit von steigenden Ertragsunterschieden in den nächsten Dekaden ausgehen. Dieser steigende Ertragsunterschied konnte auch bei Winterweizen festgestellt werden, wobei er hier im gleichen Ausmaß, nämlich um sechs bis zehn Prozent zwischen Referenz- und

Simulationsperiode gestiegen ist. Der prozentuelle Anfangs-Ertragsunterschied zwischen Boden 1 und Boden 2 beträgt bei Winterweizen jedoch mehr als siebenzig Prozent in der Referenzperiode, nachdem hier keine Bewässerung auf Boden 2 stattgefunden hat. Nachdem dies aber keine Forschungsfrage und damit kein Hauptpunkt der Masterarbeit war, möchte ich hierzu auch keine weiteren Erläuterungen machen.

Ein größerer Ertragsanstieg durch die Anpassungsstrategie „Mulch- Schicht“, von dem in der Literatur immer wieder geschrieben wird, blieb hingegen bei der Kultur Körnermais aus. Bei der Kultur Winterweizen war der Effekt der Anpassungsstrategie „Mulch-Schicht“ wiederum in einem Ausmaß, von dem auch in der zugrundeliegenden Literatur die Rede ist. Laut dieser ist eine Ertragssteigerung bei Winterweizen durch eine Mulch- Schicht von bis zu zehn Prozent, auf schlechteren Standorten sogar über zehn Prozent, möglich (vgl. EITZINGER et al., 2012). Die höhere Ertragssteigerung auf schlechteren Standorten, wie in unserem Fall auf Boden 2 (nFK= 52,7mm), lässt sich dabei auf die geringere Wasserspeicherfähigkeit der Böden zurückführen. Hier bewirken die Anpassungsstrategien eine relativ (Verhältnis zwischen Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und der Wassereinsparung durch die Anpassungsstrategie) höhere Einsparung im Wasserhaushalt der Pflanze und vor allem des Bodens als gegenüber einem Boden mit mittlerer bis guter Wasserspeicherfähigkeit. In anderen Worten heißt das auch, dass dadurch der Wasserstress, den die Pflanze auf schlechten Standorten (Boden 2) schneller, leichter und länger ausgesetzt sind, effektiv besser entgegengewirkt werden kann als das beispielsweise auf Standorten mit mittlerer bis guter Wasserspeicherfähigkeit (Boden 1) der Fall ist.

Den Simulationsergebnissen dieser Arbeit zufolge wäre also der Mulch-Effekt unter den beiden Klimaszenarien in unserem Klimagebiet bei Winterweizen höher als bei Körnermais, vor allem wegen des stärker angenommenen CO<sub>2</sub> Düngeeffekts bei Winterweizen und deren Wechselwirkungen. Dieses Ergebnis weicht jedoch von Studien aus anderen Klimaregionen ab, so wurden beispielsweise genau gegenteilige Effekte bei Versuchen in China festgestellt (vgl. QIN et al., 2015). Die Erkenntnis, dass der Mulch- Effekt bei Körnermais größer als bei Winterweizen ist, wird in der Arbeit mit der geringeren Pflanzendichte von Körnermais pro Hektar, der längeren Vegetationsdauer und der hohen Sommertemperaturen in Verbindung mit einer hohen

Evaporation begründet. (vgl. QIN et al., 2015). Hier muss jedoch unbedingt berücksichtigt werden, dass in diesem Versuch die CO<sub>2</sub> Wirkung ausgeklammert wurde und China generell einem anderen Klima mit anderen saisonalen Temperaturen und Niederschlagsverteilung unterliegt. In Bezug auf die Forschungsfragen können die Erträge bei Körnermais durch gezielte Anpassungsstrategien und den darin enthaltenen CO<sub>2</sub>- Effekt zumindest gehalten werden.

Der CO<sub>2</sub>- Effekt bei Körnermais ist dabei nur halb so stark wie bei Winterweizen und konnte den Ertrag um maximal drei Prozent steigern (vgl. CHMIELEWSKI, 2007). Während der CO<sub>2</sub> Düngeeffekt unabhängig des Bodens bei Winterweizen annähernd konstante Ertragssteigerungen bewirkte, schwankte er bei Körnermais auf Boden 2. Hier wurden leicht höhere Ertragssteigerungen als auf Boden 1 durch den CO<sub>2</sub> Düngeeffekt simuliert. Ohne Anpassungsstrategie würde es bei Körnermaispflanzen die nicht auf den erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre mit einer verbesserten Wassernutzungseffizienz reagieren, laut Simulationsergebnissen, in drei von vier Fällen zu sinkenden Erträgen kommen. Bei Winterweizen ist die Situation laut Simulationsergebnissen genau kontrovers zu dessen des Körnermaises. Hier könnten die Erträge in drei von vier Fällen, ohne jegliche Gegenmaßnahmen und auch ohne Berücksichtigung des steigenden CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre gesteigert werden. Vor allem der Ertragsanstieg im Szenario HadGEM ist mit vier bis nahezu acht Prozent sehr hoch und bedarf daher einer Erklärung.

Grundsätzlich würde dieses Ergebnis für verbesserte Wachstumsbedingungen in den kommenden Dekaden sprechen, jedoch muss hier erwähnt werden, dass die Simulationen jeweils nur die Wetterverhältnisse im Vegetationszeitraum berücksichtigen und nicht die sogenannten „off-Season“ Bedingungen. Dies wäre in diesem Fall aber notwendig gewesen, denn gerade in diesem „off-Season“ Zeitraum kommt es zu den gravierendsten Änderungen der Wetterverhältnisse in den Szenarien. In diesem Zeitraum kommt es nämlich zu den stärksten Niederschlagsrückgängen und zu den höchsten Temperaturanstiegen, was sich vor allem auf die Feldkapazität bei Anbau des Winterweizens und damit auf die gesamte Entwicklung der Pflanzen auswirken würde. Außerdem soll hier nochmals erwähnt sein, dass es sich um zwei Szenarien des RCP 4.5 Pools handelt, also um Szenarien die Klimaveränderungen (Temperatur- und Niederschlagsveränderungen, sowie sich

ändernde CO<sub>2</sub> Gehalte in der Atmosphäre) beinhalten, die nach Meinung der Wissenschaft mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mindestens eintreten werden (vgl. APCC, 2014).

Nachdem Winterweizen zu den C3 Pflanzen gezählt wird, ist auch dessen Reaktion auf einen erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre zu berücksichtigen. Dabei können steigende CO<sub>2</sub> Gehälter in der Atmosphäre bei optimaler Licht-, Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen bei Weizen eine Ertragssteigerung von bis zu zehn Prozent bewirken (vgl. THALER et al., 2012). In den Simulationsergebnissen die dieser Arbeit zugrunde liegen betrug die maximale Ertragssteigerung durch einen erhöhten CO<sub>2</sub> Gehalt in der Atmosphäre sechs bis sieben Prozent. Die Ertragssteigerung ist hier die Folge einer effizienter ablaufenden Photosynthese und einer verbesserten Wassernutzungseffizienz (vgl. BERRY and DOWNTON, 1982). Wobei man bei Körnermais als C4 Pflanze generell nur von einer verbesserten Wassernutzungseffizienz, beziehungsweise einer höheren Wasserstressresistenz und nicht von verbesserten Wachstumsbedingungen ausgeht, wodurch die ertragssteigernden Effekte eines erhöhten CO<sub>2</sub> Gehaltes in der Atmosphäre vor allem auf Standorten wirksam werden können, die von geringer Wasserspeicherkapazität geprägt sind (Boden 2; nFK= 52,7mm) (vgl. WEIGEL et al., 2014). (siehe Abbildung 33)

Die Anpassungsstrategien konnten wie bei Körnermais ihre Zwecke erfüllen und führten im Falle des Winterweizens zu weiteren Ertragssteigerungen im Vergleich zum durchschnittlichen Ausgangsertrag des Referenzzeitraumes. Demnach konnten die Erträge um bis zu 16 Prozent im Vergleich zum Referenzzeitraum mit der Anpassungsstrategie „Mulch-Schicht“ und bis zu 11,7 Prozent mit der „Hecke als Windschutz“ gesteigert werden. Nachdem aber beide Szenarien in drei von vier Fällen ein generell verbessertes Wachstumspotential bewirken, kann auf Boden 1 von einem „reinen“ Mulch-Effekt von drei bis fünf und auf Boden 2 von 10 bis 13 Prozent gesprochen werden. Demnach ist der Mulch-Effekt laut Simulationsergebnissen auf Standorten mit geringer Wasserhaltekapazität bei Winterweizen nahezu doppelt so hoch wie auf Standorten mit mittlerer bis hoher Wasserhaltekapazität. Dieses Ergebnis wurde auch in den in der Literatur vorhandenen Versuchen erzielt (vgl. EITZINGER et al., 2012). Hauptgründe dafür sind die verbesserte Wasserversorgung der Pflanzen



und ein verringerter unproduktiver Wasserverlust durch Evaporation, der auf Standorten mit geringer Wasserspeicherfähigkeit relativ stärker wirksam wird (vgl. EITZINGER et al., 2012). Die negativen Auswirkungen einer Mulch-Schicht, welche von einer langsameren Bodenerwärmung, langsameren Jugendentwicklung der Pflanzen bis zu einem verringerten Aufgang der Pflanzen reichen, werden durch das Aqua Crop Modell nicht berücksichtigt. Dieses umfasst um die einfache Handhabbarkeit des Modells zu gewährleisten, nur die Wasserkomponente des Bodens und die Temperatur-, Strahlungs- und Windverhältnisse oberhalb des Erdbodens. Nach den Wissenschaftlern Qin, Hu und Oenema, welche die Ergebnisse von 1310 Ertragsbeobachtungen aus 74 Studien und 19 verschiedenen Ländern zusammengetragen haben, kann der Mulch-Effekt bei Weizen eine Ertragssteigerung von bis zu 20 Prozent bewirken (vgl. QIN et al., 2015).

Die „reinen“ ertragssteigernden Effekte der Hecke als Windschutz, unter Berücksichtigung der verbesserten Wachstumsbedingungen aufgrund der beiden Szenarien, lassen sich mit zwei bis fünf Prozent beziffern. Auch hier kommt es nur zur Berücksichtigung der verringerten Evaporation im Bestand durch das Aqua Crop Modell, Nebeneffekte wie die Schneeakkumulation, die Licht-, Wasser- und Nährstoffkonkurrenz der Hecke mit den Pflanzen in ihrer unmittelbaren Nähe und der erhöhte Krankheitsdruck bleiben hier unberücksichtigt. Ähnliche ertragssteigernde Effekte einer Hecke konnten auch durch die Wissenschaftler Thaler, Eitzinger, Trnka und Dubrovsky nachgewiesen werden. Diese kamen in ihrem Versuch zu einer ertragssteigernden Wirkung von bis zu vier Prozent (vgl. THALER et al., 2012).

Neben diesen ertragssteigernden Effekten der Anpassungsstrategien konnten jedoch noch weitere positive Eigenschaften dieser durch die Simulationsergebnisse festgestellt werden. Die Variabilität der Erträge würde nämlich laut Simulationsergebnissen sowohl bei Winterweizen als auch bei Körnermais bis zum Jahr 2050 steigen. Grund dafür sind vor allem die mit dem Klimawandel einhergehenden und vermehrt zu erwarteten Wetterkapriolen begleitet von unterschiedlichen Extremereignissen. Zahlreiche auf den geografischen Raum Europa bezogene Studien haben sich mit dieser Thematik bereits beschäftigt und sind sich in der Angelegenheit einig, die Variabilität der Erträge und damit das wirtschaftliche Risiko der Landwirte wird zunehmen (vgl. HLAVINKA et al., 2009). Nicht umsonst

bemüht sich die Politik in den letzten Jahren weltweit vermehrt um eine quasi Rundumversicherung in der Landwirtschaft, die neben Hagel und Dürre eine Vielzahl weiterer Wetterextreme abdecken soll. Jedenfalls konnte durch die simulierten Anpassungsstrategien genau diese zu erwartende, steigende Variabilität geschmälert werden. Besonders gut gelang dies bei der Kultur Winterweizen, wobei dies unter anderem auf die generell höhere Wirkung der Anpassungsstrategien zurückzuführen ist. Die Variabilität wird dabei laut Literatur vor allem auf Böden mit geringen Wasserspeicherkapazitäten (Boden 2;  $n_{FK} = 52,7\text{mm}$ ) zunehmen (zum Beispiel auf sandigen Lehmen) (vgl. EITZINGER et al., 2012). In diesem Fall stimmen Literatur und die Simulationsergebnisse dieser Masterarbeit überein, denn auch hier konnte die höchste Variabilität auf Boden 2 erfasst werden. Grund für die stärker steigende Variabilität auf schlechteren Standorten könnte auch hier die geringere Wasserspeicherfähigkeit sein, denn je höher diese Wasserspeicherfähigkeit der Böden ist, desto eher können Wetterextreme wie Hitzeperioden überstanden werden.

Nachdem das Aqua Crop Modell im Grunde genommen relativ wenig Eingabeparameter benötigt und viele Werte schon vorgegeben sind, beziehungsweise die vorgegebenen Werte anhand von zur Verfügung gestellten Tabellen leicht auf die jeweiligen Verhältnisse abgeändert werden können, kann das Modell als leicht und einfach aufgebaut bezeichnet werden. Es ist daher schnell zu erlernen und definitiv für praktische Anwender zugänglich. Trotz dieses einfachen Aufbaues können aber auch wissenschaftliche Untersuchungen in etwas vereinfachter Form gut mit dem Programm durchgeführt werden. Darauf lassen unter anderem die oftmals übereinstimmenden Simulationsergebnisse dieser Arbeit mit den Ergebnissen anderen wissenschaftlicher Publikationen schließen. Es darf jedoch nicht darauf vergessen werden, dass die Hauptaufgabe des Modells ist, die Wasserabhängigkeit von Erträgen in verschiedenen Kulturen zu berechnen, weshalb es vor allem in Regionen eingesetzt wird, in denen Wasser als limitierender Faktor auf die Erträge der Kulturpflanzen wirkt und eine Vielzahl von Nebenwirkungen deshalb unberücksichtigt lässt (vgl. FAO, s.a.) Zusammenfassend kann zu dem Aqua Crop Modell also folgendes gesagt werden: Auch, wenn es nicht alle Einflüsse in ihrer Gesamtheit samt Wechselbeziehungen berücksichtigt, lassen sich gute Simulationsergebnisse mit dem Modell erzielen.

## 6 Abkürzungsverzeichnis

AGES	Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
BIO	biologische Wirtschaftsweise
BMLFUW	Bundesministerium für Land- Forst- Umwelt- und Wasserwirtschaft
BOKU	Bodenkultur
Düngee.	Düngeeffekt
Eds	Editor
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nation
FC	Feldkapazität
ha	Hektar
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
KG	Katastralgemeinde
lt	Liter
m	Meter
mm	Millimeter
nFK	nutzbare Feldkapazität
NGO	Non Governmental Organization (Nicht- Regierungsorganisation)
NS	Niederschlag
PWP	permanente Welkepunkt
RCP	Representative Concentration Pathways
RMSE	root mean square error
SAT	Saturation (Sättigung)
SRES	Special Report on Emissions Scenarios

TAW	Total available soil water (pflanzenverfügbares Wasser)
Temp	Temperatur
vgl.	vergleiche
vol %	Volumprozent
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

## 7 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Jährliche Durchschnittstemperatur [ °C], AUER et al., (2001) .....	11
Abbildung 2: Mittlerer jährlicher Niederschlag [mm / Jahr], AUER et al., (2001).....	12
Abbildung 3: Weizenanbaufläche inklusive Dinkel in Prozent an der Ackerfläche (Quelle: Statistik Austria) .....	13
Abbildung 4: Körnermaisbaufläche inklusive CornCobMix in Prozent an der Ackerfläche (Quelle: Statistik Austria) .....	15
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Effektes steigender CO <sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre auf die Photosynthese und Transpiration. Die Transpiration reagiert bei C <sub>3</sub> und C <sub>4</sub> Pflanzen in gleicher Weise auf eine CO <sub>2</sub> Erhöhung (vgl. WEIGEL et al., s.a) .....	20
Abbildung 6: Geografische Lage des Versuchsstandortes (Quelle: <a href="http://www.austrianinformation.org">www.austrianinformation.org</a> ) .....	23
Abbildung 7: Lage der Versuchsflächen in der KG Deutsch Jahrdorf (Quelle: <a href="http://www.ebod.at">www.ebod.at</a> ).....	24
Abbildung 8: Eingaben zur Horizontierung und dem Bodenwassergehalt für Boden 2 (Hardacker).....	24
Abbildung 9: Eingaben zur Horizontierung und dem Bodenwassergehalt für Boden 1 (Söldneracker) .....	25
Abbildung 10: Bodenprofil von Boden 2 (Quelle: <a href="http://www.ebod.at">www.ebod.at</a> ) .....	26
Abbildung 11: durchschnittliche Monatsniederschläge 2001-2012 bei einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 567mm (Quelle: Eigene Darstellung) ...	27
Abbildung 12: durchschnittliche Monatstemperatur 2001-2012 bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 11,60°C (Quelle: Eigene Darstellung) .....	28
Abbildung 13: Vergleich der Monatsmitteltemperatur des Referenzzeitraumes 2001-2012 mit den beiden Szenarien 2021-2050 (Quelle: Eigene Auswertung) .....	30
Abbildung 14: Vergleich der Monatsmittelniederschläge des Referenzzeitraumes 2001-2012 mit den beiden Szenarien 2021-2050 (Quelle: Eigene Auswertung) .....	31
Abbildung 15: Klimaschutzwirkung einer Landschaftsstruktur (Quelle: Frielinghaus et al, 1997...Poster EitzingerUnterlagen) .....	36

Abbildung 16: Eine FlowChart der Software AquaCrop welche die Hauptbeziehungen zwischen Boden-Pflanze und Atmosphäre zeigt (vgl. RAES et al., 2009) .....	39
Abbildung 17: Hauptmenü des Aqua-Crop Modells (Quelle: Aqua-Crop).....	40
Abbildung 18: Inputdateien welche die Umwelt in der die Pflanze wächst definieren (vgl. STEDUTO et al., 2009).....	40
Abbildung 19: Übersicht zu den CO2 Files und deren Entwicklung (Quelle: Eigene Auswertung) .....	42
Abbildung 20: Kalibrierungsergebnis auf Boden 1 bei Winterweichweizen .....	44
Abbildung 21: Kalibrierungsergebnis auf Boden 2 bei Winterweichweizen .....	44
Abbildung 22: Kalibrierungsergebnis auf Boden 1 bei Körnermais.....	45
Abbildung 23: Kalibrierungsergebnis auf Boden 2 bei Körnermais.....	45
Abbildung 24: Ertragsabschätzung bei Winterweichweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm) ohne Anpassungsstrategie. (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben) .....	47
Abbildung 25: Absoluterträge des Referenzzeitraumes 2001-2012 differenziert nach Kulturart und Boden. Die Absoluterträge für Körnermais und Winterweizen gelten ich gleicher Weise für alle weiteren Abbildungen die mit dem CO2 File „Klimaziel“ berechnet worden sind. ....	48
Abbildung 26: Ertragsabschätzung bei Winterweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm), mit flächendeckender Mulch-Schicht (100 Prozent Bodenbedeckung) als Anpassungsstrategie unter Berücksichtigung des CO2 Düngeeffektes (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben) .....	50
Abbildung 27: Ertragsabschätzung bei Winterweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden2 (nFK= 52,7mm), mit Hecke als Anpassungsstrategie (30 Prozent Windreduktion) In den in der Abbildung enthaltenen Simulationen ist der CO2 Düngeeffekt laut CO2 File „Klimaziel“ wie bei der Mulch-Schicht Strategie enthalten. (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben) .....	53
Abbildung 28: Die Wirkung einer Hecke als Windschutz auf die Verdunstung am Feld in beiden Szenarien (durchschnittliche Windreduktion von 30 Prozent durch die Hecke) .....	54

Abbildung 29: Vergleich der beiden Anpassungsstrategien bei Winterweizen und Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm). In den in der Abbildung enthaltenen Simulationen ist der CO <sub>2</sub> Düngeeffekt laut CO <sub>2</sub> File „Klimaziel“ enthalten (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)	55
Abbildung 30: Vergleich der Anpassungsstrategien bei Winterweizen auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm), mit und ohne Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> Düngeeffekts nach dem CO <sub>2</sub> File „Klimaziel“, wodurch der „reine“ Mulch- und Heckeneffekt bestimmt werden kann.....	57
Abbildung 31: Vergleich der Anpassungsstrategien bei Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm), mit und ohne Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> Düngeeffekts, wodurch der „reine“ Mulch- und Heckeneffekt bestimmt werden kann.	58
Abbildung 32: Auswirkungen eines sich ändernden CO <sub>2</sub> Gehaltes auf die Ertragsabschätzung 2021-2050 bei einer Klimaveränderung nach den Szenarien BNU und HadGEM bei Winterweizen auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm). (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben.	60
Abbildung 33: Auswirkungen eines sich ändernden CO <sub>2</sub> Gehaltes auf die Ertragsabschätzung 2021-2050 bei einer Klimaveränderung nach den Szenarien BNU und HadGEM bei Körnermais auf Boden 1 (nFK= 133,7mm) und Boden 2 (nFK= 52,7mm). (Die Balken des Bodens 2 sind von einem schwarzen Rahmen umgeben)	61
Abbildung 34: Jahresniederschlagsentwicklung von 2000-2050 nach den Szenarien BNU und HadGEM inklusive Trendlinien.....	65
Abbildung 35: Entwicklung der Jahresverdunstung von 2001-2050 nach den Szenarien BNU und HadGEM inklusive Trendlinien.....	66
Abbildung 36: Entwicklung des Bewässerungsaufwands von 2001-2050 nach den Szenarien BNU und HadGEM auf Boden 2 (nFK= 52,7mm) bei Mais (inklusive Trendlinien und unter Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> Düngeeffekts, durch Berechnung mit den CO <sub>2</sub> File „Klimaziel“).	67
Abbildung 37: Gesamtübersicht über die Simulationsergebnisse bei Winterweizen.	88
Abbildung 38: Gesamtübersicht über die Simulationsergebnisse bei Körnermais....	89

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Horizontierung des Boden 2 (Quelle: <a href="http://www.ebod.at">www.ebod.at</a> ) .....	26
Tabelle 2: Überblick über die entwickelten RCP-Szenarien (Quelle: <a href="http://www.wiki.bildungsserver.de">www.wiki.bildungsserver.de</a> ) .....	29
Tabelle 3: Sortenbeschreibung der Sorte Capo laut AGES beschreibende Sortenliste .....	32



## 9 Literaturverzeichnis

AHRENS, B.; FORMAYER, H.; GOBIET, A.; HEINRICH, G.; HOFSTÄTTER, M.; MATULLA, C.; PREIN, A.F. und TRUHETZ, H. (2014): Zukünftige Klimaentwicklung. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 301–346.

AGGANVAL, P.K. and PENNING de VRIES, F.W.T. (1988): Potential production of wheat in southeast Asia, *Agricultural Systems* 30, 49-69.

WIT, C.T. de; KEULEN, H. van; SELIGMAN, N.G. and SFARIM, I. (1988): Application of interactive multiple goal linear programming to agricultural development. *Agricultural Systems* 26, 211-230.

ALEXANDROV, V.A.; EITZINGER, J.; CAJIC, V. and OBERFORSTER, M. (2002): Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Global Change Biology* 8, 372-389.

APCC (2014): Zusammenfassung für Entscheidungstragende (ZfE). In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

AUER, I.; BÖHM, R.; MOHNL, H.; POTZMANN, R.; SCHÖNER, W. und SKOMOROWSKI, P. (2001): ÖKLIM. Digitaler Klimaatlas Österreichs. Eine interaktive Reise durch die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft des Klimas. Wien: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. CD-ROM, approbierter und publizierter Projektbericht

AUER, I.; FOELSCHE, R.; BÖHM, R.; CHIMANI, B.; HAIMBERGER, L.; KERSCHNER, H.; KOINIG, K.A.; NICOLUSSI, K. und SPÖTL, C. (2014): Vergangene Klimaänderung in Österreich. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 227–300.

BERRY, J.A. and DOWNTON, W.J.S. (1982): Environmental regulation of photosynthesis. In: GOVINDJEE (Ed.): Photosynthesis, Vol II. Academic Press, New York, 263-343.

BMLFUW (2015): Getreideanbau und Getreidearten in Österreich. <https://www.bmlfuw.gv.at/land/produktion-maerkte/pflanzliche-produktion/getreide/Getreide.html> (03.01.2017).

BRENNER, A.J.; JARVIS, P.G. and VAN DEN BELDT, R. (1995): Windbreak- crop interactions in the Sahel. 2. Crop response of millet in shelter. *Agricultural and Forest Meteorology* 75, 235-262.

BREITENEGGER, F. und KLEINERT, W. (1984): Simulationstechnik, Berlin.

CHMIELEWSKI, F.M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: ENDLICHER, W. und GERSTENGARBE, F.W. (Hrsg.): Der Klimawandel- Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Berlin: Humboldt Universität, 75-85.

EITZINGER, J.; STASTNA, M.; ZALUD, Z. and DUBROVSKY, M. (2003): A simulation study the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. *Agricultural Water Management* 61, 195-217.

EITZINGER, J.; FORMAYER, H.; THALER, S.; TRNKA, M.; ZDENEK, Z. and ALEXANDROV, V. (2008): Results and uncertainties of climate change impact research in agricultural crop production in Central Europe. Die Bodenkultur 59, 131-147.

EITZINGER, J.; ORLANDINI, S.; STEFFANSKI, R. and NAYLOR, R.E.L. (2010): Climate change and agriculture: introductory editorial. Journal of Agricultural Science, Cambridge 148, 499-500.

EITZINGER, J.; TRNKA, M.; SEMERADOVA, S.; THALER, S.; SVOBODOVA, E.; HLAVINKA, P.; SISKÁ, B.; TAKAC, J.; MALATINSKA, L.; NOVAKOVA, M.; DUBROVSKY, M. and ZALUD, Z. (2012): Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe- hotspots, regional differences and common trends. The Journal of Agricultural Science, 1-26.

EITZINGER, J.; LAUBE, W.; MURSCH-RADELGRUBER, E. und GERERSDORFER, T. (s.a.): Auswirkungen von Hecken auf angrenzende Ackerflächen.

FAO (s.a.): Software-ETo Calculator. <http://www.fao.org/nr/water/eto.html> (05.01.2017).

FAO (s.a.): Software- Aqua Crop. [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_aquacrop.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_aquacrop.html) (05.01.2017).

FRANKE, W. (1992): Nutzpflanzenkunde. 5., Aufl., Stuttgart: Thieme-Verlag.

FRANKE, G. (Hrsg.): 1994 Nutzpflanzen der Tropen und Subtropen Bd. 3- Spezieller Pflanzenbau. Ulmer Verlag

GOUDRIAAN, J.; LAAR, H.H. van; KEULEN, H. van and LOUWERSE, W. (1984): Simulation of the effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on assimilation and transpiration of a closed crop canopy. *Wissenschaftliche Zeitschrift Humboldt Universität Berlin, Math.-Nat. R.* 33(4), 52-356.

GOUDRIAAN, J. (1987): The biosphere as a driving force in the global carbon cycle. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 35, 177-187.

HAIMBERGER, L.; SEIBERT, P.; HITZENBERGER, R.; STEINER, A. und WEIHS, P. (2014): Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (APPC). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 137-172

HLAVINKA, P.; TRNKA, M.; SEMERADOVA, D.; DUBROVSKY, M.; ZALUD, Z.; and MOZNY, M. (2009): Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 431-442.

HÖGY, P. and FANGMEIER, A. (2008): Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on grain quality of wheat. *J Cereal Sci.* 48, 580-591.

KEULEN, H. van; PENNING de VRIES, F.W.T. and DREES, E.M. (1982): A summary model for crop growth. In: PENNING de VRIES, F.W.T. and LAAR van H.H. (Eds.): *Simulation of plant growth and crop production*. Pudoc, Wageningen: *Simulation Monographs*, 87-97.

KEULEN, H. van. (1982): Crop production under semi-arid conditions, as determined by nitrogen and moisture availability. In: PENNING de VRIES, F.W.T. and LAAR VAN H.H. (Eds.): *Simulation of plant growth and crop production*. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen: 234-249

KEULEN, H. van and De MILLIANO, W.A.J. (1984): Potential wheat yields in Zambia: a simulation approach. *Agricultural Systems* 14, 171-192.

KIMBALL, B. A. (2004): Global Environmental Change: Implications for Agricultural Productivity. *Crop, Environment and Bioinformatics* 1, 251-263.

KÖNIG, M.; LOIBL, W.; STEIGER, R.; ASPÖCK, H.; BEDNAR-FRIEDEL, B.; BRUNNER, K.M.; HAAS, W.; HÖFERL, K.M.; HUTTENLAU, M.; Walchnik, K. und WEISZ, U. (2014): Der Einfluss des Klimawandels auf die Antroposphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 641–704.

LAW, A.M. and KELTON, D. W. (2000): *Simulation Modeling and Analysis*. 3., edition.

LONG, S. P., AINSWORTH, E. A., LEAKEY, A. D. B., NÖSBERGER, J. and ORT, D.R. (2006): Food for thought: Lower-than expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science* 312, 1918-1921.

LÜTKE ENTRUP, N. und OEHMICHEN, J. (2006): *Lehrbuch des Pflanzenbaues- Band 1: Grundlagen*; Bonn: Agro Concept GmbH

OBERFORSTER, M. und WERTEKER, M. (2009): Relative Vorzüglichkeit verschiedener Weizensorten in Abhängigkeit von Ertrag, Qualität und Erzeugerpreisen. In *Werte-Wege Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherheit, Markt und Klimawandel*. Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Zurich, 11-13 Februar 2009. Band 2: Tierhaltung, Agrarpolitik und Betriebswirtschaft, Märkte und Lebensmittel (Eds H. von MAYER, J.; ALFÖLDI, T.; LEIBER, F.; DUBOIS, D.; FRIED, P.; HECKENDORN, F.; HILLMANN, E.; KLOCKE, P.; LÜSCHER, A.; RIEDEL, S.; STOLZE, M.; STRASSER, F.; van der HEIJDEN, M. und WILLER, H.), 302-305.

OSUNBITAN, J.A.; OYDELE, D.J. and ADEKALU, K.O. (2005): Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 82, 57-64.

PELTONEN- SAINIO, P.; JAUHAINEN, L.; TRNKA, M.; OLESEN, J.E.; CALANCA, P.; ECKERSTEN, H.; EITZINGER, J.; GOBIN, A.; KERSEBAUM, K.C.; KOZYRA, J.; KUMAR, S.; DALLA MARTA, A.; MICALE, F.; SCHAAP, B.; SEGUIN, B.; SKJELVAG, A.O. and ORLANDINI, S. (2010): Coincidence of variation in yield and climate in Europe. *Agricultural, Ecosystems and Environment* 139, 483-489.

PENNING de VRIES, F.W.T.; JANSEN, DM.; BERGE, H.F.M. ten and BAKEMA, A. (1989): Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation.

Qin, W.; HU, C. and OENEMA, O. (2015): Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: a meta-analysis. *Sci. Rep.* 5, 1-13.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C. and FERERES, E. (2009): FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; RAES, D. and FERERES E. (2009): Aqua Crop- The FAO crop model to simulate yield response to water: I. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.

STEINKELLNER, S. und KOSCHIER, E. (2016): Parasitologie und Pathologie. s.l.: unveröffentl. Skript.

THALER, S.; EITZINGER, J.; TRNKA, M. and DUBROVSKY, M. (2012): Impacts of climate change and alternative adaption options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science* 150, 537-555.

TUBIELLO, F. N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C. and STOCKLE, C.O. (2000): Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy* 13, 179-189.

VUCETIC, V. (2011): Modelling of maize production in Croatia: present and future climate. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 149, 145-157.

WEIGEL, H. J.; MANDERSCHIED, R. und SCHALLER, M. (s.a.): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Ertrag und Qualität von Getreide. Braunschweig

WEIGEL, H. J.; MANDERSCHIED, R.; FANGMEIER A. und HÖGY, P. (2014): Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. 2. Auflage. Elektron. Veröffent.

WEHRLI, A. und HÄBERLI, W. (1982): *Ackerbau*. 4., Auflage, Zollikofen: Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale.

WIT, C.T. de.; BROUWER, R. and PENNING de VRIES, F.W.T. (1970): The simulation of photosynthetic systems. In: SETLIK, I. (Ed.): *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Proceedings International Biological Program/Plant Production. Technical Meeting Trebon. Pudoc, Wageningen: 40-70

WIT, C.T. de et al. (1978): *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen.

ZADOKS, J.C.; RIJSDIJK, F.H. and RABBINGE, R. (1984): EIPRE, a systems approach to supervised control of pests and diseases in wheat in the Netherlands.

In: CONWAY, G.R. (Ed.): *Pest and pathogen control: Strategy, tactical and policy models*. International series on applied systems analysis. Wiley and Sons, 34-351.

# 10 Anhang

WINTERWEIZEN									
Boden 1									
Beschreibung	Ertrag in kg Absolut	Relativ	Veränderung zu Simulation 2001-2012	Veränderung zu Simulation 2021-2050	Beschreibung	Ertrag in kg Absolut	Relativ	Veränderung zu Simulation 2001-2012	Veränderung zu Simulation 2021-2050
Ertrag_Simulation_2001-2012	5048	100,0			Ertrag_Simulation_2001-2012	2921	100,0		
Ertrag_BNU_2021-2050	5307	105,1	5,1		Ertrag_BNU_2021-2050	2917	99,9	-0,1	
Ertrag_HadGEM_2021-2050	5557	110,1	10,1		Ertrag_HadGEM_2021-2050	3110	106,5	6,5	
Ertrag Mulch ohne CO2 Düngee. 2001-2012	5530	100,0	9,5		Ertrag Mulch ohne CO2 Düngee. 2001-2012	3311	100,0	13,4	
Ertrag_BNU_2021-2050	5577	100,9	10,5	5,3	Ertrag_BNU_2021-2050	3290	99,4	12,6	12,8
Ertrag_HadGEM_2021-2050	5704	103,2	13,0	2,9	Ertrag_HadGEM_2021-2050	3390	102,4	16,1	9,6
Ertrag Hecke ohne CO2 Düngee. 2001-2012	5458	100,0	8,1		Ertrag Hecke ohne CO2 Düngee. 2001-2012	3181	100,0	8,9	
Ertrag_BNU_2021-2050	5495	100,7	8,9	3,7	Ertrag_BNU_2021-2050	3057	96,1	4,7	4,8
Ertrag_HadGEM_2021-2050	5698	103,3	11,7	1,6	Ertrag_HadGEM_2021-2050	3247	102,1	11,2	4,7
Ertrag Mulch inkl. CO2 2001-2012	5330	100,0	5,6		Ertrag Mulch 2001-2012	3441	100,0	17,8	
Ertrag_BNU_2021-2050	5795	108,7	14,8	9,7	Ertrag_BNU_2021-2050	3357	97,6	14,9	15,1
Ertrag_HadGEM_2021-2050	5818	109,1	15,3	5,2	Ertrag_HadGEM_2021-2050	3457	100,5	18,4	11,9
Ertrag Hecke inkl. CO2 2001-2012	5258	100,0	4,2		Ertrag Hecke 2001-2012	3066	100,0	5,0	
Ertrag_BNU_2021-2050	5612	106,7	11,2	6,0	Ertrag_BNU_2021-2050	3116	101,7	6,7	6,8
Ertrag_HadGEM_2021-2050	5753	109,4	14,0	3,9	Ertrag_HadGEM_2021-2050	3314	108,1	13,5	7,0
Ertrag CO2_400ppm_2001-2012	5250	100,0	4,0		Ertrag CO2_400ppm_2001-2012	3036	100,0	3,9	
Ertrag CO2_BNU_400ppm 2021-2050	5229	99,6	3,6	-1,6	Ertrag CO2_BNU_400ppm 2021-2050	2859	94,2	-2,1	-2,0
Ertrag CO2_HadGEM_400ppm 2021-2050	5441	103,6	7,8	-2,3	Ertrag CO2_HadGEM_400ppm 2021-2050	3048	100,4	4,4	-2,1
Ertrag CO2_ML_2001-2012	5049	100,0	0,0		Ertrag CO2_ML_2001-2012	2921	100,0	0,0	
Ertrag CO2_BNU_ML_2021-2050	5543	109,8	9,8	4,7	Ertrag CO2_BNU_ML_2021-2050	3049	104,4	4,4	4,5
Ertrag CO2_HadGEM_ML_2021-2050	5791	114,7	14,7	4,6	Ertrag CO2_HadGEM_ML_2021-2050	3241	111,0	11,0	4,5

Abbildung 37: Gesamtübersicht über die Simulationsergebnisse bei Winterweizen



<b>KÖRNERMAIS</b>									
<b>Boden 1</b>					<b>Boden 2</b>				
Beschreibung	Ertrag in kg	Absolut	Relativ	Veränderung zu	Beschreibung	Ertrag in kg	Absolut	Relativ	Veränderung zu
			Simulation 2001-2012	Simulation 2021-2050				Simulation 2001-2012	Simulation 2021-2050
Ertrag_Simulation_2001-2012	10384	100,0	100,0		Ertrag_Simulation_2001-2012	9949	100,0	100,0	
Ertrag_BNU_2021-2050	10911	105,1	105,1	5,1	Ertrag_BNU_2021-2050	9948	100,0	100,0	0,0
Ertrag_HadGEM_2021-2050	10401	100,2	100,2	0,2	Ertrag_HadGEM_2021-2050	9582	96,3	96,3	-3,7
Ertrag_Mulch REIN 2001-2012	10902	100,0	105,0	5,0	Ertrag_Mulch REIN 2001-2012	10344	100,0	104,0	4,0
Ertrag_BNU_2021-2050	11063	101,5	106,5	6,5	Ertrag_BNU_2021-2050	10055	97,2	101,1	1,1
Ertrag_HadGEM_2021-2050	10344	94,9	99,6	-0,4	Ertrag_HadGEM_2021-2050	9930	96,0	99,8	-0,2
Ertrag Hecke REIN 2001-2012	11221	100,0	108,1	8,1	Ertrag Hecke REIN 2001-2012	10416	100,0	104,7	4,7
Ertrag_BNU_2021-2050	11138	99,3	107,3	7,3	Ertrag_BNU_2021-2050	10157	97,5	102,1	2,1
Ertrag_HadGEM_2021-2050	10959	97,7	105,5	5,5	Ertrag_HadGEM_2021-2050	9970	95,7	100,2	0,2
Ertrag_Mulch 2001-2012	10772	100,0	103,7	3,7	Ertrag_Mulch 2001-2012	10219	100,0	102,7	2,7
Ertrag_BNU_2021-2050	11249	104,4	108,3	8,3	Ertrag_BNU_2021-2050	10126	99,1	101,8	1,8
Ertrag_HadGEM_2021-2050	10752	99,8	103,5	3,5	Ertrag_HadGEM_2021-2050	9999	97,8	100,5	0,5
Ertrag Hecke 2001-2012	11088	100,0	106,8	6,8	Ertrag Hecke 2001-2012	10302	100,0	103,5	3,5
Ertrag_BNU_2021-2050	11581	104,4	111,5	11,5	Ertrag_BNU_2021-2050	10232	99,3	102,8	2,8
Ertrag_HadGEM_2021-2050	11077	99,9	106,7	6,7	Ertrag_HadGEM_2021-2050	10033	97,4	100,8	0,8
Ertrag CO2_400ppm_2001-2012	10515	100,0	101,3	1,3	Ertrag CO2_400ppm_2001-2012	10067	100,0	101,2	1,2
Ertrag CO2_BNU_400ppm_2021-2050	10823	102,9	104,2	4,2	Ertrag CO2_BNU_400ppm_2021-2050	9693	96,3	97,4	-2,6
Ertrag CO2_HadGEM_400ppm_2021-2050	10317	98,1	99,4	-0,6	Ertrag CO2_HadGEM_400ppm_2021-2050	9729	96,6	94,1	-5,9
Ertrag CO2_ML_2001-2012	10385	100,0	100,0	0,0	Ertrag CO2_ML_2001-2012	9950	100,0	100,0	0,0
Ertrag CO2_BNU_ML_2021-2050	11118	107,1	107,1	7,1	Ertrag CO2_BNU_ML_2021-2050	10094	101,5	101,5	1,5
Ertrag CO2_HadGEM_ML_2021-2050	10604	102,1	102,1	2,1	Ertrag CO2_HadGEM_ML_2021-2050	10151	102,03	102,0	2,0

Abbildung 38: Gesamtübersicht über die Simulationsergebnisse bei Körnermais