



Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Abteilung Pflanzenbau

Department für Nutzpflanzenwissenschaften (H95000)

**Vergleich zweier Pflanzenwachstumsmodelle zur
Simulation von Ertragsbildung und
Pflanzenwachstum von Mais (*Zea mays* L.) in der
Region Tullnerfeld.**

Masterarbeit von

Matthias Breisch Bsc.

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

unter der Betreuung von

Ao. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Ahmad M. Manschadi

und

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Hans-Peter Kaul

eingereicht an der Universität für Bodenkultur Wien

22. Oktober 2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Potzneusiedl, 22.10.2019

Matthias Breisch

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei Herrn Prof. Manschadi für die professionelle Betreuung der Masterarbeit und die Möglichkeit, einen Einblick in die Welt der Pflanzenwachstumsmodelle zu erhalten, bedanken. Stets wurden meine Fragen auf hohem Niveau beantwortet und meine Anliegen berücksichtigt, wodurch die Zusammenarbeit reibungslos verlief.

In großem Maße gebührt meine Dankbarkeit auch Wolfgang Fuchs, der stets ein offenes Ohr hatte. Sei es bei einem Problem am Feld oder bei der Datenverarbeitung, wo keine Frage und kein Anliegen unbeantwortet blieb.

Ein ebenso großer Dank an Stefan Ryall, der während des gesamten Projekts nicht nur mit Rat und Tat zur Seite stand, sondern auch bei langen Stunden im Labor und am Feld mit seinem Humor die Stimmung auflockerte.

Des Weiteren danke ich den helfenden Händen Tamara Kolodziej, Marion Kreuzhuber, Josef Schodl, Craig Jackson und Matthias Fidesser.

Auch bei Ebrahimi Meysam und Alsalem Mouhannad möchte ich mich bedanken, die stets für aufmunternde Worte und nette Gespräche bereit waren.

Da diese Masterarbeit im Rahmen des Farm/IT Projekts zwischen TU Wien und der Universität für Bodenkultur Wien geschrieben wurde, möchte ich mich bei unserem Projektkoordinator Thomas Neudorfer (TU Wien) für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Schließlich gilt mein Dank auch der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft für die Bereitstellung finanzieller Mittel, ohne die die Forschungsarbeit in kleinerem Rahmen hätte stattfinden müssen.

Was wären die Mühen eines Studiums ohne die vielen Bekannten und Studienkollegen, weshalb ich mich für die vielen Unternehmungen, Lerngruppen und die unvergessliche Zeit in unserer wunderschönen Bundeshauptstadt bedanke. Vielen Dank auch an die Stammtischrunde für die lustigen und unbeschwerten Stunden bei unserem Lieblingswirten.

Von unschätzbarem Wert während des gesamten Studiums waren die Begleitung, die Ratschläge und ehrlichen Meinungen meiner Freunde, denen ich dafür sehr verbunden bin.

Doch all dies wäre nicht ohne meine Familie möglich gewesen, die während sämtlicher Höhen und Tiefen des langen und lehrreichen Studienprozesses hinter mir gestanden ist. Ein einfaches Danke reicht dafür nicht aus.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Freundin Kristina bedanken, die besonders während der Zeit der Fertigstellung meiner Masterarbeit große Rücksicht auf mich genommen hat und dabei eine unheimlich große Stütze war.

Zusammenfassung

Modelle sind vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. In der Arbeit wurden das komplexe Pflanzenwachstumsmodell APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) und das weniger komplexe Pflanzenwachstumsmodell iCrop bei der Simulation von Ertragsbildung und Pflanzenwachstum von Mais (*Zea mays* L.) untersucht und deren Verlässlichkeit festgestellt. Dazu wurde über zwei Jahre am Standort Tulln der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) ein Feldversuch für Mais mit fünf unterschiedlichen Düngungsstufen und vier Wiederholungen angelegt. In regelmäßigen Abständen wurden die Pflanzen in Stängel, Blätter, Rispen, tote Blätter, Kolben, Körner, Lieschen und Spindeln zerlegt, und deren Biomasse und Stickstoffkonzentration bestimmt. Weiters wurden Bodenwasser, Bodenstickstoff und Bodenlagerungsdichte untersucht. Anhand der gemessenen Daten wurden für beide Modelle Boden, Management und genetische Eigenschaften parametrisiert. Die Stickstoffdüngung zeigte keinen signifikanten Einfluss auf Phänologie und Blattanzahl, jedoch wurde für Blattflächenindex, Biomasse von Blättern und Stängeln, Kornertrag, sowie sämtliche Stickstoffgehalte ein signifikanter Einfluss dieser festgestellt. Beide Modelle waren in der Lage Phänologie und Blattanzahl realitätsnah zu simulieren. Die oberirdische Biomasse wurde von APSIM exakter simuliert, wohingegen der Kornertrag von iCrop besser prognostiziert wurde. Den Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse konnten beide Modelle ähnlich gut simulieren. Die Simulation von Bodenwasser - und Stickstoff folgte in beiden Modellen dem richtigen Trend, jedoch sollte für ein genaueres Ergebnis gegen weitere Daten verschiedener Saisonen und Standorte getestet werden. Bei beiden Pflanzenwachstumsmodellen wurde beobachtet, dass die exakte Parametrisierung unerlässlich ist, da Fehler an der Basis die gesamte Simulation durchlaufen. Schließlich konnte gezeigt werden, dass geringere Modellkomplexität in vielen Fällen keine ungenaueren Ergebnisse liefert.

Abstract

Models are simplified representations of the real world. In this work, the simulation of yield formation and canopy development of maize (*Zea mays* L.) with the complex crop model APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) and the less complex crop model iCrop was investigated and evaluated. Experimental data for model parameterisation were collected from a two years field trial with five different nitrogen treatments and four replications conducted at the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna research site in Tulln. Plants were regularly sampled and divided into stems, leaves, tassels, dead leaves, cobs, kernels, husks and rachis to measure dry mass and nitrogen concentration. In addition soil samples were taken to determine soil water holding capacity, mineral nitrogen content and the bulk density. Both models were then initialized and parameterised based on observed soil, management and cultivar-specific genetic parameters. Nitrogen fertilisation had no significant effect on phenology and leaf number. However, leaf area index, biomass of leaves and stems, yield and the nitrogen uptake were significantly affected by nitrogen supply. Both models were capable of predicting phenology and leaf number correctly. APSIM predicted above ground biomass more realistic than iCrop, whereas iCrop showed better results for predicting yield. Simulation of crop nitrogen content was similar in both models. The crop models showed also similar trends with regard to simulation of soil water and soil nitrogen. The results of this study indicate that both crop models require detailed parameterisation, because errors due to inaccurate model parameterisation are accumulated throughout the crop season. Furthermore, the more complex model APSIM did not provide better simulation results compared to the relatively simple model iCrop. More experimental datasets from various locations and seasons are needed to test more thoroughly the performance of these models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Stand des Wissens	10
2.1	Pflanzenwachstumsmodelle	10
2.1.1	Allgemein	10
2.1.2	Wahl der Modelle	10
2.2	iCrop	11
2.3	APSIM	18
2.4	Vergleich der eingesetzten Modelle	22
2.5	Parametrisierung eines Pflanzenwachstumsmodells	24
3	Forschungsfrage	25
4	Material und Methoden	26
4.1	Standort	26
4.2	Versuchsaufbau	27
4.3	Durchführung	28
4.4	Probenahme und Datensammlung	29
4.4.1	Pflanze	29
4.4.2	Boden	31
4.5	Statistische Analyse und Datenverarbeitung	34
5	Ergebnisse	36
5.1	Wetterbedingungen	36
5.2	Feldversuch	39
5.2.1	Phänologie	39
5.2.2	Blattanzahl	40
5.2.3	Blattflächenindex	41
5.2.4	Oberirdische Biomasse	42
5.2.5	Blatt und Stängelbiomasse	42
5.2.6	Kornertrag	43
5.2.7	Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse	44
5.2.8	Stickstoffgehalt Korn	45
5.2.9	Boden	45
5.3	Initialisierung und Parametrisierung der Pflanzenwachstumsmodelle	46
5.3.1	Boden	46
5.3.2	Management	48
5.3.3	Genetische Parameter	48
5.4	Simulationsergebnisse	48
5.4.1	Phänologie	49
5.4.2	Blattanzahl	50
5.4.3	Blattflächenindex	51

5.4.4	Oberirdische Biomasse	52
5.4.5	Kornertrag	54
5.4.6	Biomasse von Blättern und Stängel.....	55
5.4.7	Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse	56
5.4.8	Stickstoffgehalt Korn	58
5.4.9	Stickstoffbilanz	59
5.4.10	Bodenwasser	60
6	Diskussion	61
6.1	Allgemeines.....	61
6.2	Wetterbedingungen	61
6.3	Phänologie	61
6.4	Blattanzahl	62
6.5	Blattflächenindex.....	63
6.6	Oberirdische Biomasse	64
6.7	Ertrag	65
6.8	Blatt und Stängelbiomasse.....	66
6.9	Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse	66
6.10	Stickstoffgehalt Korn	67
6.11	Bodenstickstoff.....	68
6.12	Bodenwasser	69
7	Schlussfolgerung	70
8	Literaturverzeichnis	71
9	Abbildungsverzeichnis	74
10	Tabellenverzeichnis	77
11	Appendix.....	78

1 Einleitung

Mit Modellierung wird die Umsetzung konkreter Probleme aus einem Wissenschaftsbereich in eine mathematische Aufgabenstellung bezeichnet. In der Regel sind die zu beschreibenden Phänomene sehr komplex und es ist nicht möglich oder sinnvoll alle Aspekte zu berücksichtigen. Deshalb beinhaltet jedes Modell Vereinfachungen und Annahmen (Eck et al., 2017).

Nun sind Modelle Vereinfachungen der Wirklichkeit mit denen ein komplizierter Sachverhalt so einfach als möglich und trotzdem schlüssig dargestellt wird. Dabei wird versucht unwichtige und oft auch sehr komplexe Prozesse auszublenden und im Sinne der Einfachheit nur Prozesse zu betrachten, die für das zu untersuchende Ziel relevant sind.

Modelle finden einen breiten Anwendungsbereich und können in vielen Bereichen des Lebens eingesetzt werden. In dieser Arbeit liegt der Fokus allerdings auf Modelle, die das Wachstum und die Ertragsbildung von Pflanzen darstellen können. Die Darstellung selbst wird als Simulation bezeichnet.

Die ersten Modelle für landwirtschaftliche Systeme wurden bereits 1960 von dem Physiker Cornelius Teunis de Wit entwickelt. In seinen Modellen versuchte er physikalische und biologische Prinzipien zu vereinen (Jones et al., 2016). Seit diesem Zeitpunkt wurden die Modelle sukzessive erweitert und umfangreicher. Dies ist nicht zuletzt der Entwicklung des IBM Personal Computers (PC) 1981 und des Apple Mac Computers 1984 geschuldet, die die technischen Möglichkeiten dazu boten (Jones et al., 2016).

Grundsätzlich können Pflanzenmodelle sehr unterschiedlich sein und sehr breite Anwendung finden. So gibt es beispielsweise prozessorientierte Boden-Pflanze-Atmosphäre Modelle, welche die Veränderungen der pflanzlichen Biomasse und der Ertragsqualität durch Veränderungen der atmosphärischen CO₂ Konzentrationen und weiterer Klimafaktoren (z.B.: Temperatur und Niederschlag) darstellen können (Biernath et al., 2009).

Als weiteres Anwendungsbeispiel für Pflanzenmodelle kann die Arbeit von (Svoboda et al., 2009) genannt werden. In deren Studie wurde versucht im System Pflanze-Boden-Fermenter N-Flüsse zu quantifizieren und zu modellieren, um Optimierungsstrategien für die Gärrestausbringung ableiten zu können.

Pflanzenmodelle finden auch Einsatz bei der Unterstützung von betrieblichen Entscheidungen und helfen dabei alternative Managementsysteme zu finden (Soltani und Hoogenboom, 2007). In dieser Modellierungsstudie wurden unterschiedliche Kulturen, Saattermine, -tiefen - dichten und unterschiedliche Stufen in Bewässerung und Regenmenge untersucht. Anstelle des Feldversuchs wurde eine Modellierung durchgeführt.

Im Bereich der Pflanzenzüchtung können Pflanzenmodelle dazu verwendet werden, um die Entwicklung neuer Züchtungen zu beschleunigen und zu lokalisieren (Manschadi et al.,

2006; Tao et al., 2016). Bei dieser Anwendung wird der Genotyp im Modell vorgegeben, die phänologischen Ausprägungen werden simuliert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Pflanzenmodelle einen großen Einsatzbereich haben. Sie können überall dort Hilfestellung leisten, wo Pflanzen (meist Nutzpflanzen) in Wechselwirkung mit anderen Faktoren stehen. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich von der Klimaforschung über Umwelt-/Nachhaltigkeitsförderung und Management bis hin zur Pflanzenzüchtung. In all diesen Bereichen kommen Modelle als hilfreiche Werkzeuge zum Einsatz und können dabei Ressourcen wie Zeit, Arbeit und finanzielle Mittel sparen (Devkota et al., 2013; Ebrahimi et al., 2016; Eitzinger et al., 2013; Manschadi et al., 2014; Moeller et al., 2007).

2 Stand des Wissens

Im folgenden Kapitel wird der Stand des Wissens aufgezeigt, erklärt welche Modelle für die Studie gewählt wurden und wie diese funktionieren.

2.1 Pflanzenwachstumsmodelle

2.1.1 Allgemein

Es ist schwierig, ausschließlich von Pflanzenwachstumsmodellen zu sprechen. In der vorliegenden Studie wurde allerdings darauf abgezielt, zu ermitteln, wie gut Modelle das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Mais (*Zea mays* L.) simulieren können. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass viele Modelle deutlich mehr Prozesse als ausschließlich das Wachstum und die Ertragsbildung von Pflanzen simulieren können. Dies wurde eingangs ausführlich aufgezeigt, aus Gründen der Einfachheit wird in der folgenden Arbeit von Pflanzenwachstumsmodellen gesprochen.

2.1.2 Wahl der Modelle

Wie in Kapitel 1 erwähnt, gibt es unterschiedlichste Anwendungsbereiche von Pflanzenwachstumsmodellen, weshalb auch die Modelle selbst unterschiedlich aufgebaut sind. Um ein passendes Modell zu finden, muss man wissen was ein passendes Modell ausmacht. (Soltani und Sinclair, 2012) definieren ein passendes Modell als jenes, dass den Zweck seines Einsatzes erfüllt. Daraus wird klar, dass ein einfaches Modell, das eine einzelne Kultur über einen einjährigen Zeitraum hinweg simuliert, für einen anderen Zweck passender ist, als ein Modell, das eine komplexe langjährige Fruchtfolge simulieren muss. Die Passform eines Modells liegt daher an der Komplexität.

Die Komplexität eines Modells kann hauptsächlich in zwei Teile gegliedert werden. Zunächst ist die Anzahl der Prozesse, die vom Modell simuliert werden, ein Grund für die Komplexität. Als zweiter und wichtigster Grund ist die Anzahl der Parameter (=Inputs), die vom Modell benötigt werden, zu nennen. Weitere Aspekte für die Komplexität eines Modells sind der Umfang der Kalibration, die Verfügbarkeit von technischen Hilfestellungen und der Zugang und die Verständlichkeit des Codes (Rötter et al., 2011).

Nach einiger Überlegung wird klar, dass der Anwender nach einem Modell verlangt, das so komplex wie nötig und so einfach wie möglich aufgebaut ist, um seinen Ansprüchen gerecht zu werden. So komplex wie nötig deshalb, weil genaue Ergebnisse gewünscht werden und so einfach wie möglich, um wenig Inputs vorgeben zu müssen sowie um eine hohe Nachvollziehbarkeit zu erreichen.

Bevor ein Modell ausgewählt wird muss klar sein, welche Zielsetzung mit der Simulation verfolgt wird (Palosua et al., 2011). In dieser Arbeit hatte das benötigte Pflanzenwachstumsmodell die Aufgabe das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Mais zu simulieren.

Dadurch fiel die Wahl auf das Pflanzenwachstumsmodell iCrop, das, wie in (Soltani und Sinclair, 2015) beschrieben, zu den weniger komplexen Vertretern gehört. Zusätzlich wurde das laut vorherigem Literaturverweis als komplexer geltendes Programm APSIM gewählt, um zu ermitteln, ob aufgrund der höheren Komplexität ein besseres Simulationsergebnis erzielt werden kann.

Nachfolgend wird ein Überblick über beide Modelle gegeben und die Unterschiede dieser aufgegriffen. Die Angaben beziehen sich auf Mais und können von anderen Kulturarten abweichen.

2.2 iCrop

Zu Beginn muss festgehalten werden, dass iCrop die aktuellste Version des Pflanzenwachstumsmodells SSM (Soltani, 2014; Soltani und Sinclair, 2015, 2012) darstellt.

Die Grundzüge für dieses Modell entstanden bereits 1991 durch Sinclair und andere Beteiligte, 2012 wurde es durch Soltani und Sinclair nochmals überarbeitet (Soltani et al., 2013). Entwickelt wurde das Modell, um den Einfluss von Strahlung, Wasser und Stickstoff auf physiologische Prozesse der Nutzpflanzen zu simulieren (Soltani und Sinclair, 2015).

Obwohl es zum Zeitpunkt der Entwicklung schon gute Pflanzenwachstumsmodelle gab, wurde ein Modell mit hoher Transparenz, großer Einfachheit, freiem Zugang zum Code, einfacher Benutzeroberfläche und eindeutigem Parameter Inhalt geschaffen (Soltani et al., 2013).

Aus der Literatur wird ersichtlich, dass das Modell aufgrund seiner geringen Komplexität den Bedürfnissen der Forschungsfrage entspricht. Diese wird bereits in der Anwendung sichtbar, da es sich bei der Benutzeroberfläche um eine Excel Datei handelt, die mit Grundkenntnissen von Excel bedient werden kann.

Phänologie

Phänologie ist das Studium der biologischen periodisch wiederkehrenden Ereignisse der Pflanzen (und auch Tiere), die durch die Umwelt (vor allem durch die Temperatur) verursacht werden. Als Beispiel kann die Keimung und die Blüte bei Pflanzen genannt werden (Schwartz, 2003). Bei der Modellierung der Phänologie wird der Zeitpunkt des Erscheinens der unterschiedlichen Entwicklungsstufen der Pflanze vorhergesagt (Soltani und Sinclair, 2012).

Es ist wichtig die Phänologie zu modellieren, da das Modell ohne genauer Vorhersage der Entwicklungsstufen viele Wachstumsprozesse unkorrekt simuliert (Hodges, 1991). Bei Be-

trachtung des vorangegangenen Literaturhinweises wird klar, dass die korrekte Simulation der Phänologie die Basis für alle anderen zu simulierenden Prozesse (z.B.: N-Aufnahme oder Ertragsbildung) in einem Pflanzenwachstumsmodell darstellt. Ebenso schreibt (Hodges, 1991), dass innerhalb eines Pflanzenwachstumsmodells die Vorhersage der Phänologie viele wichtige Anwendungen findet.

Daher wird im folgenden Abschnitt aufgezeigt, wie iCrop die Phänologie von Maispflanzen simuliert. Die Informationsgrundlage für diesen Abschnitt stellt das Buch "Modeling Physiology of Crop Development Growth and Yield" von (Soltani und Sinclair, 2012) dar. Sofern nicht anders erwähnt, ist die Simulation der Phänologie bei optimaler Wasserversorgung erklärt. Die Stickstoffversorgung spielt in iCrop keine Rolle bei der Ausbildung der Phänologie.

Die einzelnen phänologischen Stufen im Modell sind:

- EMR: Koleoptile durchbricht Erdoberfläche (BBCH 09)
- EJU: Ende der Jugendentwicklung (BBCH 11)
- TSI: Rispenbildung (BBCH16-18)
- TSE: Beginn Rispenschieben (BBCH 51)
- SIL: Vollblüte (BBCH65)
- BSG: Beginn Kornbildung (BBCH 71)
- TSG: Ende der Kornbildung (BBCH 79)
- PM: Physiologische Reife (BBCH 87)
- HM: Erntereife (BBCH 92)

Die Entwicklung von EJU bis TSI ist abhängig von der Tageslänge, welche als Photoperiode (pp) bezeichnet wird. Die restlichen Entwicklungsstufen sind nur von der Temperatur abhängig.

Die Dauer der Entwicklungsstufen wird in biologischen Tagen (biological days, BD) angegeben. Je nach Abhängigkeit der Entwicklungsstufen von Temperatur oder Photoperiode werden, wie in Abbildung 1 dargestellt, für die Berechnung eines biologischen Tages entweder die Temperaturfunktion (tempfun), die Photoperiodenfunktion (ppfun) oder beide herangezogen.

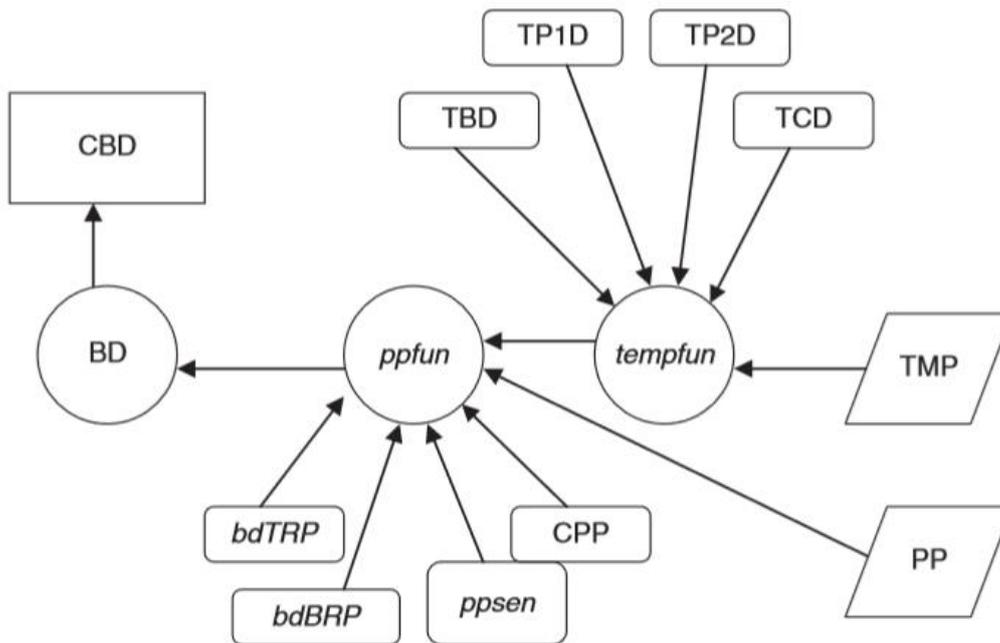


Abbildung 1: Schematische Darstellung des iCrop Phänologie Modells. Kumulierte biologische Tage (CBD), Biologischer Tag pro Kalendertag (BD, bd), Photoperiodenfunktion (ppfun), Ende der Reaktion auf Photoperiode (bdTRP), Beginn der Reaktion auf Photoperiode (bdBRP), Sensitivitätskoeffizient der Photoperiode (ppsen), kritische Tageslänge (CPP, h), tatsächliche Photoperiode (PP, h), Temperaturfunktion (tempfun), Temperaturuntergrenze (TBD, °C), optimale Temperatur 1 (TP1D, °C), optimale Temperatur 2 (TP2D, °C), Temperaturobergrenze (TCD, °C), tatsächliche mittlere Tagestemperatur (TMP, °C), Quelle: [Soltani und Sinclair, 2012](#).

Werden beide Funktionen herangezogen, wird das Ergebnis der einzelnen multipliziert. Sobald Temperatur oder Photoperiode nicht im Optimum vorkommen, ist das Ergebnis der Funktion nur ein Teil eines biologischen Tages. Das heißt, dass bei optimalen Wachstumsbedingungen BD 1 beträgt, sobald BD unter 1 beträgt, sind die Wachstumsbedingungen für diesen Tag limitiert. Dies kann beispielsweise bei über- oder unterschreiten der optimalen Temperatur vorkommen. Um eine Entwicklungsstufe abzuschließen, werden die biologischen Tage aufsummiert. Sobald die notwendige Summe an biologischen Tagen erreicht ist, beginnt ein neues Entwicklungsstadium.

Die Temperaturfunktion (tempfun) ergibt sich aus der Temperatur Untergrenze mit 8°C (TBD), der optimalen Temperatur 1 mit 34°C (TP1D), der optimalen Temperatur 2 mit 37°C (TP2D), der Temperatur Obergrenze mit 45°C (TCD) und der tatsächlichen mittleren Tagestemperatur in °C (TMP) und kann als 3-teilige lineare Funktion beschrieben werden:

- Sie beträgt 0, wenn $TMP < TBD$ oder $TCD < TMP$ ist.
- Sie beträgt 1, wenn $TP1D < TMP < TP2D$ ist.
- Sie beträgt zwischen 0 und 1, wenn $TBD < TMP < TP1D$ oder $TP2D < TMP < TCD$ ist.

Die angegebenen Temperaturen der tempfun sind die Normwerte von iCrop und können vom Anwender angepasst werden.

Die Photoperiodenfunktion (ppfun) ergibt sich aus der kritischen Tageslänge in Stunden (CPP), dem Sensitivitätskoeffizient der Photoperiode (ppsen) und den biologischen Tagen, an denen die Reaktion auf die Photoperiode beginnt (bdBRP) und endet (bdTRP). PP stellt die tatsächliche Photoperiode in Stunden dar.

Im iCrop Maismodell dauert die Keimung bei einer Saattiefe von 5cm 3 biologische Tage. Für alle anderen Saattiefen gilt $1,73+0,23 \cdot \text{Saattiefe}$ und ist die notwendige Keimdauer in bd. Bis die Jugendentwicklung abgeschlossen ist, werden je nach Sorte 0,2 bis 17,3 biologische Tage benötigt.

Die Entwicklungsstufe vom Ende der Jugendentwicklung bis zur Rispenbildung ist abhängig von der Photoperiode. Zur Rispenbildung werden bei einer Tageslänge unter 12,5 Stunden (CPP) 4bd benötigt. CPP ist für alle Maissorten konstant. In dieser Phase ist die Photoperiodenfunktion gleich 1, sobald die Photoperiode kleiner als CPP ist. Bei einer Tageslänge über 12,5 Stunden wird der Wert der ppfun kleiner als 1, sodass es länger dauert bis diese Entwicklungsphase abgeschlossen ist.

Die Zeit von der Rispenbildung (TSI) bis zum Beginn der Blüte hängt von der Anzahl der gebildeten Blätter (Anzahl wird von EMR bis TSI festgelegt) ab. Für das Erscheinen eines Blattes wird je nach Sorte eine gewisse Temperatursumme (Phyllochron) benötigt. Phyllochron ist als Intervall zwischen dem Erscheinen der aufeinanderfolgenden Blätter an einem Halm definiert ([Wilhelm und McMaster, 1995](#)).

Um das Stadium des TSE (Rispenziehen) abzuschließen, werden 2,92bd und von der Blüte bis zur physiologischen Reife werden je nach Sorte 22,3 bis 38,5bd benötigt. Diese Phase ist dreistufig aufgebaut und beinhaltet die Zwischenschritte Einleitung der Kornfüllung, Ende der Kornfüllung und als letzten Schritt die physiologische Reife. Ab diesem Zeitpunkt sind 4 weitere biologische Tage nötig, um zur Erntereife zu gelangen. Dabei wird kein Wachstum mehr simuliert, die Körner verlieren an Feuchtigkeit.

Bei mangelnder Wasserversorgung verschiebt sich der Zeitpunkt der Blüte nach hinten, die Dauer der Kornfüllung verkürzt sich und der Zeitpunkt der physiologischen Reife tritt früher ein. Im Modell werden diese Veränderungen mit dem Stressfaktor für die phänologische Entwicklung (WSFD) gesteuert.

An dieser Stelle sei festgehalten, dass die beschriebenen physiologischen Prozesse in der Natur nicht genau nach diesem Schema ablaufen und mit der Beschreibung lediglich versucht wird, die natürlichen Prozesse im Modell abzubilden.

Biomasseproduktion und Ertragsbildung

Die Erklärung der Biomasseproduktion und Ertragsbildung durch iCrop beruht, sofern nicht anders erläutert, auf Bedingungen unter optimaler Wasser- und Stickstoffversorgung.

Um zu verstehen wie die Ertragsbildung in iCrop funktioniert, muss der Prozess in zwei Schritten betrachtet werden. Im ersten Schritt wird die Zunahme der Biomasse simuliert. Im zweiten Schritt wird die Verteilung der Biomasse auf Stängel, Blatt und Korn vorgenommen.

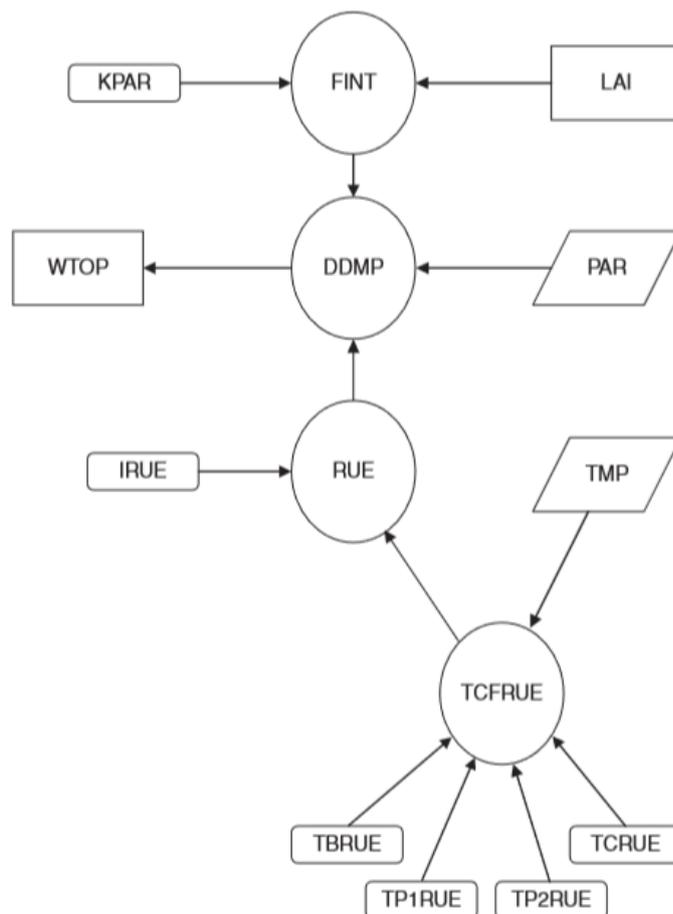


Abbildung 2: Schematische Darstellung des iCrop Biomasse Modells. Lichtextinktionskoeffizient (KPAR), Anteil aufgenommener Strahlung (FINT, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Blattflächenindex (LAI, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), oberirdische Gesamtbiomasse (WTOP, g m^{-2}), tägliche Zunahme der Biomasse (DDMP, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), potenzielle Strahlungsnutzungseffizienz (IRUE, g MJ^{-1}), tatsächliche Strahlungsnutzungseffizienz (RUE, g MJ^{-1}), Temperaturkorrekturfaktor (TCFRUE), tatsächliche mittlere Tagestemperatur (TMP, $^{\circ}\text{C}$), Temperaturuntergrenze (TBRUE, $^{\circ}\text{C}$), optimale Temperatur 1 (TP1RUE, $^{\circ}\text{C}$), optimale Temperatur 2 (TP2RUE, $^{\circ}\text{C}$) und Temperaturobergrenze für die Strahlungsnutzungseffizienz (TCRUE, $^{\circ}\text{C}$), Quelle: [Soltani und Sinclair, 2012](#).

In Abbildung 2 ist der Simulationsprozess der Biomassezunahme des iCrop Biomassemodells dargestellt. Die tägliche Biomassezunahme (DDMP, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) kann durch die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) auf die Pflanze, den Anteil der aufgenommenen

Strahlung (FINT, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) und die tatsächliche Strahlungsnutzungseffizienz (RUE, g MJ^{-1}) berechnet werden. In einer Gleichung ausgedrückt bedeutet das: $\text{DDMP} = \text{PAR} * \text{FINT} * \text{RUE}$.

Der Parameter FINT ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) errechnet sich aus der Blattfläche (LAI, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) und dem Lichtextinktionskoeffizienten (KPAR). Er stellt den Anteil der PAR dar, den die Pflanze absorbiert.

Der Parameter RUE (g MJ^{-1}) errechnet sich aus der potenziellen RUE (IRUE, g MJ^{-1}) und dem Temperaturkorrekturfaktor (TCFRUE). Er gibt an, wie viel Biomasse pro aufgenommener Strahlung (MJ) produziert werden kann und stellt somit die Strahlungsnutzungseffizienz dar. IRUE liegt bei optimalen Temperatur-, Wasser- und Stickstoffbedingungen vor. TCFRUE kann RUE bei nicht optimaler Temperatur reduzieren.

Wie bereits erwähnt, verteilt iCrop in einem zweiten Schritt die tägliche Zunahme an Biomasse auf die Organe Stängel, Blatt und Korn. Bis zum Beginn der Kornfüllung (BSG) wird die Biomasse nur in Blatt und Stängel verlagert. Dabei wird DDMP mit dem Faktor des täglichen Blattwachstums (FLF, g g^{-1}) multipliziert, um die tägliche Biomasse Zunahme der Blätter (GLF, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) zu erhalten. Die Differenz aus DDMP und GLF ergibt die tägliche Biomasse Zunahme des Stängels (GST, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Der Faktor FLF variiert je nach Entwicklungsstufe der Pflanze und kann durch die Darstellung von kumulierter Blattdrockenmasse zu kumulierter Gesamttrockenmasse eingeschätzt werden.

Ab Beginn der Kornfüllung bis Ende der Kornfüllung wird Biomasse nur mehr in das Organ Korn verlagert. Dabei wird zum einen DDMP direkt der täglichen Biomassezunahme der Körner (SGR, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) zugerechnet, zum anderen wird Biomasse aus den anderen beiden Organen in die Körner verlagert. Dabei wird die Gesamtbiomasse zu Beginn der Kornfüllung (BSGDM, g m^{-2}) mit dem Faktor FRTRL (Faktor der Biomasseverlagerung) multipliziert. Dadurch wird festgelegt, welcher Teil der BSGDM zur Verlagerung zur Verfügung steht (TRLDM, g m^{-2}). Während der Kornfüllungsphase wird täglich ein Teil der TRLDM in die Körner verlagert. Die Geschwindigkeit der Verlagerung gibt die temperaturabhängige Rate TRANSL ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) an, die sich proportional zur Tagestemperatur verhält.

Bei Wassermangel wird mit dem Wasserstressfaktor für das Wachstum (WSFG) die RUE verringert, mit dem Wasserstressfaktor für die Blattflächenzunahme (WSFL) die Blattflächenzunahme verringert und mit dem Wasserstressfaktor für die Stickstoffaufnahme (WSFN) die Stickstoffaufnahme verringert. Die Stressfaktoren sind einheitslos, bei einem Faktor von 1 liegt kein Stress, bei einem Faktor von 0 völliger Stress vor.

Der Stickstoffgehalt der Pflanzen wird während der vegetativen Phase wie folgt simuliert:

- Täglich wird der Stickstoffbedarf für das Blattflächenwachstum und für die Zunahme des Stängelgewichts ermittelt.
- Der Bedarf wird durch die maximale Aufnahmekapazität und die Verfügbarkeit im Boden limitiert.
- Die Verteilung erfolgt bedarfsgerecht auf Stängel und Blätter.
- Bei Stickstoffmangel wird zuerst der Stickstoffgehalt im Stängel (dient als Zwischenspeicher) auf ein Minimum reduziert, dann wird das Blattflächenwachstum gestoppt und zuletzt wird Stickstoff aus den Blättern in den Stängel verlagert, um den minimalen Stickstoffgehalt zu erhalten.

Während der generativen Phase wird der Stickstoffgehalt der Pflanzen wie folgt simuliert:

- Der gesamte Stickstoffbedarf der Körner wird durch Verlagerung von Stängel und Blätter bereitgestellt.
- Durch die Verlagerung des Stickstoffs aus den Blättern kommt es zum Absterben dieser.

Zusammenfassend kann die Ertragsbildung in iCrop mit der anfänglichen Aufnahme der Biomasse und der anschließenden Verteilung in den Pflanzenorganen charakterisiert werden.

Bodenwasser und Bodenstickstoff

Nachdem, wie bereits erklärt, bei mangelndem Bodenwasser der Ertrag vermindert wird, ist es wichtig, das Bodenwasser exakt zu simulieren, um genaue Ertragsergebnisse zu erhalten. Die Simulation des verfügbaren Bodenwassers erfolgt durch Berücksichtigung des vorhandenen verfügbaren Bodenwassers mit dessen Zu- und Abgängen. Zugänge sind: Regen, Bewässerung und neu durchwurzelter Raum. Abgänge sind: Versickerung unterhalb des Wurzelraums, Abfluss an der Erdoberfläche, Evaporation und Transpiration. Evaporation über den Boden ist der Verlust von Bodenwasser durch Veränderung des Aggregatzustandes von flüssig zu gasförmig. Transpiration ist als Bodenwasseraufnahme durch die Pflanze und Verlust über die Spaltöffnungen definiert (Glinski et al., 2011).

Die betrachteten Bodenschichten werden vom Anwender bestimmt, wobei meist zumindest zwei Bodenschichten festgelegt werden, da Evaporation nur in der obersten Bodenschicht stattfindet.

Die Simulation des Bodenstickstoffs wird im Modell benötigt, um zu wissen, wie viel Stickstoff von der Pflanze aufgenommen werden kann. Dazu simuliert iCrop den in Lösung befindlichen Stickstoff (NSOL, g m^{-2}) mit dessen Zu- und Abgängen und erstellt daraus eine Stickstoffbilanz. Die Zugänge sind: Mineralisation und Düngung. Die Abgänge sind: Verflüchtigung

gung, Auswaschung, Denitrifikation und Stickstoffaufnahme durch die Pflanze. Da nicht der gesamte NSOL zur Aufnahme in die Pflanze zur Verfügung steht, wird dieser zum pflanzenverfügbaren Stickstoff (NCON, $\text{g N g}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) umgerechnet. Nicht pflanzenverfügbar sind die stark an Bodenpartikel gebundene Bodenlösung, die Bodenlösung mit sehr geringer Stickstoffkonzentration und der unvollständig durchwurzelte Raum.

2.3 APSIM

Der "Agricultural Production System Simulator (APSIM)" stellt ein Modell dar, das darauf abzielt, biophysikalische Prozesse in einem landwirtschaftlichen System zu simulieren. Die Entwicklung begann 1991 durch das "Agricultural Production System Research Unit" in Australien (Keating et al., 2003). APSIM war eines der ersten Modelle, das entwickelt wurde, um in einem landwirtschaftlichen System nicht nur präzise Ertragsprognosen abzugeben, sondern auch Langzeitfolgen von unterschiedlichen Wirtschaftsweisen abzuschätzen (Keating et al., 2003). Da in der vorliegenden wissenschaftlichen Fragestellung nur ein Ausschnitt eines Produktionssystems betrachtet wird, wird nur ein Teil der vielen Möglichkeiten von APSIM benötigt.

Die technische Dokumentation ist in APSIM nicht vollständig vorhanden, da APSIM darauf abzielt, dass der Anwender keine Veränderungen der Parameter vornehmen muss, dies jedoch kann (Soltani und Sinclair, 2015). Aus diesem Grund sind die simulierten Prozesse oft schwer nachzuvollziehen. Im folgendem Abschnitt ist die Simulation von Phänologie und Ertragsbildung durch APSIM vereinfacht erklärt. Sämtliche Informationen dazu stammen von der APSIM Homepage (www.apsim.info) und sind dort im Detail nachzulesen.

Phänologie

Sofern nicht anders erwähnt, ist die Simulation der Phänologie ohne Mängel in der Stickstoff- und Wasserversorgung erklärt.

In APSIM werden 11 Entwicklungsstufen mit 9 dazwischenliegenden Phasen simuliert. Diese sind:

- sowing: Aussaat (BBCH 00)
- germination: Beginn der Keimung (BBCH 01)
- emergence: Koleoptile durchbricht Erdoberfläche (BBCH 09)
- end_of_juvenil: Ende der Jugendentwicklung (BBCH 11)
- floral_initiat: Rispenbildung (BBCH 16-18)
- flag_leaf: Entfaltung des Fahnenblattes/ Mitte Rispenstadien (BBCH 55)
- flowering: Vollblüte (BBCH 65)
- start_grain_fil: Beginn der Kornbildung (BBCH 71)

- end_grain_fill: Ende der Kornbildung (BBCH 79)
- maturity: Physiologische Reife (BBCH 87)
- harvest_ripe: Erntereife(BBCH 92)

In APSIM ist der Beginn eines Entwicklungsstadiums grundsätzlich von Temperatursummen abhängig. Einzige Ausnahme stellt der Zeitraum von der Aussaat bis zum Beginn der Keimung dar. Dieser ist von der Bodenfeuchte abhängig.

Die Entwicklungsgeschwindigkeit ist in APSIM in Grad-Tagen angegeben. Der Wert eines Grad-Tages für einen Kalendertag errechnet sich aus 8 3-Stunden Temperaturen, die aus der Minimum und der Maximum Temperatur interpoliert werden. Bei der Interpolation werden vorliegende Daten durch eine Funktion angenähert ([Schwarz und Köckler, 2009](#)). Dauert die Phase zwischen zwei Entwicklungsstadien beispielsweise 40 Grad-Tage, so sind 2 Kalendertage mit einer errechneten Temperatur von 20°C notwendig, um das nächste Entwicklungsstadium zu erreichen.

Nach der Aussaat kann bei ausreichender Bodenfeuchte die Keimung beginnen. Die Phase zwischen Keimung und Erscheinen der Koleoptile an der Erdoberfläche ist neben der Temperatur auch von der Saattiefe abhängig. Die Dauer zwischen Erscheinen der Koleoptile an der Erdoberfläche bis zur Entfaltung des Fahnenblattes wird durch die Anzahl der zu bildenden Blätter bestimmt. Diese sind mit 7 Blättern im Embryo und einem weiteren Blatt pro 21 Grad-Tag bis zur Rispenbildung festgelegt. Die Geschwindigkeit mit der sie sich entfalten ist ebenso durch die Temperatur bedingt.

Nachdem die Jugendentwicklung mit einer bestimmten Temperatursumme abgeschlossen ist, kann die Rispenbildung eingeleitet werden. Der Zeitpunkt der Rispenbildung verzögert sich allerdings, wenn die Photoperiode nach dem Ende der Jugendentwicklung eine Tageslänge von 12,5 Stunden überschreitet.

Um von der Entfaltung des Fahnenblattes die restlichen 5 Entwicklungsstadien (Blüte, Beginn/Ende der Kornbildung, Physiologische Reife und Erntereife) zu erreichen, sind 5 unterschiedliche Temperatursummen aus Grad-Tagen veranschlagt.

Sämtliche Temperatursummen können geändert werden. Dafür ist allerdings ein Wechsel von der APSIM Benutzeroberfläche in die kulturspezifische XML Datei von APSIM notwendig.

Bei mangelnder Versorgung der Pflanze mit Bodenwasser oder Bodenstickstoff wird die Ausbildung der Phänologie durch einen Wasserstress- bzw. einen N-Stress-Faktor beeinträchtigt. Der N-Stress-Faktor wird allerdings nur schwach gewichtet, sodass es nur zu geringer Einflussnahme von Stickstoffmangel bei der Ausbildung der Phänologie kommt.

Biomasseproduktion und Ertragsbildung

Sofern nicht anders erwähnt, ist die Simulation der Biomasseproduktion und Ertragsbildung ohne Mangel von Stickstoff- und Wasserversorgung erklärt.

Die Ertragsbildung läuft in APSIM wie bei iCrop in 2 Schritten ab. Zuerst wird der tägliche Biomassezuwachs kalkuliert, dann auf die einzelnen Pflanzenorgane verteilt. Bei der Produktion der Biomasse stellen für APSIM das zur Transpiration verfügbare Bodenwasser und die Strahlung die limitierenden Faktoren dar. APSIM berechnet daher immer 2 Tageszunahmen. Eine mit Wasser, die andere mit der Strahlung als limitierenden Faktor. Die niedrigere errechnete Tageszunahme stellt dann den aktuellen Wert für die tägliche Biomassezunahme dar.

Nachdem die Zunahme an Biomasse berechnet wurde, wird sie je nach Entwicklungsstadium unterschiedlich auf die Pflanzenorgane verteilt. Bis zum Ende der Jugendentwicklung wird die Biomasse gleichmäßig im Verhältnis 1:1 auf Wurzel und oberirdischer Biomasse verteilt. Von hier an wird das Verhältnis immer kleiner und beträgt zur Blüte nur mehr 0,087:1 (Wurzel : oberirdischer Biomasse), die oberirdische Biomasse nimmt also schneller an Gewicht zu. Der Teil der oberirdischen Biomasse, der in die Blätter verlagert wird, nimmt zwischen Erscheinen der Pflanze an der Erdoberfläche und Entfaltung des Fahnenblattes exponentiell zu. Der Teil der oberirdischen Biomasse, der nicht in die Blätter verlagert wird, wird zwischen Blütenbildung und Fahnenblatt-Entfaltung im Verhältnis 1:0,3 auf Stängel : Kolben aufgeteilt. Nachdem sich das Fahnenblatt entfalten hat, wird keine weitere Biomasse in die Blätter verlagert, diese wird nur mehr zwischen Stängel und Kolben verteilt. Sobald die Kornfüllung beginnt, legt nur mehr der Kolben an Biomasse zu.

Neben der Verteilung der täglich produzierten Biomasse, wird auch in APSM ein Teil der vegetativen Biomasse mobilisiert und in den Kolben umverlagert. Das Modell erlaubt eine maximale Verlagerung zwischen 15-20% der Biomasse aus Stängel und Blätter bezogen auf den Zeitpunkt des Beginns der Kornfüllung. Wie viel Biomasse potentiell im Korn eingelagert wird, wird festgelegt, indem die Anzahl der Körner pro Pflanze mit der täglichen Wachstumsrate der Körner (für jede Sorte individuell) multipliziert wird. Die Anzahl der Körner pro Pflanze wird durch die mittlere tägliche Wachstumsrate zwischen Rispenbildung und Beginn der Kornfüllung errechnet.

Bei mangelnder Versorgung der Pflanze mit Bodenwasser wird durch Wasserstressfaktoren die Photosyntheseleistung und das Blattflächenwachstum vermindert. Weiters wird bei Wasserstress die Stickstoffaufnahme der Pflanze aus dem Boden beeinträchtigt. Wassermangel tritt auf, wenn die tatsächliche Bodenwasserversorgung geringer als die potentielle Bodenwasserversorgung ist.

Bei mangelnder Versorgung der Pflanze mit Bodenstickstoff wird durch drei N-Stressfaktoren auf die Photosyntheseleistung, das Blattflächenwachstums und die Kornfüllung mit

Stickstoff Einfluss genommen. Die N-Stress-Faktoren sind unterschiedlich gewichtet und leiten sich aus dem Verhältnis von tatsächlicher zu optimaler Stickstoffkonzentration in der Pflanze ab.

Ähnlich wie bei iCrop errechnet APSIM zuerst die tägliche Zunahme der Biomasse und verteilt sie dann in einem zweiten Schritt, die Vorgehensweise innerhalb der beiden Schritte ist jedoch unterschiedlich.

Nach der Erklärung von Phänologie und Ertragsbildung beider Modelle bei limitierter und nicht limitierter Bodenwasser- und Bodenstickstoffversorgung ist festzuhalten, dass hier nur ein Überblick geschaffen wurde und aufgrund der Komplexität des Themas keine vollständige Erklärung der Modelle vorgenommen werden kann. Für genauere Details sind die beiden eingangs erwähnten Quellen heranzuziehen.

Bodenwasser und Bodenstickstoff

In APSIM ist die Simulation von Bodenwasser und Bodenstickstoff sehr umfangreich ausgeführt. So werden bei der Simulation des Bodenwassers der Abfluss an der Bodenoberfläche, die Versickerung, die Evaporation, die Auswaschung von Nährstoffen und die Wasserströme mit den darin gelösten Stoffen simuliert. Der Bodenstickstoff wird in APSIM über die Umwandlungsprozesse von Kohlenstoff und Stickstoff beschrieben. Dazu wird die organische Bodensubstanz in einen stabilen und einen labilen Teil gegliedert und die Umwandlungsprozesse zwischen den beiden Pools simuliert. Hier ist abermals festzuhalten, dass die genaue Erklärung der Simulation von Bodenwasser und Bodenstickstoff zu aufwendig und der Forschungsfrage nicht dienlich ist. Deshalb nochmals der Verweis auf (www.apsim.info).

2.4 Vergleich der eingesetzten Modelle

Nachdem in 2.2 und 2.3 ein Überblick über die beiden eingesetzten Modelle gegeben wurde, werden in diesem Abschnitt wichtige Merkmale gegenübergestellt und kurz erklärt. Informationsgrundlage dafür bilden (Keating et al., 2003; Soltani und Sinclair, 2015, 2012).

Tabelle 1: Gegenüberstellung wichtiger Merkmale beider Pflanzenwachstumsmodelle.

Merkmal	iCrop	APSIM
Phänologie	Temperatur, Photoperiode, Wasser	Temperatur, Photoperiode, Wasser
Anzahl Entwicklungsstufen	9	11
Zeiteinheit	Biologische Tage	Grad Tage
Biomasseproduktion	RUE, Transpiration	RUE, Transpiration
Biomasseverteilung	Einfach: basierend auf empirischen Daten	Komplex: Entwicklungsabhängige Parameter für Partitionierung
Ertragsbildung	Harvest Index	Kornanzahl, Kornwachstumsrate
Mangel an Bodenwasser	Auswirkung auf: Phänologie, Biomasseproduktion, Pflanzen-N-Gehalt	Auswirkung auf: Phänologie, Biomasseproduktion, Pflanzen-N-Gehalt
Mangel an Bodenstickstoff	Auswirkung auf: Biomasse, Pflanzen-N-Gehalt	Auswirkung auf: Phänologie, Biomasse, Pflanzen-N-Gehalt
Bodenwasser	Einfach	Komplex
Bodenstickstoff	Einfach	Komplex
Anzahl benötigter Parameter: Phäno., LAI, Biom., Ertrag, Wasser, Stickstoff	55	292
Möglichkeit Parameter zu ändern	Ja	Ja
Ort der Parameteränderung	Benutzeroberfläche	Benutzeroberfläche und Kulturart spezifische Datei
Programmcode	Frei zugänglich	Frei zugänglich
Technische Dokumentation	Handbuch und Papers	Nicht vollständig

Vergleicht man die Simulation der Phänologie beider Modelle miteinander, ist festzustellen, dass beide auf dieselben Inputs (Temperatur, Photoperiode, Wasser) Rücksicht nehmen. Beispielsweise berücksichtigen beide Modelle zur Einleitung der Blütenbildung die Photoperiode, in den anderen Entwicklungsstadien wird hauptsächlich die Temperatur berücksichtigt. Die Anzahl der Entwicklungsstadien fällt in APSIM mit 11 höher als in iCrop aus, da APSIM Aussaat und Keimung als eigene Stadien simuliert. Die Zeiteinheit der Entwicklungsstufen ist

in iCrop in biologischen Tagen und in APSIM in Grad-Tagen angegeben. Der Unterschied dabei ist, dass sich die biologischen Tage aus Photoperiode und Temperatur zusammensetzen können (je nach Entwicklungsstadium), die Grad-Tage nur aus der Temperatur.

Bei der Simulation der Biomassezunahme berücksichtigen beide Modelle die Strahlungsnutzungseffizienz und das zur Transpiration verfügbare Wasser. Die anschließende Verteilung der Biomasse erfolgt in iCrop auf die Pflanzenorgane Stängel, Blatt und Korn, wobei der Stängel hier alle Organe umfasst, die nicht Blatt oder Korn sind. In APSIM erfolgt die Verteilung der Biomasse deutlich detailreicher und es werden Organe wie Lieschen, Spindel und Antheren berücksichtigt.

Auch bei der Bildung des Ertrags geht iCrop den simpleren Weg und verwendet zur Simulation einen Harvest Index, APSIM berücksichtigt die Kornanzahl und die Kornfüllungsrate. Als Harvest Index wird das Verhältnis der oberirdischer Gesamtbiomasse zu Saisonende zu der geernteten Biomasse bezeichnet ([Jani et al., 2018](#)).

Beim Auftreten von Mängeln an Bodenwasser oder Bodenstickstoff arbeiten beide Modelle ähnlich, da beide Stressfaktoren berechnen und so ähnliche Auswirkungen (siehe Tabelle 1) ins Modell einbeziehen. Zusätzlich zu den in iCrop berücksichtigten Auswirkungen wird in APSIM ein zusätzlicher Stressfaktor für Änderungen der Phänologie miteinbezogen.

Die Simulation des Bodenwassers und des Bodenstickstoffs wird in iCrop über Bilanzen abgewickelt. Dazu werden von einem Ausgangswert alle Inputs (z.B.: Düngung) und Outputs (z.B.: Evaporation) hinzu beziehungsweise weggerechnet.

Bei APSIM läuft die Simulation des Bodenwassers ähnlich wie bei iCrop über eine Bilanz ab, die allerdings umfangreicher gestaltet ist. Der Bodenstickstoff wird von APSIM sehr detailliert simuliert, wozu die organischen Substanz und ihre Umwandlungsprozesse betrachtet werden.

Die Anzahl der benötigten Parameter zur Simulation von Phänologie, Blattfläche, Biomasseproduktion, Biomasseverteilung, Ertragsbildung, Wasser- und Stickstoffverhältnissen liegt für APSIM bei 292 Parametern, iCrop benötigt dafür 55 Parameter. Dabei müssen nicht immer alle Parameter vorgegeben sein, jedoch sind in beiden Modellen alle Parameter änderbar. Dies wird in iCrop auf der Benutzeroberfläche abgewickelt, in APSIM werden die Parameter sowohl auf der Benutzeroberfläche, als auch in Kulturart spezifischen Dateien geändert.

In beiden Modellen ist der Programmcode frei zugänglich. Dafür liegt bei iCrop eine vollständige technische Dokumentation ([Soltani und Sinclair, 2012](#)) vor, während für APSIM diese nicht ganz vollständig vorhanden ist.

2.5 Parametrisierung eines Pflanzenwachstumsmodells

Damit ein Pflanzenwachstumsmodell funktioniert, müssen bestimmte Parameter vorgegeben werden, welche entweder gemessen oder geschätzt werden können. Dieser Vorgang wird Parametrisierung genannt. Unter einem Parameter ist ein während der Simulation konstanter Wert zu verstehen, dem ein Name gegeben wurde (z.B.: TBD) (Soltani und Sinclair, 2012).

Als eines der Hauptprobleme bei der Arbeit mit Modellen wird der Umfang und die Qualität der Daten, die zur Parametrisierung vorhanden sind, angesehen (Seidel et al., 2018). Aus diesem Grund kann gute Parametrisierung nur mit guter Datenqualität erreicht werden. Das bedeutet auch, dass bei mangelnder Datenqualität die Parametrisierung nicht exakt genug durchgeführt werden kann und die Simulationsergebnisse unzureichend sein werden.

Wenn die Ergebnisse des Modells unzureichend sind, dann muss die Parametrisierung wiederholt und angepasst werden. Ob ein Modell unzureichend arbeitet, kann jedoch oft erst nach mehreren Jahren festgestellt werden. Das Testen der Richtigkeit des Modells über mehrere Jahre und voneinander unabhängigen Datensätzen hinweg, wird Validierung genannt (Gaydon et al., 2017).

Folglich wird klar, dass das Arbeiten mit Pflanzenwachstumsmodellen einen iterativen Prozess darstellt, bei dem mit guten und über einen großen Zeitraum reichenden Daten ständig validiert und wenn nötig neu parametrisiert wird. Dadurch kann das Modell immer genauere und realitätsgetreue Ergebnisse erzielen.

Da die Forschungsfrage darauf abzielt wie gut iCrop und APSIM das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Mais simulieren können und ob ein komplexeres Modell dafür lohnend ist, war eine Haupttätigkeit der vorliegenden Arbeit die Parametrisierung beider Modelle. Es wurden sowohl bei APSIM als auch bei iCrop die exakt selben Parameter vorgegeben, um hohe Vergleichbarkeit zu schaffen. Um der Forderung guter Datenqualität gerecht zu werden, wurde ein großer Teil der Parameter selbst gemessen.

3 Forschungsfrage

Um ein möglichst einfaches Modell zur verlässlichen Simulation von Pflanzenwachstum und Ertragsbildung von Mais zu finden, wurden folgende Forschungsfragen definiert:

- Wie gut können die unterschiedlichen Pflanzenwachstumsmodelle iCrop und APSIM das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Mais (*Zea mays* L.) simulieren?
- Führt höhere Komplexität in der Modellstruktur zu besseren Ergebnissen? - Wenn ja ist diese den Aufwand wert oder ist aufgrund des Aufwandes ein Modell mit geringerer Komplexität vorzuziehen?

4 Material und Methoden

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde am Universitätsstandort der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) in Tulln ein Feldversuch für Mais mit unterschiedlichen Düngungsstufen angelegt. Der Versuch wurde über 2 Jahre (2016 und 2017) durchgeführt. Dabei wurden sämtliche Daten für die Parametrisierung und Bewertung der Modelle erfasst.

4.1 Standort

- **Lage:** Tulln befindet sich 35 Kilometer nordwestlich von Wien. Koordinaten: Breitengrad (48,33°), Längengrad (16,05°), Seehöhe (180m) (www.maps.google.at).
- **Region:** Das Tullnerfeld als Teil der Molassezone bildet ein ca. 48km langes und 14km breites fruchtbares Becken, beiderseits der Donau. Hauptort des Tullnerfeldes ist Tulln (www.dnw.boku.ac.at). Auf den fruchtbaren Flächen wird intensiv Landwirtschaft betrieben. Die angebauten Hauptfrüchte sind Weizen, Mais, Kartoffeln und Zuckerrüben (www.aeiou.at).
- **Klima:** Klimatisch befindet sich das Tullnerfeld im kontinental/pannonischen - mitteleuropäisch/ozeanischen Übergangsgebiet (www.dnw.boku.ac.at). Die Durchschnittliche Jahrestemperatur lag in den Jahren 1991-2017 bei 10,31°C, die maximale Temperatur bei 38,9°C, die minimale Temperatur bei -22,6°C. Der durchschnittliche Jahresniederschlag lag bei 645mm/Jahr. Die Wetterdaten wurden von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) Wetterstation in Langenlebarn (ca. 5km vom Versuchsfeld entfernt), bezogen. Diese wurden selbst aufbereitet, das Jahr 2015 wurde wegen mangelnder Datenqualität verworfen.
- **Boden:** Die Bodenart am Versuchsfeld ist Schwarzerde, aus schluffigem Lehm, mit einer tiefen Gründigkeit von über 70 Zentimeter(["eBod - digitale Bodenkarte," 2018](#)).

4.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 3 ist der Versuchsaufbau des Feldversuchs dargestellt. Dieser war in beiden Jahren exakt gleich angelegt. Die Position der Parzellen wurde genau vermessen.

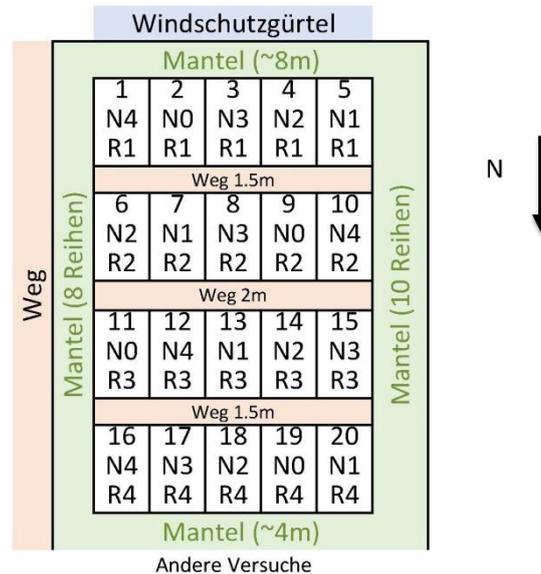


Abbildung 3: Versuchsaufbau des Maisversuchs von 2016 und 2017 in Tulln (nicht maßstabsgetreu).

Der Versuchsplan beinhaltete 5 Düngungsstufen von N0-N4 (N=Stickstoff), diese wurden in 4-facher Wiederholung von R1-R4 (R=Replikation) angelegt. Dadurch ergaben sich 20 Parzellen mit jeweils 8 Reihen (Reihenabstand 0,75m), die 10x6 Meter groß waren. Die Parzellen sind von oben nach unten zuerst mit der Parzellennummer, dann mit der Düngungsstufe und zum Schluss mit der Wiederholung beschriftet. Um die 20 Parzellen wurde ein Mantel (Düngung N4) angelegt, um störende Umwelteinflüsse zu reduzieren.

4.3 Durchführung

Der Feldversuch wurde in den Jahren 2016 und 2017 durchgeführt. Am Versuchsaufbau wurde nichts verändert. Da die Termine für Maßnahmen im Feld wetterabhängig sind, weichen sie in den beiden Jahren voneinander ab. In Tabelle 2 sind die Termine der Maßnahmen für jedes Jahr aufgelistet.

Tabelle 2: Die durchgeführten Maßnahmen im Maisversuch für die Jahre 2016 und 2017.

Maßnahme	2016	2017
Grunddüngung (300 kg ha ⁻¹ Mischdünger 0 (N):15 (P):40 (K))	26/04	05/05
Aussaat (Sorte: P8400 Reifezahl=KM 280, Saatstärke: 7,5 Pfl. m ⁻²)	09/05	11/05
Bodenherbizid Voraufbau (Stomp Aqua 3,5l ha ⁻¹ + Dual Gold 1,5l ha ⁻¹)	14/05	17/05
1. Stickstoffgabe KAS (Kalkammonsalpeter 27%N)	27/05	30/05
2. Stickstoffgabe KAS (Kalkammonsalpeter 27%N)	10/06	12/06
Hacken	17/06	14/06
1. Bewässerung (20mm)	keine	21/06
1. Trichogramma Applikation (<i>Trichogramma brassicae</i>)	keine	23/06
2. Bewässerung (20mm)	keine	05/07
2. Trichogramma Applikation (<i>Trichogramma brassicae</i>)	keine	18/07
3. Bewässerung (25mm)	keine	20/07
Ernte	28/09	12/09

Im Jahr 2016 wurde aufgrund der hohen Niederschläge auf Bewässerung verzichtet. Ebenso wurde 2016 auf die Trichogramma Ausbringung verzichtet, da der Druck durch Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) gering war.

Die Düngung wurde in den unterschiedlichen Düngungsstufen wie folgt durchgeführt:

- N0: 0kg/ha
- N1: 2x20kg/ha
- N2: 2x40kg/ha
- N3: 2x60kg/ha
- N4: 2x80 kg/ha

4.4 Probenahme und Datensammlung

Die Probenahme und Datensammlung wurden in 2 Bereiche aufgeteilt, Pflanze und Boden. Proben wurden innerhalb der Parzellen immer nur in den mittleren 4 Reihen gezogen, um Randeffekte aus der Nachbarparzelle auszuschließen.

4.4.1 Pflanze

Die Datensammlung betreffend Pflanze kann in 2 Teile gegliedert werden: Biomasse und Phänologie.

Bei der Biomasseerhebung wurden die Pflanzen je nach Entwicklungsstadium in ihre Organe zerlegt, deren Trockengewicht und Stickstoffgehalt bestimmt und die Blattfläche gemessen. Wann die Biomasseerhebungen in den einzelnen Jahren durchgeführt wurden und in welche Teile die Pflanzen dabei zerlegt wurden, ist in Tabelle 3 abgebildet.

Tabelle 3: Auflistung Biomasseerhebungstermine beider Jahre.

2016	2017	Organe
	01/06	Stamm, Blatt
13/06	14/06	Stamm, Blatt
28/06	28/06	Stamm, Blatt
13/07	13/07	Stamm, Blatt, Rispe, tote Blätter
25/07		Stamm, Blatt, Rispe, tote Blätter, Kolben
16/08	08/08	Stamm, Blatt, Rispe, tote Blätter, Kolben, Körner, Lieschen, Spindel
28/09	12/09	Stamm, Blatt, Rispe, tote Blätter, Kolben, Körner, Lieschen, Spindel

Es wurden in beiden Jahren 6 Biomasseproben erhoben. Begonnen wurde Anfang Juni, dann wurde versucht, je nach Kapazität bis zur Blüte im 2 Wochen Rhythmus zu beproben. Zwischen Blüte und Ernte wurde eine weitere Erhebung durchgeführt. Die letzte Biomasseerhebung war naturgemäß zur Ernte.

Bei der Erhebung wurde in jeder Parzelle die oberirdische Biomasse von 8 Pflanzen abgeschnitten und vom Feld ins Labor gebracht. Im Labor wurden die Pflanzen in die in Tabelle 3 genannten Organe zerlegt. Anschließend wurden die Proben in einem Universal Trockenschrank (Memmert bzw. Heraeus, Deutschland) für 72 Stunden bei 60°C getrocknet. Nach der Trocknung wurden mit einer Waage (Denver Instruments, USA) alle Organe für jede Parzelle verwogen. Das Gewicht wurde von 8 auf 7,5 Pflanzen bezogen um eine Gewichtsangabe pro Quadratmeter zu erhalten (Saatedichte 7,5 Pflanzen pro m²).

Um die Fläche der grünen Blätter zu bestimmen wurde das Messgerät LI 3100 Area Meter (LI-COR Inc., USA) verwendet. Dabei wurden die grünen Blätter von nur 3 der 8 abgeschnittenen Pflanzen verwendet, um den Arbeitsaufwand zu reduzieren. Aus der Blattfläche (LA,

cm²) und der Fläche (Standraum, m²) der 3 untersuchten Pflanzen wurde der Blattflächenindex (LAI) berechnet. Dies ist in Formel 4.1 zusammengefasst.

$$LAI = \frac{LA}{Standraum} \quad (4.1)$$

Zeitlich versetzt erfolgte das Bestimmen der Stickstoffgehalte der einzelnen Organe, da die Proben aller Probenahmen auf einmal bestimmt wurden. Dazu wurden bei der Probenvorbereitung alle Proben mit zwei Schneidemühlen (Reitsch, Deutschland und IKA-Werke, Deutschland) vermahlen. Das Mahlgut wurde in einem Universal Trockenschrank (Memmert, Deutschland) bei 60°C für 24 Stunden abermals getrocknet, um auszuschließen, dass bei der Lagerung der Proben Luftfeuchtigkeit aufgenommen wurde. 40-100mg einer trockenen und gemahlten Probe wurden anschließend in ein Zinnschälchen eingewogen. Das Gewicht wurde notiert und das Schälchen so verschlossen, dass die Probe kein Wasser mehr aufnehmen konnte. Als Waage wurde eine Mettler Toledo XS 105 Dual Range (Mettler-Toledo, USA) verwendet.

Die Stickstoffgehalte wurden per Gaschromatografie durch das Gerät vario MACRO cube (Elementar, Deutschland) bestimmt.

Bei der Gaschromatographie wird mithilfe eines Trägergases die Probe durch eine Trennsäule transportiert, wodurch der chromatographische Vorgang bei festgelegter Temperatur erfolgt. Die getrennten Substanzen passieren nach dem Verlassen der Säule in der Gasphase nacheinander einen Detektor, der die einzelnen Bestandteile anzeigt (Schwedt und Vogt, 2010).

Als Ergebnis der Gaschromatographie wurden die Stickstoffkonzentrationen (Nconc., g g⁻¹) der Proben erhalten. Diese wurden in Stickstoffgehalte pro Fläche (Ncont., g m⁻²) umgerechnet, indem Nconc. mit der Biomasse (g) pro Fläche (m²) multipliziert wurde.

$$Nconc. \times \frac{Biomasse}{Fläche} = Ncont. \quad (4.2)$$

In den Ergebnissen besteht ein Biomassewert (Gewicht und N-Gehalt) immer aus einem Mittelwert aus 4 Proben, da alle Parzellen (1-20) und somit 4 Replikationen erfasst wurden.

Um die Phänologie der Maispflanzen zu bestimmen wurde versucht, je nach Zeitressourcen einmal wöchentlich die Parzellen zu bonitieren.

Erhoben wurden bei jedem Termin die Anzahl der entfalteten Blätter und (wenn vorhanden) die Anzahl der toten Blätter, das Entwicklungsstadium und die Seitentriebe der Pflanzen. Für die Bewertung des Entwicklungsstadiums wurde die BBCH Skala verwendet. Die BBCH

(Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt, und Chemische Industrie) Skala stellt ein einheitliches Beschreibungssystem für phänologische Entwicklungsstufen von Pflanzen dar (Lancashire et al., 1991). Bei der Bonitierung wurden zu Anfang der Saison in allen Parzellen jeweils 3 Pflanzen markiert, um dann während der Vegetationsperiode immer dieselben Pflanzen auszuwerten. Somit ergibt sich bei den Ergebnissen der Phänologie ein Mittelwert aus 12 Werten, da alle Wiederholungen erfasst wurden.

4.4.2 Boden

Die Datensammlung betreffend Boden kann in 2 Teile gegliedert werden. Bodenstickstoff und Bodenwasser. In Tabelle 4 ist aufgelistet, zu welchen Terminen welche Bodenproben gezogen wurden.

Tabelle 4: Auflistung der Termine für die Erhebung der Bodenproben in beiden Jahren, W=Bodenwasser, N=Bodenstickstoff.

2016	2017
20/04 - W+N	12/04 - W+N
09/05 - W	01/06 - W
14/06 -W+N	02/06 - W+N
29/06 - W	29/06 - W
25/07 - W+N	12/07 - W
01/09 - W	08/08 - W
28/09 - W+N	13/09 - W+N

Grundsätzlich wurde versucht die Termine so anzulegen, dass die Bodenproben einen Tag vor oder nach der Biomasseerhebung gezogen wurden. Aus personellen Gründen war die Erhebung von Boden und Biomasse an einem Tag nicht möglich. Bei der Auswertung der Bodendaten wurde, wenn möglich, das Datum des dazugehörigen Biomassetermins angeführt. Daher können die Termine, die in der Präsentation der Ergebnisse angeführt sind, von den in Tabelle 4 angeführten leicht abweichen.

Um die Bodenproben zu ziehen wurden folgende Geräte verwendet:

- 5 Bohrstöcke (Hersteller unbekannt), Durchmesser: 20mm, Länge: 120cm
- Bohrhammer (Hilti AG, Liechtenstein) betrieben mit Benzinaggregat
- Hebelkonstruktion zur Entnahme der Borstöcke aus dem Boden
- Kübel zur Trennung der Horizonte
- Zollstock zur Bemessung der Horizonte
- Probensäcke
- Schreibutensilien

Zur Ziehung der Bodenstickstoffproben wurden in einer Parzelle jeweils 5 Proben entnommen. Ein Bohrstock wurde in der Pflanzreihe gesetzt, 2 zwischen den Reihen (maximaler Abstand zur Pflanze) und 2 Bohrstöcke zwischen den zuvor genannten Probestellen (halbmaximaler Abstand zur Pflanze). Zur Ziehung des Bodenwassers wurden 3 Proben pro Parzelle entnommen. Die Probestellen waren, wie soeben beschrieben, mit jeweils einem Bohrstock pro Probestelle lokalisiert.

Die Tiefe der Bodenproben lag bei 120cm, wobei sich die Horizontierung für Bodenwasser und Bodenstickstoff, wie in Tabelle 5 dargestellt, unterschieden.

Tabelle 5: Einteilung der Bodenhorizonte in Abhängigkeit der Untersuchungsart für beide Jahre.

Bodenwasser	Bodenstickstoff
0-10cm	
10-30cm	0-30cm
30-60cm	30-60cm
60-90cm	60-90cm
90-120cm	90-120cm

Die Horizontierung wurde in beiden Jahren gleich durchgeführt. Für Bodenwasser wurde die gezogene Probe in 5 Horizonte, für den Bodenstickstoff in 4 Horizonte eingeteilt. Der zusätzliche Horizont für Bodenwasser wurde eingezogen, da die oberste Schicht des Bodens starker Austrocknung ausgesetzt ist und bei einer Horizontierung wie bei Bodenstickstoff den ersten Horizont verfälscht hätte.

Der gravimetrische Bodenwassergehalt wurde durch Differenzwägung vor (soil fresh) und nach (soil dry) der Trocknung bestimmt. Dazu wurden die Bodenproben in einem Universal-trockenschrank (Mettler, Deutschland) bei 105°C für 98 Stunden getrocknet und vor/nach der Trocknung mit einer Waage (Denver Instrument, USA) verwogen. Der gravimetrische (sw. grav., g g⁻¹) und der volumetrische (sw. vol., cm³ cm⁻³) Wassergehalt wurden wie folgt berechnet:

$$\frac{\text{soil fresh} - \text{soil dry}}{\text{soil dry}} = \text{sw. grav.} \quad (4.3)$$

$$\text{sw. grav.} \times \text{BD} = \text{sw. vol.} \quad (4.4)$$

Zur Berechnung des volumetrischen Bodenwassergehalts wurde die Lagerungsdichte des Bodens (BD, g*cm⁻³), wie später erklärt wird, bestimmt.

Der Wassergehalt (Wasser, mm) für die einzelnen Horizonte wurde wie folgt berechnet:

$$sw.vol \times \text{Horizonthöhe} = \text{Wasser} \quad (4.5)$$

Der permanente Welkepunkt (PWP) bezeichnet diejenige Wassermenge im Boden, bei der die Pflanze irreversibel welkt (Hartge und Horn, 1999). Zur Bestimmung des permanenten Welkepunkts wurde im Mantel des Versuchsfeldes eine 15 Quadratmeter große Fläche mit einer Kunststoffplane am 1.8.2017 wasserdicht abgedeckt. Diese wurde an die Maispflanzen angepasst und mit Klebeband fixiert, sodass an den Schnittstellen kein Wasser eindringen konnte. Nach 2 Monaten wurde der Wassergehalt des Bodens wie zuvor erklärt bestimmt.

Der Begriff Feldkapazität gibt die Wassermenge an, die ein Boden gegen den Einfluss der Schwerkraft festhalten kann (Hartge und Horn, 1999). Um die Feldkapazität (FK) zu bestimmen, wurden ebenso am 1.8.2017 im Mantel des Versuchsfeldes 4 Quadratmeter der Maispflanzen entfernt und rund um die freigelegte Stelle ein 10cm hoher Erdwall angelegt. Mittels Gartenschlauch wurde dem Boden innerhalb des Erdwalls ein Monat lang Wasser zugeführt, um die Feldkapazität zu erreichen. Zur Messung des Wassergehalts wurde der Sensor Diviner 2000 (Sentek Pty Ltd., Australien) benutzt.

PWP und FK wurden nur im Jahr 2017 bestimmt.

Um den Gehalt des Bodenstickstoffs zu bestimmen, wurde das N_{\min} Verfahren gewählt. Der N_{\min} - Wert erfasst den im Bodenprofil "pflanzenverfügbaren" mineralischen Stickstoff (Nitratstickstoff und Ammoniumstickstoff) (Baumgarten et al., 2017). Der organisch gebundene N im Boden wird dabei nicht erfasst. Mit der N_{\min} - Analyse betraut wurde die Abteilung für Bodengesundheit und Pflanzenernährung der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES). Dazu wurden die Proben nach der Probenahme gekühlt und schnellstmöglich zur AGES gebracht, die die Analyse nach der ÖNORM L 1091 durchführte. Die Ergebnisse wurden sowohl für Ammonium (NH_4) als auch für Nitrat (NO_3) in mg/100g Boden geliefert. Die Umrechnung auf kg/ha für die einzelnen Horizonte erfolgte wie in folgenden Formeln:

$$NH_4 \left[\frac{mg}{100g \text{ Boden}} \right] \times BD \times \text{Horizonthöhe} = NH_4 \left[\frac{kg}{ha} \right] \quad (4.6)$$

$$NO_3 \left[\frac{mg}{100g \text{ Boden}} \right] \times BD \times \text{Horizonthöhe} = NO_3 \left[\frac{kg}{ha} \right] \quad (4.7)$$

Die Lagerungsdichte des Bodens wurde am 27.9.2017 mittels Stechzylinder bestimmt. Diese gibt an, wie viel Feststoffanteil in einer Volumeneinheit vorhanden ist. Durch Kenntnis der Lagerungsdichte können als Gewichtsanteile bestimmte Wasser- oder Nährstoffgehalte auf

das Volumen des Bodens bezogen werden (Hartge und Horn, 2014). Dazu wurde in der Mitte des Versuchsfeldes eine 130cm tiefe Grube ausgehoben, um 2 Zylinder je Horizont seitlich mittels Hammer in den Boden zu schlagen. Die Stechzylinder hatten ein Volumen (V_z , cm^2) von $203,58 \text{ cm}^3$. Der Inhalt der Zylinder wurde in einem Universal Trockenschrank (Memmert, Deutschland) bei 105°C für 72 Stunden getrocknet. Das trockene Gewicht (m_z , g) des Stechzylinderinhalts wurde mit einer Waage (Denver Instruments, USA) bestimmt. Die Lagerungsdichte (BD) errechnete sich wie folgt:

$$BD = \frac{m_z}{V_z} \quad (4.8)$$

Bei den Bodenuntersuchungen von Wasser und Stickstoff wurden die Proben nur aus den Parzellen 1-5 und 11-15 (=Wiederholung 1 und 3) gezogen. Daher sind alle Ergebnisse Mittelwerte aus 2 Werten.

4.5 Statistische Analyse und Datenverarbeitung

Als nächster Schritt folgte eine statistische Analyse der erhobenen Daten. Die Analyse der Varianz wurde mit der Funktion ANOVA (analysis of variance) des Statistik Programms R durchgeführt. ANOVA wird meist für die Analyse von qualitativ beschreibenden Variablen (z.B.: Behandlungen) verwendet, dabei wird die Ausprägung einer Variablen auf eine Zufallsvariable geprüft (Steponas, 2017). Wurden dabei signifikante Unterschiede festgestellt, folgte im nächsten Schritt eine Evaluierung der Düngungsstufen bei einem Signifikanzniveau von ($\alpha=5\%$) mit der Funktion des TukeyHSD-Tests (honest significance differences) von R, wie in (Everitt und Hothorn, 2005) beschrieben.

Als Beispiel ist in Abbildung 4 die Analyse des Kornertrages aus dem Jahr 2017 dargestellt.

```

2 #####yield 17#####
3 -----ANOVA-----
4 > yield.aov<-aov(yield~trt)
5 > summary(yield.aov)
6      |          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
7 trt      |          4 308236   77059      28 8.4e-07 ***
8 Residuals |         15  41288    2753
9 ----
10 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
11 -----TUKEY TEST-----
12 > yield.hsd<-HSD.test(yield.aov,"trt")
13 > print(yield.hsd$groups)
14      |   yield groups
15 N4 1106.060      a
16 N3 1091.700      a
17 N2 1061.015      a
18 N1 1012.715      a
19 N0  767.990      b

```

Abbildung 4: Statistische Analyse (ANOVA und TukeyHSD-Test) des Kornertrages aus dem Versuchsjahr 2017.

Die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Abschnitt 5.2 eingebettet und dort ersichtlich. Dabei sind die Gruppierungen aus dem TukeyHSD-Test mit Kleinbuchstaben über den Grafiken gekennzeichnet.

Mithilfe der statistischen Analyse konnten Ausreißer in den Daten aufgezeigt und gelöscht werden:

- Im Jahr 2017 wurde bei der Biomasseerhebung vom 8.8.2017 die erste Wiederholung von N0 komplett gelöscht. Hier ist das Ergebnis ein Mittelwert aus drei Werten.
- Für das Jahr 2016 konnte ein Ausreißer vom 28.6.2016 bei Bodenwasser in Parzelle 2 und der Schicht von 10-30cm identifiziert werden. Es handelte sich um die erste Wiederholung der Düngungsstufe N0.

Ansonsten wurden in den Daten keine Ausreißer bzw. Auffälligkeiten gefunden.

Die verwendete Version von R war 3.4.1.

Bei den Pflanzenwachstumsmodellen wurden folgende Versionen verwendet:

- APSIM 7.9-r4044
- iCrop Version 2

Zur Datenaufbereitung wurde Excel 2007 und zur Erstellung der Grafiken SigmaPlot 14.0 verwendet.

5 Ergebnisse

In Teil 5 der vorliegenden Masterarbeit werden die Ergebnisse daraus präsentiert, dies erfolgt in 4 Abschnitten. Zuerst werden in Abschnitt 5.1 die Wetterbedingungen beider Versuchsjahre gezeigt, in Abschnitt 5.2 kommt es zur Präsentation der Ergebnisse aus dem Feldversuch, in Abschnitt 5.3 wird gezeigt wie die Pflanzenwachstumsmodelle initialisiert und parametrisiert wurden und zuletzt werden in Abschnitt 5.4 die Simulationsergebnisse präsentiert.

5.1 Wetterbedingungen

In Abbildung 5 ist die monatliche Regenmenge während der Vegetationsperioden abgebildet. Während der Zeit von 142 Tagen zwischen Saat und Ernte regnete es 2016 350mm. 2017 betrug die Vegetationszeit 124 Tage mit einer Niederschlagssumme von 278mm. Zusätzlich wurden 2017, wie in Tabelle 2 angeführt durch 3-malige Bewässerung insgesamt 65mm Wasser zugeführt.

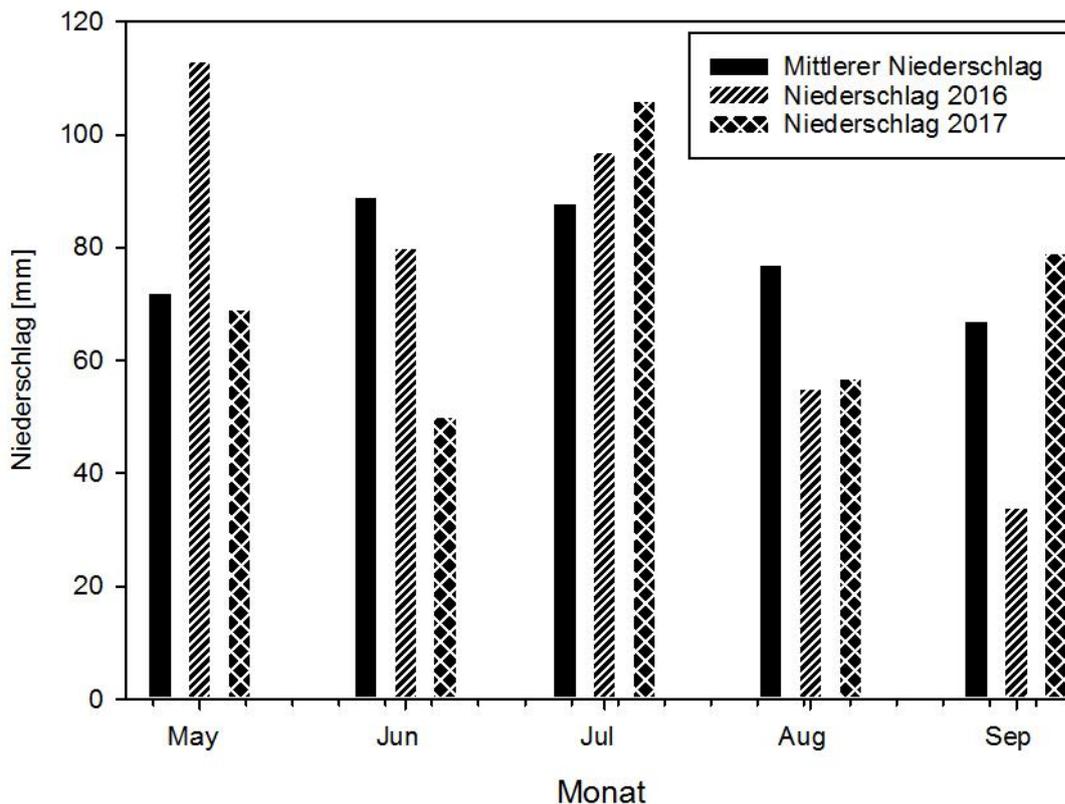


Abbildung 5: Monatliche Regenmengen während der Vegetationsperiode im Durchschnitt von 1991-2017 und für die Jahre 2016 und 2017.

In den Monaten Mai bis September regnete es im Mittel 393mm, 2016 379mm und 2017 361mm.

In Abbildung 6 sind die minimalen, maximalen und jeweils mittleren Temperaturverläufe während der Vegetationsperioden der beiden Versuchsjahre dargestellt. 2016 lag die Temperatur im Zeitraum von Mai bis Oktober maximal bei 35,9°C, die minimale Temperatur wurde bei 4,8°C gemessen. Im Folgejahr lag die maximale/minimale Temperatur im selben Zeitraum bei 37,3°C/-0,10°C. Zwischen Mai und September wurde 2016 eine mittlere Temperatur von 18,89°C gemessen. Verglichen dazu war die mittlere Temperatur 2017 mit 19,18°C um 0,29°C höher. Im Schnitt von 1991-2017 lag die mittlere Temperatur für denselben Zeitraum bei 18,07°C.

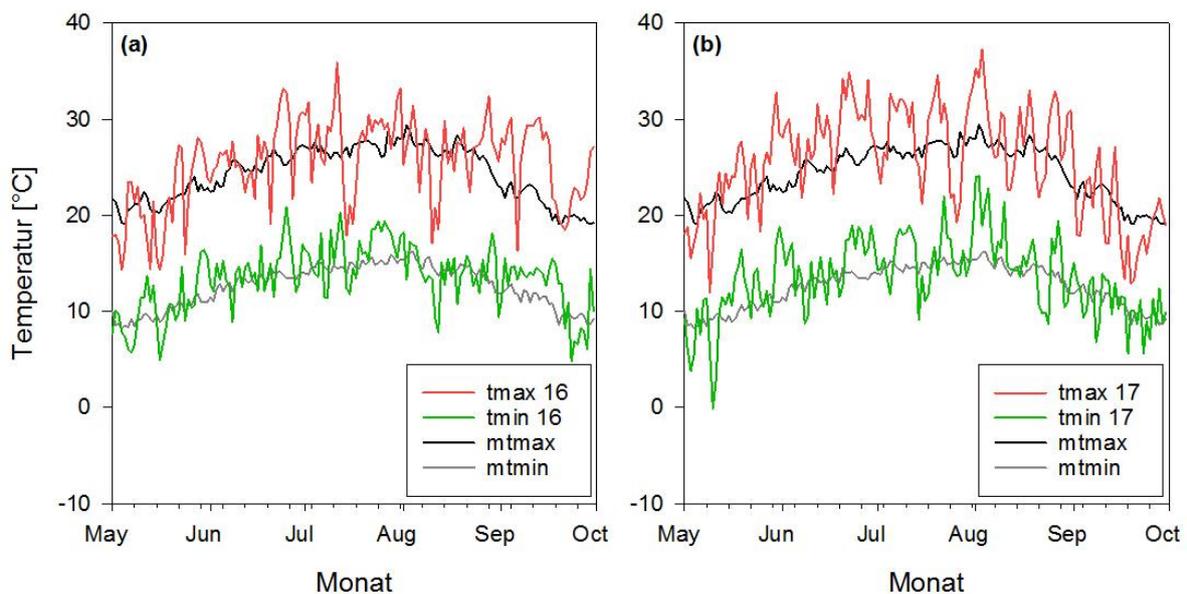


Abbildung 6: Maximale (tmax) und minimale (tmin) Temperaturverläufe während der Vegetationsperioden in den Jahren 2016 (a) und 2017 (b), mit mittleren maximalen (mtmax) und minimalen (mtmin) Temperaturen der Jahre 1991-2017.

In Abbildung 7 ist die kumulierte Globalstrahlung der Vegetationsperioden dargestellt. Diese betrug für den Zeitraum von Mai-September im langjährigen Mittel 2559 MJ m⁻², im Jahr 2016 2842 MJ m⁻² und im Jahr 2017 2835 MJ m⁻².

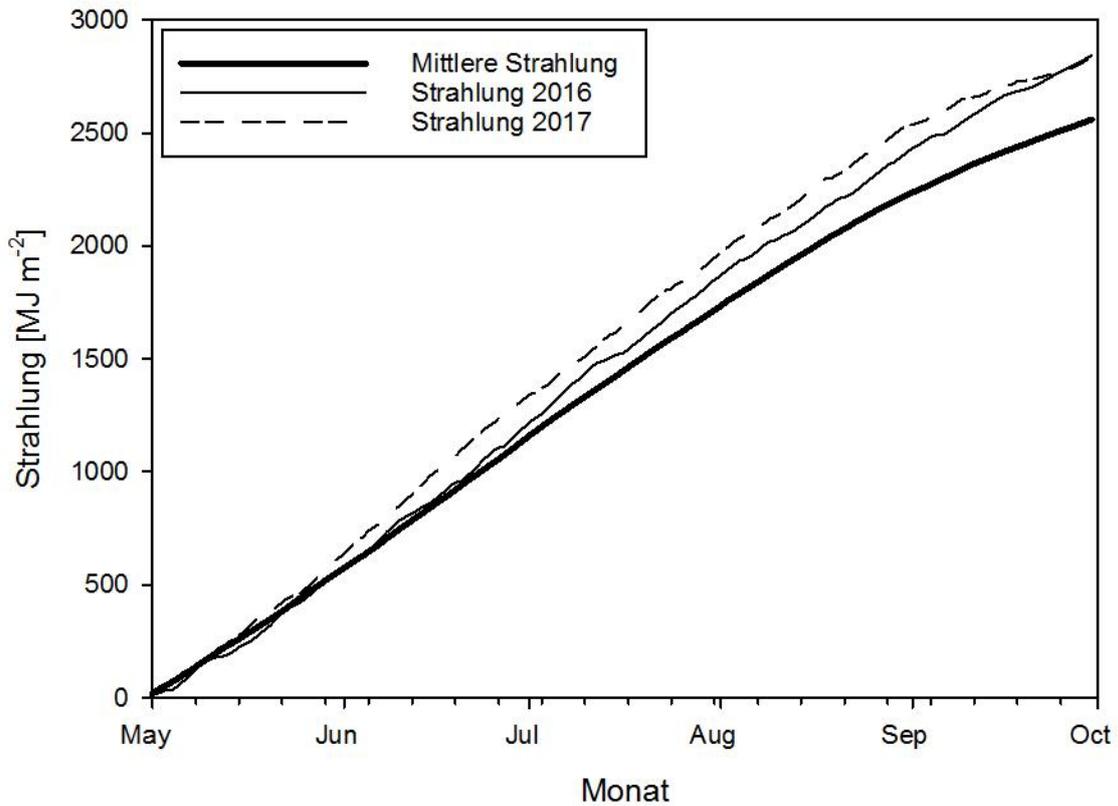


Abbildung 7: Kumulierte Globalstrahlung der Vegetationsperiode im Durchschnitt von 1991-2017 und der Jahre 2016 und 2017.

5.2 Feldversuch

Bevor die Ergebnisse des Feldversuchs im Detail präsentiert werden sei festgehalten, dass im Jahr 2016 zu Beginn des Vegetationszeitraums 151kg Nmin-Stickstoff pro Hektar im Boden waren. Im Folgejahr betrug der Stickstoffvorrat zu Vegetationsbeginn nur mehr 66kg Nmin pro Hektar bei ungedüngten und 139kg Nmin pro Hektar bei den im Vorjahr maximal gedüngten Parzellen. Daher waren 2017 signifikante Unterschiede öfter und deutlicher zu beobachten, als im ersten Versuchsjahr. Die statistischen Gruppierungen dazu, sind in den Grafiken mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet. Die statistische Durchführung ist in Punkt 4.5 nachzulesen.

5.2.1 Phänologie

Als erstes Ergebnis ist in Abbildung 8 die phänologische Entwicklung der Maispflanzen bei den Jahren 2016 (a) und 2017 (b) zu betrachten. Dabei konnten zwischen den Düngungsstufen keine Unterschiede festgestellt werden.

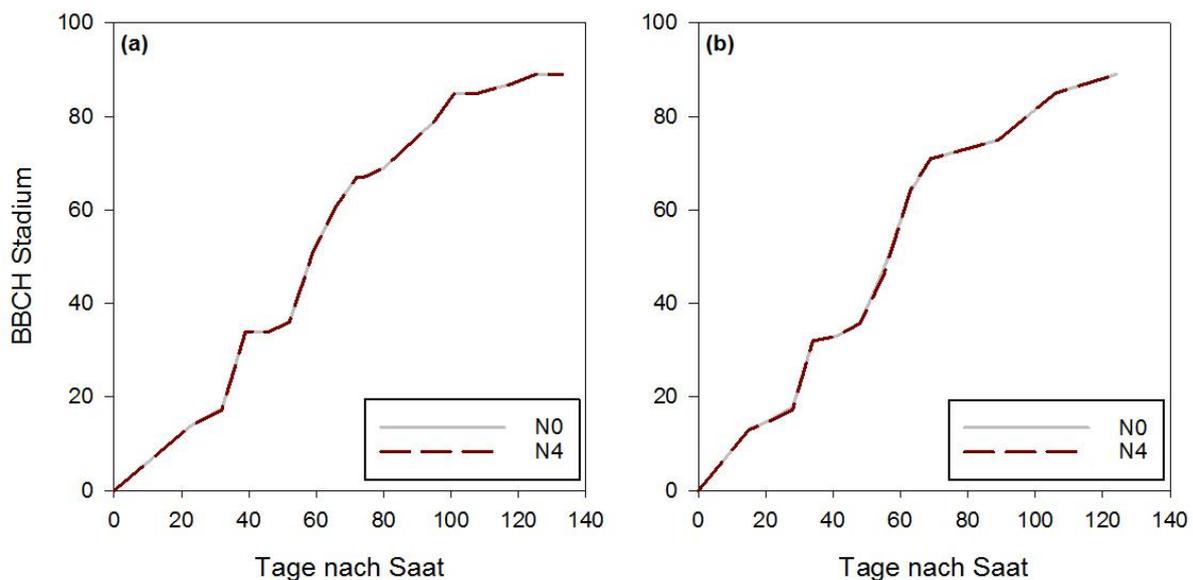


Abbildung 8: Phänologie der Maispflanzen im Zeitverlauf, der Jahre 2016 (a) und 2017 (b) jeweils ohne N-Düngung (N0) und mit 160kg N ha⁻¹(N4).

Um zu verdeutlichen, dass unabhängig vom N-Düngeangebot alle Entwicklungsstadien zeitlich gleich abliefen, sind die Ergebnisse der ungedüngten und der maximal gedüngten Parzellen dargestellt.

5.2.2 Blattanzahl

Die N-Düngung hatte ebenso keinen Einfluss auf die Anzahl der ausgebildeten Blätter. In Abbildung 9 sind an einzelnen Tagen zwar minimale Unterschiede zwischen den Düngungsstufen ersichtlich, jedoch zeichnet sich keinerlei Trend ab und es wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

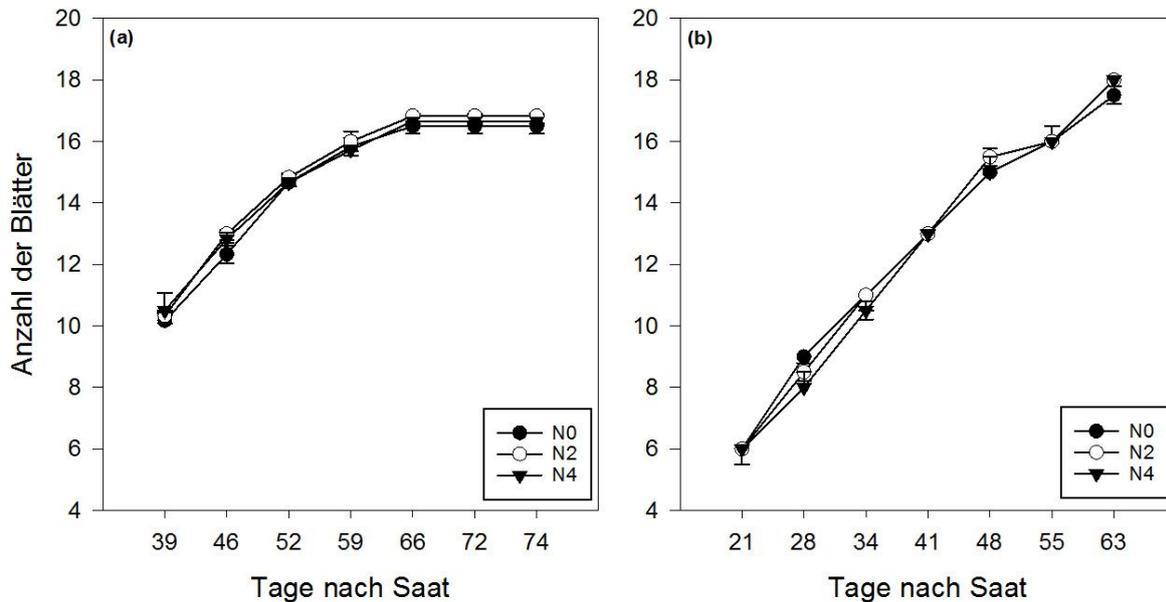


Abbildung 9: Blattanzahl im Zeitverlauf. Im Jahr 2016 (a) und 2017 (b) jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 80kg N ha⁻¹ N (N2) und mit 160kg N ha⁻¹ (N4).

Nachfolgend wird zugunsten der Übersichtlichkeit die Blattanzahl nur mehr als Mittelwert mit Fehlerbalken aus allen Düngungsstufen dargestellt.

5.2.3 Blattflächenindex

Im Gegensatz zur Blattanzahl waren beim Blattflächenindex, der in Abbildung 10 dargestellt ist, signifikante Unterschiede zwischen gedüngten und ungedüngten Parzellen messbar. Diese wurden im Jahr 2016 an den Tagen 64 und 77 nach der Saat festgestellt, im Folgejahr nur am Tag 63 nach der Saat.

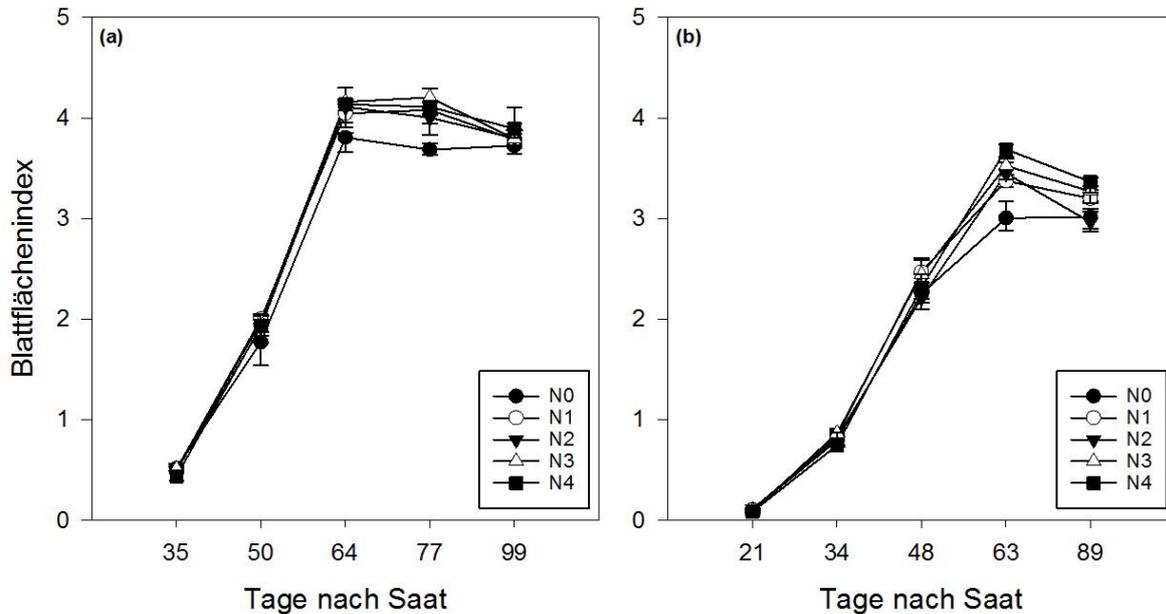


Abbildung 10: Verlauf des Blattflächenindex der Jahre 2016 (a) und 2017 (b) jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha⁻¹ (N1), mit 80kg N ha⁻¹ (N2), mit 120kg N ha⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha⁻¹ (N4).

Zwischen den N-gedüngten Parzellen konnten in beiden Jahren keine signifikanten Unterschiede gemessen werden. Um den Zeitpunkt der Blüte lag der maximale Blattflächenindex im ersten Versuchsjahr bei 4,45 (N3) und im darauffolgenden Jahr bei 3,88 (N1). Der minimale Blattflächenindex zur Blüte lag im Jahr 2016 bei 3,49 (N0) und im Jahr 2017 bei 2,72 (N0).

5.2.4 Oberirdische Biomasse

Bei der getrockneten oberirdischen Biomasse konnte, wie in Abbildung 11 zu sehen, zum Erntezeitpunkt nur im Jahr 2017 ein signifikanter Unterschied gemessen werden. Dieser war nur zwischen ungedüngten und gedüngten Parzellen vorhanden.

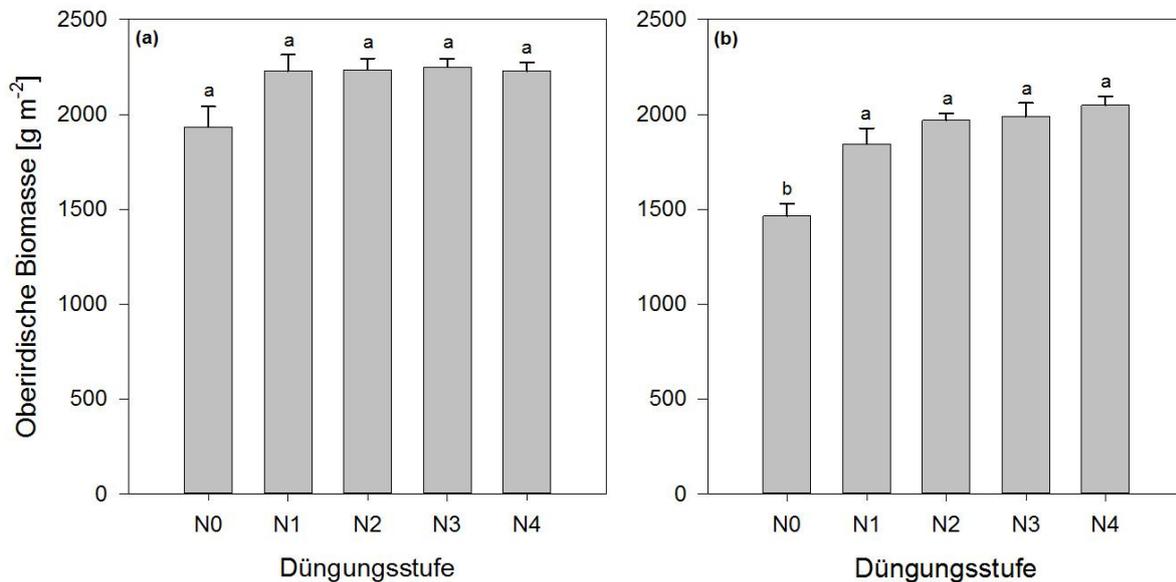


Abbildung 11: Oberirdische Biomasse zum Erntezeitpunkt der Jahre 2016 (a) und 2017 (b), jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha⁻¹ (N1), mit 80kg N ha⁻¹ (N2), mit 120kg N ha⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha⁻¹ (N4).

Der absolut höchste Biomasseertrag konnte mit 2409,12 g m⁻² im Jahr 2016 in der Düngungsstufe N1 gemessen werden. Zweijährig ungedüngte Parzellen wiesen einen Biomasseertrag von 1393,95 g m⁻² auf. Bei voller N-Düngung wurden im zweiten Versuchsjahr 2156,95 g m⁻² oberirdische Biomasse festgestellt.

5.2.5 Blatt und Stängelbiomasse

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse aus dem Feldversuch dazu nicht im Detail präsentiert. Im Jahr 2016 lagen zur Ernte sowohl bei der Blatt- als auch bei der Stängelbiomasse keine signifikanten Unterschiede vor. Im Folgejahr konnten für beide Organe signifikante Unterschiede festgestellt werden. Diese waren zwischen den ungedüngten und den maximal gedüngten Parzellen am stärksten ausgeprägt.

5.2.6 Kornertrag

Als wichtigstes agronomisches Merkmal einer Nutzpflanze ist der Kornertrag von beiden Versuchsjahren in Abbildung 12 dargestellt.

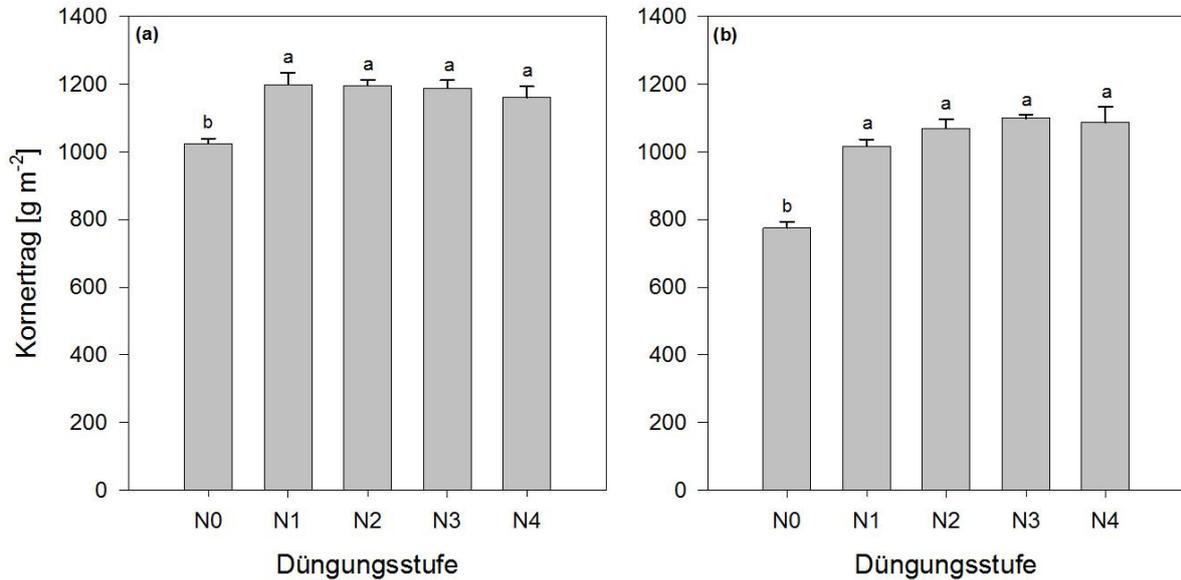


Abbildung 12: Kornertrag im Jahr 2016 (a) und 2017 (b), jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha⁻¹ (N1), mit 80kg N ha⁻¹ (N2), mit 120kg N ha⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha⁻¹ (N4).

Für beide Jahre gilt, dass signifikante Unterschiede nur zwischen ungedüngten und gedüngten Parzellen gemessen wurden. Die gedüngten Parzellen befanden sich alle innerhalb einer statistischen Gruppe. Der maximale Kornertrag lag im Jahr 2016 (N1) bei 1295,3g m⁻² und im Jahr 2017 (N4) bei 1184,4g m⁻². Der geringste Ertrag konnte in beiden Jahren bei der ungedüngten Variante gemessen werden, im Jahr 2016 lag dieser bei 1001,7g m⁻² und im Folgejahr bei 703,7g m⁻².

5.2.7 Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse

Wie viel Stickstoff die Pflanzen bis zur Ernte in ihre Biomasse einlagern konnten, ist in Abbildung 13 dargestellt.

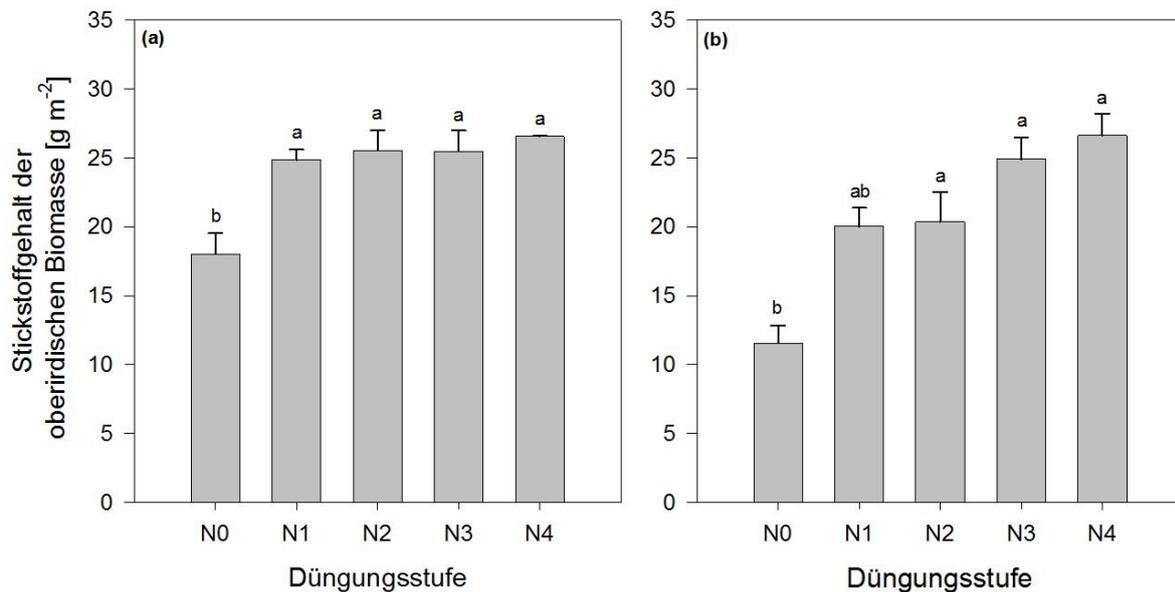


Abbildung 13: Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse zum Erntezeitpunkt für die Jahre 2016 (a) und 2017 (b), jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha⁻¹ (N1), mit 80kg N ha⁻¹ (N2), mit 120kg N ha⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha⁻¹ (N4).

Im Jahr 2016 konnte ein signifikanter Unterschied für den Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse nur zwischen ungedüngten und gedüngten Varianten gemessen werden. In diesem Jahr wurde der niedrigste Stickstoffgehalt mit 15,57g N m⁻² bei N0 und der höchste Stickstoffgehalt mit 28,71g N m⁻² bei N3 erhoben. Im Folgejahr waren signifikante Unterschiede zwischen der ungedüngten Variante und den mit 80-160kg N ha⁻¹ Stickstoff gedüngten Varianten festzustellen. Dabei belief sich der niedrigste N-Gehalt mit 10,89g N m⁻² auf die ungedüngte Variante und der höchste N-Gehalt auf die maximal gedüngte Variante mit 29,81g N m⁻².

5.2.8 Stickstoffgehalt Korn

Nachdem im vorigen Abschnitt der Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse zur Ernte präsentiert wurde, wird in Abbildung 14 ebenso zum Erntezeitpunkt der Stickstoffgehalt des Korns betrachtet. Im Jahr 2016 wurden ähnlich wie bei der oberirdischen Biomasse signifikante Unterschiede nur zwischen der ungedüngten und den gedüngten Varianten gemessen. Dabei wurde die maximale Stickstoffaufnahme ins Korn mit $19,91\text{g N m}^{-2}$ bei der Variante mit einer Düngung von 40kg N ha^{-1} Stickstoff festgestellt.

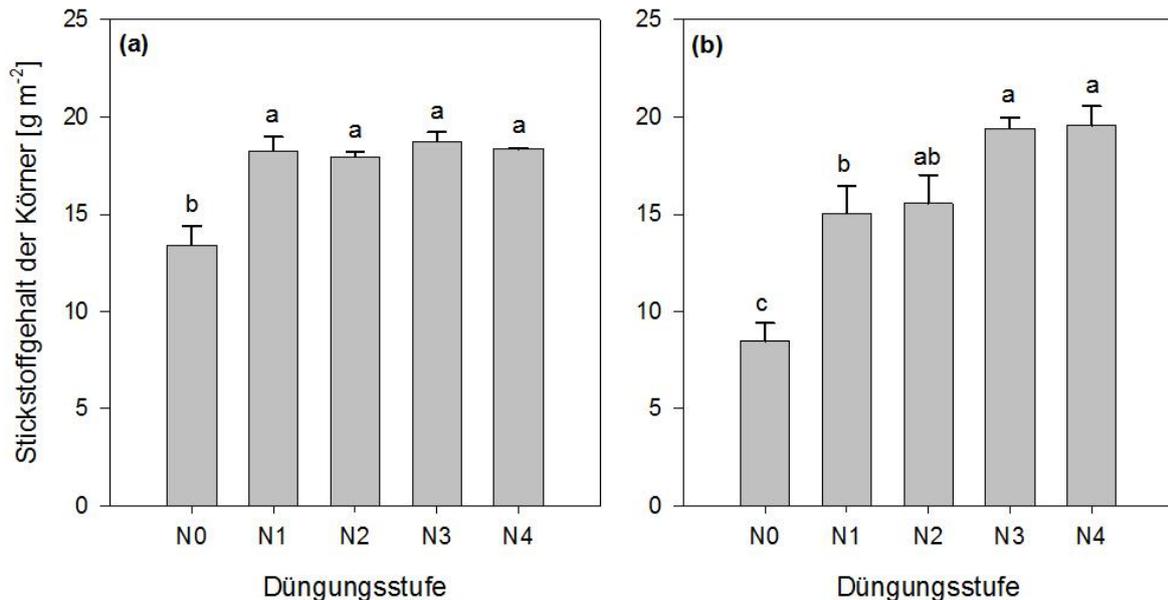


Abbildung 14: Stickstoffgehalt der Körner zum Erntezeitpunkt für die Jahre 2016 (a) und 2017 (b), jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha^{-1} (N1), mit 80kg N ha^{-1} (N2), mit 120kg N ha^{-1} (N3) und mit 160kg N ha^{-1} (N4).

Im Folgejahr konnten ebenso signifikante Unterschiede zwischen den ungedüngten und den gedüngten Parzellen festgestellt werden, des Weiteren waren diese zwischen der Variante mit 40kg N ha^{-1} und den Varianten mit $120\text{-}160\text{kg N ha}^{-1}$ messbar. Der maximale Stickstoffgehalt im Korn wurde bei der Ernte 2017 in der höchsten N-Düngungsstufe mit $21,41\text{g N m}^{-2}$ gemessen werden.

5.2.9 Boden

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse von Bodenstickstoff und Bodenwasser aus dem Feldversuch zusammen mit den Simulationsergebnissen in den Punkten 5.4.9 und 5.4.10 präsentiert.

5.3 Initialisierung und Parametrisierung der Pflanzenwachstumsmodelle

In folgendem Abschnitt sind die von den Standardwerten veränderten Parameter aufgelistet. Dabei wurde eine Einteilung in Boden, Management und genetische Parameter vorgenommen.

Sofern nicht explizit erwähnt, wurden für beide Modelle und beide Jahre dieselben Parameter verwendet.

5.3.1 Boden

Um die Ausgangsparameter des Bodens vorzugeben, wurden die Daten aus der ersten Bodenprobenahme des jeweiligen Jahres verwendet, die Termine dazu können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 6: Auflistung der Inputparameter für Bodenwasser, Wassersättigung (SAT), Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP), alle Angaben sind volumetrische. Wassergehalte ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Horizont	Bodenwasser 2016 - Start	Bodenwasser 2017 - Start	SAT	FK	PWP
0-10cm	0,28	0,16	0,37	0,32	0,16
10-30cm	0,30	0,33	0,41	0,36	0,15
30-60cm	0,31	0,30	0,45	0,40	0,20
60-90cm	0,28	0,26	0,37	0,32	0,15
90-120cm	0,23	0,22	0,35	0,30	0,13

In Tabelle 6 sind die Inputparameter des Bodenwassers aufgelistet. Dabei handelt es sich bei den Angaben wie in (Formel 4.5) erklärt, um volumetrische Wassergehalte. Wassersättigung, Feldkapazität und permanenter Welkepunkt sind konstante Parameter, die für beide Simulationsjahre gültig sind. Die Wasserversorgung ist zum Beginn der Vegetation für alle Düngungsstufen gültig.

Tabelle 7: Auflistung der horizontierten Inputparameter für Bodenstickstoff (kg Nmin ha^{-1}) zu Simulationsbeginn ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha^{-1} (N1), mit 80kg N ha^{-1} (N2), mit 120kg N ha^{-1} (N3) und mit 160kg N ha^{-1} (N4).

Horizont	2016 N0-N4	2017 N0	2017 N1	2017 N2	2017 N3	2017 N4
0-10cm	12,61	12,30	15,13	16,15	14,62	17,32
10-30cm	25,22	24,59	30,27	32,30	29,25	34,63
30-60cm	50,37	15,65	20,79	22,80	25,03	31,07
60-90cm	34,11	7,04	11,51	17,06	14,92	29,42
90-120cm	29,11	6,43	13,53	22,84	15,08	26,39
0-120cm	151,43	66,00	91,23	111,16	98,91	138,83

In Tabelle 7 sind die Inputparameter bezüglich Bodenstickstoff in kg Nmin ha^{-1} aufgelistet. Diese geben den Modellen vor, wie hoch die Stickstoffversorgung zu Beginn der Simulation im Boden ist. Für 2016 sind die Werte von N0-N4 gleich, da die Düngung erst nach der ersten Bodenprobe stattgefunden hat. APSIM erfordert die Aufteilung des Bodenstickstoffs in Nitrat und Ammonium. In iCrop werden Gesamtstickstoffgehalte angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und dem sehr geringen Anteil an Ammoniumstickstoff sind hier nur Gesamtstickstoffgehalte aufgelistet.

Beide Modelle benötigen zur Simulation des organisch gebundenen Stickstoffs einen weiteren Parameter. APSIM verlangt hierfür den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC), iCrop den in der organischen Substanz gebundenen Stickstoff (NORG). Beide sind gemeinsam mit der Lagerungsdichte des Bodens (BD) in Tabelle 8 aufgelistet. TOC wurde bei der Nmin Analyse durch die AGES untersucht, der Parameter NORG wurde mit einem für die Region typischen C:N Verhältnis von 15:1 aus TOC berechnet und aufgrund von Erfahrungswerten je nach Horizont angepasst.

Tabelle 8: Auflistung der Bodeninputparameter TOC, NORG und BD.

Horizont	TOC [%]	NORG [%]	BD [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
0-10cm	1,92	0,14	1,37
10-30cm	1,72	0,14	1,50
30-60cm	1,49	0,10	1,49
60-90cm	1,06	0,06	1,42
90-120cm	0,44	0,06	1,48

Die in Tabelle 8 aufgelisteten Bodenparameter, sind konstant und gelten für beide Versuchsjahre.

Alle anderen Bodeninputparameter beider Modelle sind von den voreingestellten Werten nicht verändert worden.

5.3.2 Management

Grundsätzlich finden sich in den Managementparametern alle Maßnahmen, die am Feld durchgeführt wurden, wieder. Die Inputs für den Bereich Management können Abschnitt 4.3 entnommen werden. 2016 wurde keine Berechnung durchgeführt. Die *Trichogramma brassicae* Applikation, das Hacken, die Grunddüngung und der Pflanzenschutz wurden in der Parametrisierung nicht berücksichtigt, da diese Maßnahmen nicht simuliert werden können.

5.3.3 Genetische Parameter

Beide Modelle erfordern Werte, die die phänologischen, morphologischen und physiologischen Eigenschaften der Sorten vorgeben. Diese werden als genetische Parameter bezeichnet. Die Anzahl und Eigenschaften der genetischen Parameter ist zwischen den Modellen unterschiedlich. Wie viele Parameter in den verwendeten Modellen angegeben werden können, ist in 2.4 "Vergleich der eingesetzten Modelle" aufgelistet. Um die Übersichtlichkeit und Zugehörigkeit der genetischen Parameter zu wahren sind die geänderten und für den jeweiligen Abschnitt relevanten Werte im Teil 5.4 "Simulationsergebnisse" aufgelistet. Die unveränderten Standardwerte der Modelle sind den wie in Punkt 4.5 aufgelisteten Standardversionen der Simulationsprogramme zu entnehmen.

5.4 Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationen präsentiert. Dabei beinhalten die Grafiken auch die zugehörigen Ergebnisse aus dem Feldversuch, um im Anschluss Vergleiche ziehen zu können. Zu Beginn sei festgehalten, dass nicht alle Ergebnisse präsentiert werden können und vermehrt Grafiken zu 2017 und den Düngungsstufen N0 und N4 dargestellt sind. Durch den Abschnitt 5.2 wurde ersichtlich, dass im Feldversuch signifikante Unterschiede vor allem in diesem Jahr und diesen Düngungsstufen zu erkennen waren.

5.4.1 Phänologie

Wie bereits in Punkt 5.2.1 gezeigt hatte die N-Düngung in beiden Versuchsjahren keinen Einfluss auf die phänologische Entwicklung der Maispflanzen. Dieses Bild bestätigte sich auch in den Simulationen, die Phänologie wurde aufgrund der N-Düngung nicht unterschiedlich simuliert. In Tabelle 9 ist die Abweichung der Simulationen dreier wichtiger phänologischer Entwicklungsstufen gegenüber den gemessenen Werten dargestellt.

Tabelle 9: Gemessene und simulierte (iCrop, APSIM) Ergebnisse der Phänologie aller Düngungsstufen, in Tagen nach Saat (DAP).

BBCH Stadium	Gemessen (DAP)	iCrop (+/- DAP)	APSIM (+/- DAP)
2016			
Koleoptile durchbricht Erdoberfläche - 10	11	+2	-2
Vollblüte - 65	71	+0	+1
Physiologische Reife - 87	142	-1	+3
2017			
Koleoptile durchbricht Erdoberfläche - 10	7	+1	+0
Vollblüte - 65	64	+2	+0
Physiologische Reife - 87	124	+7	+13

Die Phänologie wurde 2016 von beiden Modellen realitätsnah simuliert, es waren Abweichungen von maximal +3/-2 Tagen zu den gemessenen Werten festzustellen.

Im Jahr 2017 wichen die Simulationsergebnisse bis zur Blüte ebenso gering ab. Der Zeitpunkt der physiologischen Reife trat bei iCrop 7 Tage, in APSIM erst 13 Tage nach den gemessenen Werten ein. Dabei muss festgehalten werden, dass der Erntezeitpunkt in diesem Jahr sehr früh gewählt wurde.

Tabelle 10: Geänderte genetische Parameter hinsichtlich Phänologie.

	Parameterbeschreibung	Wert	Standard
iCrop			
bdEMREJU	Biologische. Tage von Koleoptile bis Ende Jugendentwicklung (bd)	7	8
bdSILPM	Biologische Tage v. Blüte bis physiologische Reife (bd)	34	22,3
APSIM			
tt_emerg_to_endjuv	Grad Tage v. Koleoptile b. Ende Jugendentw. (°Cd)	220	185
tt_flower_to_start_grain	Grad Tage v. Blüte b. Beginn Kornfüllung (°Cd)	70	150
tt_flower_to_maturity	Grad Tage v. Blüte b. physiologische Reife (°Cd)	960	691

5.4.2 Blattanzahl

Wie in Punkt 5.2.2 erwähnt, hatte die N-Düngung am Feld keinen Einfluss auf die Blattanzahl. Selbiges gilt auch für die Simulationsergebnisse. Beide Modelle simulierten bei unterschiedlichen N-Düngungsstufen keine Unterschiede in der Blattanzahl.

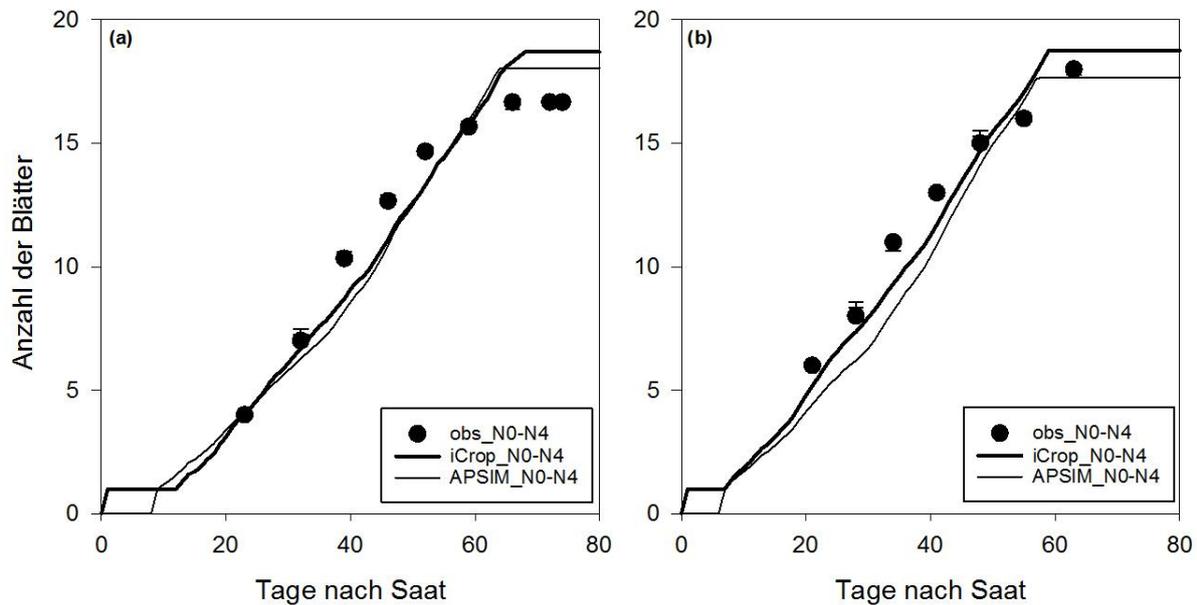


Abbildung 15: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Blattanzahl in den Jahren 2016 (a) und 2017 (b) für alle N-Düngungsstufen.

In Abbildung 15 ist zu sehen, dass beide Modelle den Verlauf der Blattanzahl simulieren konnten. In beiden Jahren unterschätzten die Modelle die Blattanzahl zwischen Tag 20 und 60 nach der Saat. Ab dem diesem Zeitpunkt war am Feld im Jahr 2016 mit 17 Blättern das Maximum der Blattanzahl erreicht. In diesem Jahr simulierte iCrop ein Maximum von 18,7 Blättern, APSIM erreichte ein Maximum von 18,05 Blättern. Im Folgejahr konnte der Mais am Feld ein Maximum von 18 Blättern erreichen, iCrop überschätzte auch in diesem Jahr mit einem Maximum von 18,76 Blättern, APSIM hingegen unterschätzte das Ergebnis mit einem Maximum von 17,66 Blättern.

Tabelle 11: Wichtige und geänderte genetische Parameter betreffend Blattanzahl.

	Parameterbeschreibung	Wert	Standard
iCrop			
Phyllochron (phyl)	Kumulative Temp. zur Entfaltung eines Blattes (°C)	38,9	38,9
APSIM			
leaf_app_rate1	Grad Tage zur Entfaltung eines Blattes (°Cd)	50,0	65

5.4.3 Blattflächenindex

Am Feld wurden wie in Punkt 5.2.3 gezeigt beim Blattflächenindex (LAI) in beiden Jahren signifikante Unterschiede zwischen ungedüngten und gedüngten Parzellen gemessen. Dazu sind in Abbildung 16 die Simulationsergebnisse des Jahres 2016 dargestellt.

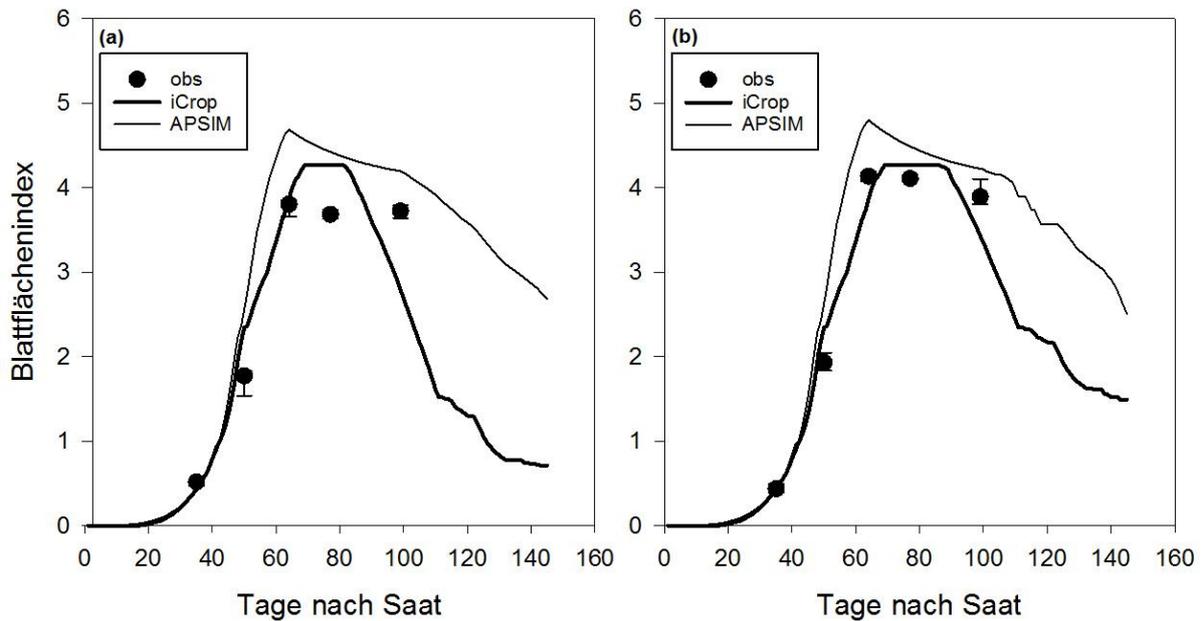


Abbildung 16: Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Blattflächenindizes aus dem Jahr 2016, jeweils ohne N-Düngung (a) und mit 160kg N ha⁻¹(N4).

Beide Modelle konnten den Blattflächenindex bis zur zweiten Messung am Feld gut simulieren. Danach überschätzte APSIM den Blattflächenindex sowohl bei ungedüngten als auch bei gedüngten Parzellen. Auch iCrop überschätzte den Blattflächenindex bei ungedüngten Parzellen. Bei der gedüngten Variante lieferte iCrop realitätsgetreue Ergebnisse, die Abnahme des Blattflächenindex trat jedoch zu früh ein.

Bei der ungedüngten Variante lag der maximale LAI zur Blüte (DAP 64) bei 3,88, mit N-Düngung konnte ein Wert von 4,26 erreicht werden. iCrop lieferte für beide Varianten einen maximalen Blattflächenindex von 4,27. APSIM simulierte ein Maximum von 4,69 ohne N-Düngung bzw. 4,80 bei der intensivsten N-Düngung.

Anpassungen der genetischen Parameter betreffend Blattflächenindex wurden nicht durchgeführt.

5.4.4 Oberirdische Biomasse

In Abbildung 17 ist der Simulationsverlauf der oberirdischen Biomasse aus dem Jahr 2017 dargestellt. Bei der ungedüngten Variante lieferte iCrop kein realitätsnahes Ergebnis, statt der am Feld gemessenen $1590,4\text{g m}^{-2}$ zur Ernte, wurden $1798,1\text{g m}^{-2}$ simuliert. APSIM erreichte zur Ernte eine oberirdische Biomasse von $1393,7\text{g m}^{-2}$. Bei der gedüngten Variante konnten zur Erntereife beide Modelle realitätsnahe Ergebnisse liefern. iCrop simulierte $2141,8\text{g m}^{-2}$, APSIM $1993,6\text{g m}^{-2}$ und am Feld wurden $1992,03\text{g m}^{-2}$ gemessen.

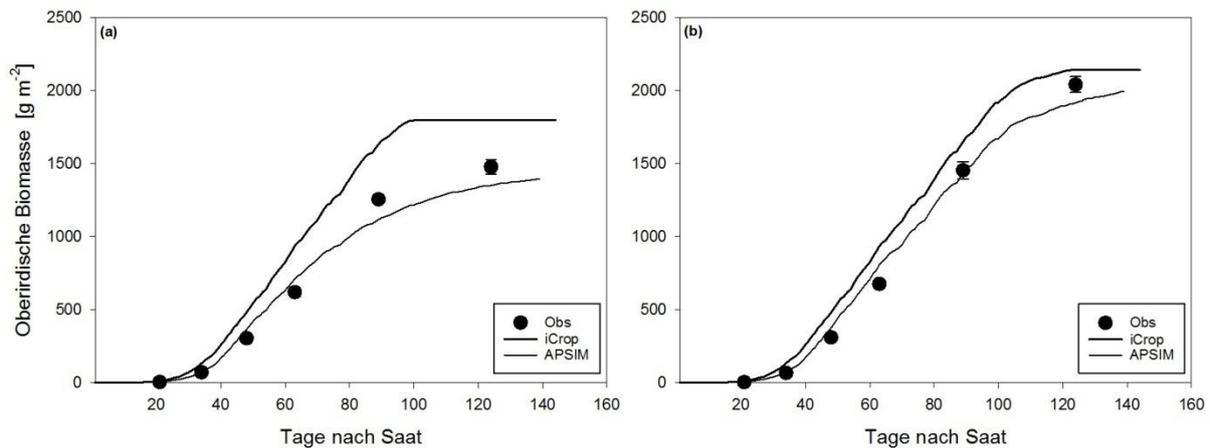


Abbildung 17: Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Ergebnisse der oberirdischen Biomasse im Jahr 2017, in den Varianten ohne N-Düngung (a) und mit 160kg N ha^{-1} (b).

Alle Simulationsergebnisse zur Erntereife sind in Abbildung 18 als lineare Regression dargestellt. Diese macht den Einfluss einer Variable auf eine Zielvariable durch eine lineare Funktion sichtbar (Frost, 2018). In allen folgenden Darstellungen von Regressionen ist auch der ideale Zusammenhang $R^2=1$ (als strichlierte Gerade) aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass die tatsächliche oberirdische Biomasse von iCrop mit einer Wahrscheinlichkeit von 85% und von APSIM mit einer Wahrscheinlichkeit von 93% simuliert werden konnte. Ein starker Ausreißer wurde bei iCrop aufgezeigt. Es wurden 1798g m^{-2} simuliert, die tatsächliche oberirdische Biomasse lag jedoch bei 1478g m^{-2} , dabei handelte es sich um die niedrigste Düngungsstufe im Jahr 2017.

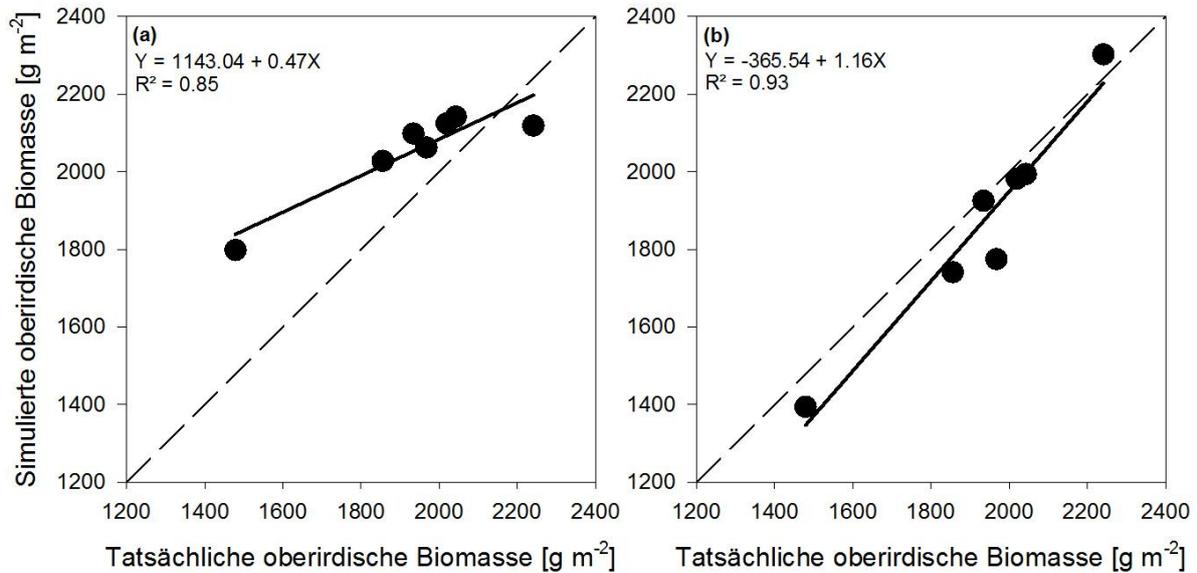


Abbildung 18: Simulierte und tatsächliche oberirdische Biomasse aller N-Düngungsstufen beider Jahre zum Erntezeitpunkt, dargestellt mittels linearer Regressionsgeraden für iCrop (a) und APSIM (b).

Um zu verstehen, warum von den Modellen zu gewissen Zeitpunkten realitätsfern simuliert wurde, muss die oberirdische Biomasse in ihre Teilbereiche Korn, Blatt und Stängel unterteilt werden. Dies erfolgt in den Abschnitten 5.4.5 und 5.4.6, ebenso wie die Auflistung der zugehörigen veränderten genetischen Parameter.

5.4.5 Kornertrag

Wie schon in Abschnitt 5.2.6 erwähnt, ist der Kornertrag einer Nutzpflanze als ihr wichtigstes agronomisches Merkmal anzusehen. Deshalb wurden die Simulationsergebnisse dazu ebenso mittels linearer Regression analysiert. Diese ist in Abbildung 19 dargestellt.

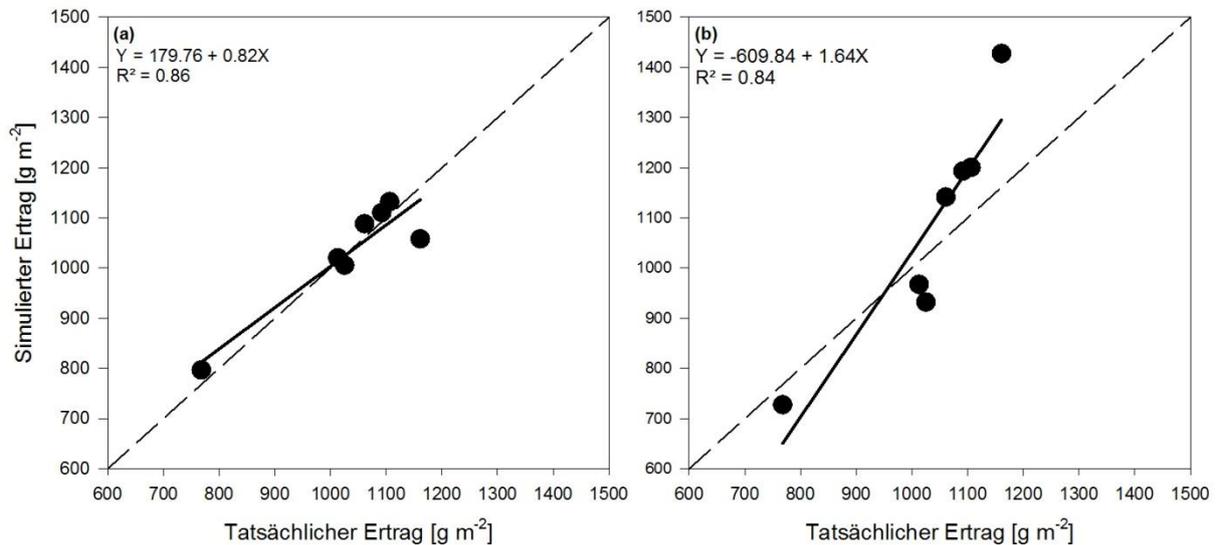


Abbildung 19: Simulierte und tatsächliche Erträge aller N-Düngungsstufen beider Jahre, dargestellt mittels linearer Regressionsgeraden für iCrop (a) und APSIM (b).

Betrachtet man das Bestimmtheitsmaß (R^2) so wird ersichtlich, ein linearer Zusammenhang zwischen dem modellierten und dem tatsächlichen Ertrag besteht, da das Bestimmtheitsmaß in der Nähe von 1 liegt. iCrop konnte den tatsächlichen Ertrag mit einer Wahrscheinlichkeit von 86% und APSIM mit einer Wahrscheinlichkeit von 84% simulieren. Ein starker Ausreißer war in der Regressionsanalyse von APSIM ersichtlich, hier lag der simulierte Ertrag bei 1427g m^{-2} der tatsächliche Ertrag jedoch bei 1161g m^{-2} , es handelte sich dabei um die maximale Düngungsstufe von 2016.

5.4.6 Biomasse von Blättern und Stängel

In Abbildung 20 ist dargestellt wie sich die oberirdische Biomasse auf Blätter und Stängel verteilt.

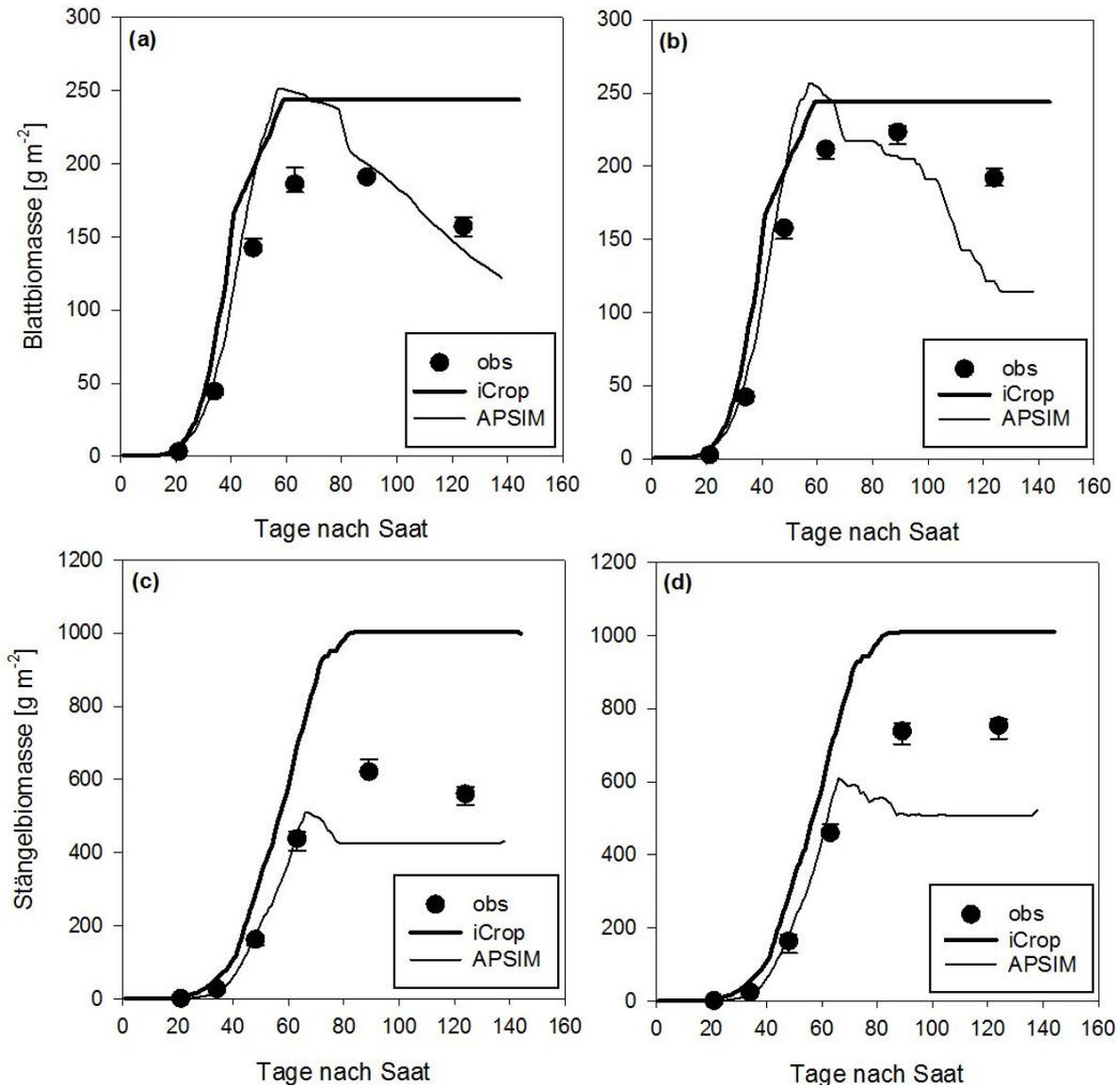


Abbildung 20: Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Blatt- und Stängelbiomassen im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a, c) und mit 160kg N ha^{-1} (b, d).

Bei der Betrachtung der Grafik ist darauf zu achten, dass APSIM auch den Gewichtsverlust der Organe durch das Absterben sowie die Retranslokation von Kohlenstoff und Stickstoff aus vegetativen Organen in die Körner simuliert. iCrop simuliert das Absterben von Blättern und Stängel ebenso, dies wird aber nicht in Outputdaten dargestellt. Auch die gemessenen Felddaten beinhalten die abgestorbene Biomasse der Organe.

Der Verlauf der Blattbiomasse wurde von beiden Modellen bis zum Tag 60 nach der Saat gut simuliert. Danach war die Gewichtszunahme der Blattbiomasse von beiden Modellen zu stark und die maximale Blattbiomasse wurde nahezu gleich überschätzt. Die Überschätzung

betrug in der ungedüngten Variante für iCrop/APSIM 52/60g m⁻² und in der gedüngten Variante für iCrop/APSIM 23/25g m⁻². iCrop simulierte zwischen den Düngungsstufen keine Unterschiede.

Bei der Betrachtung der Stängelbiomasse ist ersichtlich, dass iCrop sowohl die ungedüngten als auch die gedüngten Parzellen sehr stark überschätzte. Des Weiteren wurde von iCrop nur ein geringer Unterschied für die maximale Stängelbiomasse simuliert, dieser betrug 10g m⁻². APSIM lieferte bei der Simulation der Stängelbiomasse bis zum Tag 60 nach der Saat realitätsnahe Ergebnisse, danach wurde die Zunahme der Stängelbiomasse zu früh eingestellt und die Ergebnisse aus dem Feldversuch wurden unterschätzt.

Tabelle 12: Geänderte genetische Parameter betreffend oberirdischer Biomasse.

	Parameterbeschreibung	Wert	Standard
iCrop			
TBRUE	Temp. Untergrenze f. Strahlungsnutzungseffizienz (°C)	8	10
TP1RUE	Optimale Temp. 1 f. Strahlungsnutzungseffizienz (°C)	15	25
KPAR	Lichtextinktionskoeffizient	0,6	0,53
APSIM			
RUE	Strahlungsnutzungseffizienz für alle Entwicklungsstufen (g MJ ⁻¹)	1,75	1,3-1,6

5.4.7 Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse

Im nächsten Schritt wurde darauf geachtet, wie der in der oberirdischen Biomasse eingelagerte Stickstoff simuliert wurde. Nähere Informationen dazu bietet Abbildung 21.

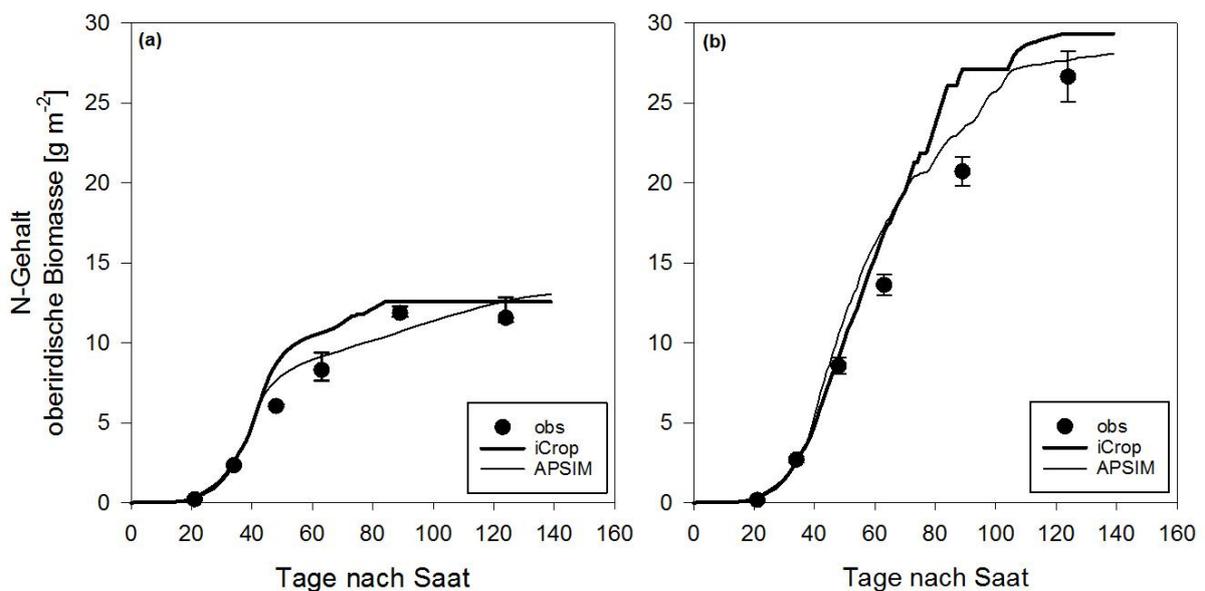


Abbildung 21: Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Ergebnisse der Stickstoffgehalte der oberirdischen Biomasse, im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a) und mit 160kg N ha⁻¹ (b).

Beide Modelle konnten den Verlauf der N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse sowohl bei den ungedüngten, als auch bei den gedüngten Parzellen realitätsnah simulieren. Dies traf vor allem auf den Beginn der Simulationen bis zum Tag 50 nach der Saat zu. Danach wurde die Zunahme des in der Biomasse eingelagerten Stickstoffs zu rasch simuliert. Die zur Ernte gemessenen Stickstoffgehalte wurden jedoch gut erreicht und konnten bei der ungedüngten Variante von beiden Modellen nahezu genau simuliert werden. Bei der gedüngten Variante überschätzten die Modelle. iCrop prognostizierte $29,34\text{g N m}^{-2}$, APSIM $28,07\text{g N m}^{-2}$ und am Feld wurden $26,65\text{g N m}^{-2}$ gemessen.

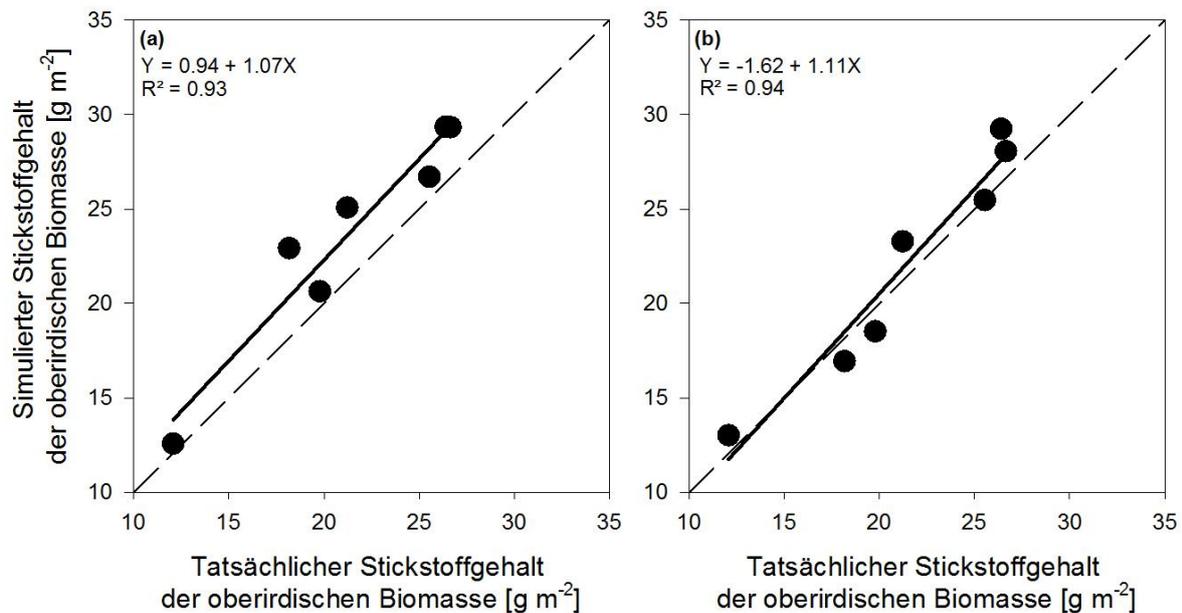


Abbildung 22: Simulierte und tatsächliche Stickstoffgehalte der oberirdischen Biomasse aller N-Düngungsstufen beider Jahre zum Erntezeitpunkt, dargestellt mittels linearer Regressionsgeraden für iCrop (a) und APSIM (b).

Bei der Betrachtung der in Abbildung 22 dargestellten linearen Regression aller simulierten Ergebnisse zur Ernte wird ersichtlich, dass iCrop mit einer Wahrscheinlichkeit von 93% und APSIM mit einer Wahrscheinlichkeit von 94% den tatsächlichen Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse simulieren konnte.

5.4.8 Stickstoffgehalt Korn

Am Feld wurden im Jahr 2017, wie in Punkt 5.2.8 ersichtlich, drei signifikant unterschiedliche Gruppierungen bei der Stickstoffaufnahme ins Korn gemessen. In Abbildung 23 sind die Simulationsverläufe dazu dargestellt.

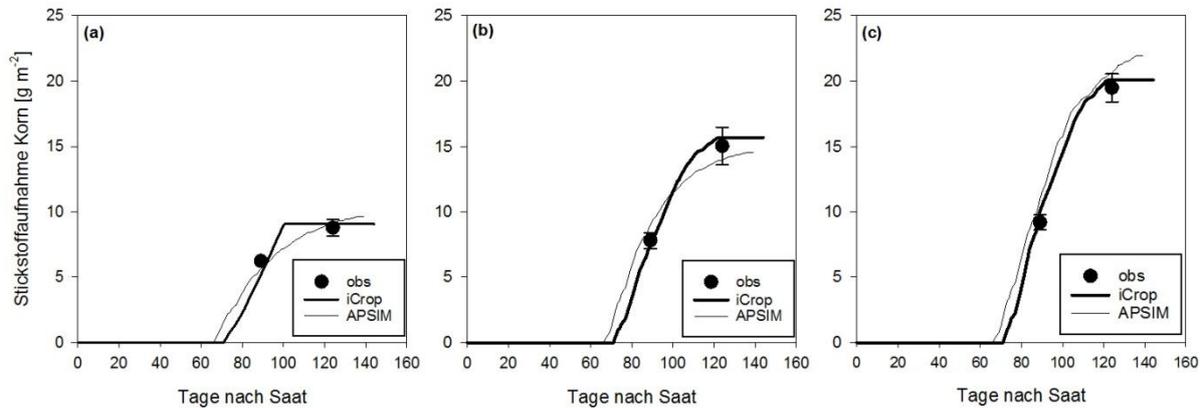


Abbildung 23: Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Stickstoffgehalte des Korns, im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a), mit 40kg N ha⁻¹ (b) und mit 160kg N ha⁻¹ (c).

Der Verlauf der Stickstoffaufnahme ins Korn konnte von beiden Modellen realitätsnah simuliert werden. Dabei traf iCrop in allen 3 dargestellten Düngungsstufen den gemessenen N-Gehalt nahezu genau. APSIM überschätzte den Endgehalt des Stickstoffs im Korn bei der ungedüngten und der mit 160kg N ha⁻¹ gedüngten Variante. Die Düngungsvariante mit 40kg N ha⁻¹ wurde von APSIM unterschätzt.

Tabelle 13: Veränderte genetische Parameter betreffend Stickstoffaufnahme der oberirdischen Biomasse.

	Parameterbeschreibung	Wert	Standard
iCrop			
SLNG	Ziel N-Gehalt der grünen Blätter pro Blattfläche (g N m ⁻²)	1,8000	1,3000
SNCG	Ziel N-Konzentration der grünen Stängelmasse (g N g ⁻¹)	0,0150	0,0535
GNCmin	Minimale N-Konzentration des Korns (g N g ⁻¹)	0,0110	0,0140
GNCmax	Maximale N-Konzentration des Korns (g N g ⁻¹)	0,0270	0,0140
APSIM			
n_conc_crit_leaf	Ziel N-Konzentration der grünen Blätter (g N g ⁻¹)	0,0552 0,0456 0,0432 0,0264 0,0108	0,0460 0,0380 0,0360 0,0220 0,0090
n_conc_max_leaf	Maximale N-Konzentration der grünen Blätter (g N g ⁻¹)	0,0550 0,0460 0,0430 0,0260 0,0110	0,0460 0,0380 0,0360 0,0220 0,0090
n_conc_crit_stem	Ziel N-Konzentration des Stängels (g N g ⁻¹)	0,0368 0,0304 0,0288 0,0176 0,0072	0,0460 0,0380 0,0360 0,0220 0,0090
n_conc_crit_grain	Ziel N-Konzentration des Korns (g N g ⁻¹)	0,0170	0,0150

5.4.9 Stickstoffbilanz

In den letzten beiden Abschnitten der Simulationsergebnisse wird ein Blick unter die Erde geworfen und dargestellt, wie Bodenstickstoff und Bodenwasser im Jahr 2017 simuliert wurden. Für ersteres wurde in Tabelle 14 eine Stickstoffbilanz erstellt, in der die gemessenen und simulierten Ergebnisse angeführt sind.

In einer Nährstoffbilanz werden die Zu- und Abgänge von Nährstoffen gegenübergestellt, um den Düngerbedarf annähernd ermitteln zu können (Berger et al., 2007).

Tabelle 14: Stickstoffbilanz der gemessenen und mit iCrop und APSIM simulierten Ergebnisse für das Jahr 2017, ohne N-Düngung (N0) und mit 160kg N ha⁻¹ (N4).

	N0			N4		
	Gemessen	iCrop	APSIM	Gemessen	iCrop	APSIM
	Boden-Nmin (kg Nmin ha⁻¹)			Boden-Nmin (kg Nmin ha⁻¹)		
Aussaat	66,00	66,00	66,00	138,83	138,83	138,83
Ernte	27,85	30,53	19,10	50,41	59,10	74,30
Gedüngt	0,00	0,00	0,00	160,00	160,00	160,00
	Pflanze-N (kg N ha⁻¹)			Pflanze-N (kg N ha⁻¹)		
Ernte	120,71	124,77	130,20	266,54	293,43	280,70
	Nmin-Umwandlung (kg Nmin ha⁻¹)			Nmin-Umwandlung (kg Nmin ha⁻¹)		
Mineralisation		95,35	103,20		80,35	86,90
Denitrifikation		6,12	0,20		20,32	2,50
Ausgasung		0,00			4,80	
	Bilanz [kg Nmin ha⁻¹]			Bilanz [kg Nmin ha⁻¹]		
Bilanz	-82,55	-0,08	19,80	-18,12	-0,08	28,40

Bei der Betrachtung von Tabelle 14 ist ersichtlich, dass die Stickstoff-Umwandlungsprozesse im Boden nur bei den Modellen angeführt sind, da sie im Versuch nicht gemessen wurden.

Am Feld ergaben sich sowohl für die ungedüngte, als auch die gedüngte Variante eine negative Bilanz von -82,55kg Nmin ha⁻¹ bzw. -18,12kg Nmin ha⁻¹. iCrop simulierte eine ausgeglichene Bilanz, APSIM für beide Düngungsvarianten eine positive Bilanz von 19,80kg Nmin ha⁻¹ bei den ungedüngten, bzw. 28,40kg Nmin ha⁻¹ bei gedüngten Parzellen.

Betrachtet man den Nmin Gehalt zum Erntezeitpunkt im Boden, so wurden von iCrop realitätsnahe Ergebnisse simuliert, APSIM lag weiter von den gemessenen Ergebnissen entfernt. Die Mineralisation wurde von beiden Modellen bei der ungedüngten Variante stärker simuliert als bei der gedüngten. Die Denitrifikation wurde von iCrop in beiden Fällen deutlich stärker simuliert.

Die Dränung lag bei beiden Modellen bei 0, somit wurde kein Stickstoffverlust durch Auswaschung simuliert.

5.4.10 Bodenwasser

Den Abschluss der Präsentation der Ergebnisse bildet das Bodenwasser. Wie in Abbildung 24 zu sehen, waren beide Modelle in der Lage den Verlauf des Bodenwassers über die Vegetationszeit zu simulieren. Dabei zeigten beide Modelle ähnliche Verläufe. Zwischen Tag 70 und 90 nach der Saat wurden 109mm Niederschlag gemessen.

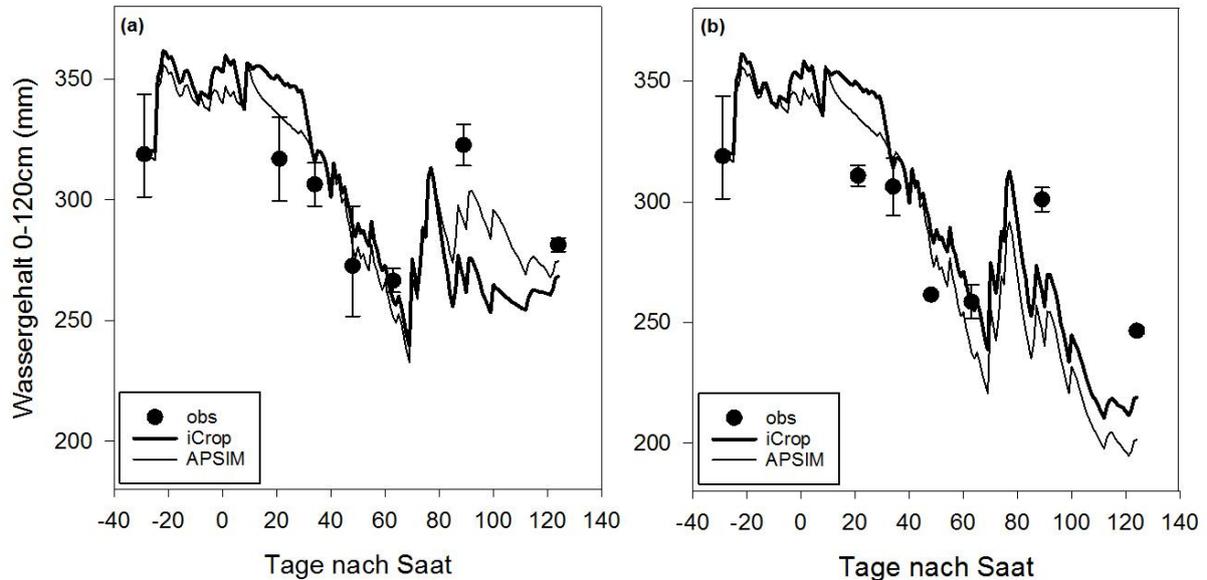


Abbildung 24: Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Wassergehalte des Bodenhorizonts von 0-120cm im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a), und mit 160kg N ha⁻¹ (b).

Grundsätzlich sind die gemessenen Wassergehalte des Bodenwassers vorsichtig zu betrachten, da wie die Fehlerbalken zeigen eine große Schwankungsbreite der Ergebnisse zu verzeichnen war.

Tabelle 15: Veränderte genetische Parameter betreffend der Wurzeln.

	Parameterbeschreibung	Wert	Standard
iCrop			
MEED	Maximale Wurzeltiefe (mm)	1200	1100
GRTDP	Maximales tägliches Tiefenwachstum der Wurzel (mm/bd)	25	33
APSIM	Keine Parameter verändert.		

6 Diskussion

Das Vorhaben der Studie war es, ein möglichst einfaches und verlässliches Modell zur Simulation von Pflanzenwachstum und Ertragsbildung von Mais zu finden. Dazu wurde ermittelt, wie gut die Pflanzenwachstumsmodelle APSIM und iCrop Felddaten berechnen konnten. Weiters sollte festgestellt werden, ob höhere Komplexität in der Modellstruktur zu besseren Ergebnissen führt und die erhöhte Komplexität gerechtfertigt ist.

6.1 Allgemeines

Besondere Sorgfalt wurde auf die Qualität der verwendeten Daten gelegt. Ein großer Teil der Daten wurde, wie in Teil 4.4 beschrieben, mit größter Genauigkeit selbst gemessen. Deshalb war für den zweijährigen Versuchszeitraum beste Datenqualität gegeben, wodurch die Modelle entsprechend parametrisiert werden konnten. Grundsätzlich wäre es wünschenswert den Versuch über einen längeren Zeitraum durchzuführen, um die Modelle gegen umfangreichere Daten zu testen.

6.2 Wetterbedingungen

Betrachtet man den Niederschlag im Vegetationszeitraum der Versuchsjahre, waren im Vergleich zum mittleren Niederschlag geringere Summen innerhalb eines Monats zu verzeichnen (Abbildung 5). Die Niederschlagssummen von Mai bis September lagen im Jahr 2016 14mm und im Jahr 2017 32mm unter dem langjährigen Mittel. Deshalb wurde im zweiten Versuchsjahr eine zweimalige künstliche Bewässerung durchgeführt, welche für den Standort als praxisüblich bezeichnet werden kann. Laut ([Kletzan et al., 2004](#)) stellt das Tullnerfeld ein wichtiges Bewässerungsgebiet dar.

Mit $+0,82^{\circ}\text{C}$ im Jahr 2016 und $+1,11^{\circ}\text{C}$ im Jahr 2017 lag die mittlere Temperatur zwischen Mai und September in beiden Versuchsjahren über dem langjährigen Mittel. Ebenso wurden im Vergleichszeitraum beider Versuchsjahre erhöhte Strahlungswerte festgestellt.

Betrachtet man die Wetterdaten im Überblick, so kann festgehalten werden, dass in der Vegetationsperiode der beiden Versuchsjahre die Niederschläge unter und die Temperatur- und Strahlungswerte über dem langjährigen und für die Region typischen Mittel lagen.

6.3 Phänologie

Bei unterschiedlicher Düngungsintensität konnten am Feld keine Unterschiede in der zeitlichen Ausprägung von Pflanzenmerkmalen festgestellt werden (Abbildung 8). Daraus kann geschlossen werden, dass die vorliegenden Stickstoffgehalte keinen Einfluss auf die Phänologie der Maispflanzen hatten. Dies wird auch von ([Jianyang und Shiqiang, 2013](#)) bestätigt, die in ihrem Experiment den Einfluss der N-Düngung auf die Phänologie unterschiedlicher

Pflanzen untersuchten. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass keine extrem niedrigen Stickstoffgehalte vorlagen, wodurch Beeinflussungen der Phänologie durchaus denkbar sind. Der während des gesamten Versuchszeitraums absolut niedrigste Stickstoffgehalt lag bei $26 \text{ kg N min ha}^{-1}$. Daher muss für sämtliche Aussagen betreffend N-Einfluss im vorliegenden Experiment berücksichtigt werden, dass sie im Minimum nur bis zu diesem Wert gelten.

Da beide Pflanzenwachstumsmodelle zur Simulation der Phänologie ausschließlich Temperatur und Strahlung heranziehen, wurde dieses Bild sowohl von APSIM als auch von iCrop bestätigt. Beide simulierten trotz unterschiedlichem Stickstoffangebot keinen Unterschied in der zeitlichen Ausprägung der Phänologie. Durch die Anpassung der genetischen Parameter konnten beide Modelle realitätsnahe Ergebnisse liefern (Tabelle 9). Ausnahme bildet die Abweichung der physiologischen Reife im Jahr 2017. Hier ist anzumerken, dass die Pflanzen zum Erntezeitpunkt noch relativ grün waren und die Ernte wahrscheinlich zu früh stattgefunden hat.

Bei APSIM wurden die genetischen Parameter in Richtung späterer Entwicklung geändert, bei iCrop wurden nur geringe Änderungen vorgenommen (Tabelle 10).

Nach der Anpassung der genetischen Parameter können beide Modelle als zur Simulation der Phänologie geeignet bezeichnet werden. Als Unterschied bleibt festzuhalten, dass die Änderung der genetischen Parameter in iCrop über die Excel Benutzeroberfläche einfacher durchzuführen ist als in APSIM über das XML-File.

6.4 Blattanzahl

Wie in Abschnitt 5.2.2 zu sehen ist, waren zwischen den Düngungsstufen minimale Unterschiede bei der Blattanzahl messbar. Diese waren jedoch statistisch nicht signifikant und es zeichnete sich keinerlei Trend ab. Daher ist davon auszugehen, dass die N-Düngung die Anzahl der Blätter nicht beeinflusste. Auch (McMaster, 2005) bestätigt in seinem Paper, dass mit dem für Mais gut erforschten Phyllochron die Entwicklung der Blattanzahl am besten charakterisiert werden kann. Da mit dem Phyllochron (siehe Abschnitt 2.2) eine Temperatursumme beschrieben wird, kann davon ausgegangen werden, dass die N-Düngung wenig Einfluss auf die Blattanzahl hat und Haupteinflussfaktor für Blattbildung/-anzahl die Temperatur darstellt. Ebenso wird in (McMaster, 2005) angemerkt, dass in Zukunft durch Forschungsgebiete wie die Genomforschung und Molekularbiologie besseres Verständnis gegenüber Blattanzahl und Phänologie im Allgemeinen vorhanden sein wird, da es diesbezüglich weiterhin offene Fragestellungen gibt.

Die Pflanzenwachstumsmodelle (siehe Abschnitt 5.4.2) simulierten bei unterschiedlicher N-Düngung ebenso keine Unterschiede in der Blattanzahl, da beide Modelle die Blattanzahl in Abhängigkeit der Temperatur berechnen und im Code keine Abhängigkeit zur Nährstoffversorgung besteht.

Um die maximale Blattanzahl korrekt zu simulieren, wurde der Parameter leaf_app_rate1 für APSIM von 65°Cd auf 50°Cd herabgesetzt. Dadurch wurde erreicht, dass zwischen der Entfaltung von zwei aufeinanderfolgenden Blättern weniger Temperatursumme benötigt wird, als in der Standardversion. Nachdem im Jahr 2017 mit der vorliegenden Parametrisierung gute Ergebnisse erzielt werden konnten, wurden daran keine Änderungen mehr vorgenommen, da in diesem Jahr der Einfluss der N-Düngung stärker ausgeprägt war.

6.5 Blattflächenindex

Im Feldversuch wurden bei der Ermittlung des Blattflächenindex signifikante Unterschiede zwischen ungedüngten und gedüngten Parzellen festgestellt (siehe Abschnitt 5.2.3). Deshalb kann behauptet werden, dass die N-Düngung Einfluss auf die Größe der Blattfläche hatte. Dieses Verhalten bestätigen auch (Plénet und Lemaire, 1999). In deren Experiment konnte festgestellt werden, dass ein empirischer linearer Zusammenhang zwischen dem aufgenommenen Stickstoff der oberirdischen Biomasse und dem Blattflächenindex besteht. Im Feldversuch wurde der maximale Blattflächenindex beider Jahre nicht in der höchsten Düngungsstufe gemessen, sondern im Jahr 2016 in der Düngungsstufe N1 und im Folgejahr in der Düngungsstufe N3. Aus diesem Grund muss, wie bereits in Punkt 5.2 erwähnt, abermals auf den enormen Nmin Vorrat im Boden zu Beginn des ersten Versuchsjahres hingewiesen werden. Dies erklärt, warum bei nur 40kg N ha⁻¹ Düngung der größte Blattflächenindex festgestellt wurde.

Bei der Simulation des Blattflächenindex (Abbildung 16) konnten beide Modelle bis zur Blüte realistische Ergebnisse abliefern. iCrop konnte bei der maximalen N-Düngungsstufe den maximalen Blattflächenindex zwar korrekt simulieren, jedoch zeigte es keine Unterschiede zwischen den N-Düngungsstufen auf. APSIM überschätzte den maximalen Blattflächenindex zwar stark, simulierte jedoch Unterschiede zwischen den N-Düngungsstufen und bestätigte somit auch den am Feld beobachteten Einfluss der N-Düngung auf den Blattflächenindex.

Nach der Berechnung von SLNG der iCrop Simulationsergebnisse wurde klar, dass der parametrisierte Wert von 1,8 zu keinem Zeitpunkt und bei keiner Düngungsstufe unterschritten wurde. Das bedeutet, dass die Blätter nie unter Stickstoffstress litten und erklärt, warum in allen Düngungsstufen derselbe Blattflächenindex erzielt werden konnte. In APSIM wurde durch den Vergleich der N-Konzentration der Blätter mit dem Parameter n_conc_crit_leaf ersichtlich, dass die Blätter bei der ungedüngten Variante stärker unter Stickstoffstress litten und sich der Blattflächenindex somit unterschiedlich ausprägte. Weiters bleibt festzuhalten, dass wie in Tabelle 13 ersichtlich n_conc_crit_leaf für fünf unterschiedliche Entwicklungsstufen definiert ist und somit dem sich über die Vegetationsperiode ändernden Bedarf an Stickstoff der Blätter gerecht wird. Hingegen ist SLNG bei iCrop ein für die gesamte Entwicklungsdauer fixer Parameter, wodurch der Stickstoffbedarf nicht für unterschiedliche Phasen

der Blattentwicklung angepasst wird. An dieser Stelle wird eine Schwäche durch die starke Simplifizierung in iCrop ersichtlich, denn die Vereinfachung der N-Bedarfs Parameter geht auf Kosten der Simulationsgenauigkeit.

Wie in (Chen et al., 2015) erklärt, wird während der Phase der Kornfüllung Stickstoff aus dem für die Photosynthese wichtigen RUBISCO Enzym der Blättern in das Korn verlagert. Durch die Stickstoffverlagerung kommt es zu einem schnelleren Absterben der Blätter. Je nachdem wie hoch der N-Gehalt und somit auch der Blattflächenindex der Pflanzen ist, desto länger kann die Pflanze Photosynthese betreiben und ihre Blätter grün halten. Wie in Abbildung 16 zu sehen, wird dieser Vorgang vor allem von iCrop simuliert. Hier kommt es bei der maximalen N-Düngungsvariante zu einer späteren Abnahme des Blattflächenindex, da SLNG später unterschritten wird. APSIM simuliert die Abnahme des Blattflächenindex für beide Düngungsvarianten nahezu gleich.

6.6 Oberirdische Biomasse

Aufgrund des bereits mehrfach erwähnten Stickstoffvorrats im Boden wurden für die oberirdische Biomasse im ersten Versuchsjahr keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Im Folgejahr konnten signifikante Unterschiede zwischen den ungedüngten und gedüngten Parzellen gemessen werden. Laut Internetdeckungsbeitrag-Rechner (www.idb.awi.bmlfuw.gv.at) lag der durchschnittliche Biomasseertrag (Niederösterreich) von Mais im Jahr 2017 bei 144dt/ha und somit nur knapp oberhalb der ungedüngten Variante im Studienversuch. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nicht überall die Möglichkeit der Bewässerung besteht, wodurch der Ertragsunterschied begründet werden kann.

Grundsätzlich zeigen die Versuchsergebnisse in Abbildung 11 deutlich, dass die N-Düngung Einfluss auf den Biomasseertrag hatte, da wie beispielsweise in (Berger et al., 2007) beschrieben, Stickstoff einen wesentlichen Bestandteil der Proteine, wie Chlorophyll und RUBISCO darstellt. Weiters zeigen die Versuchsergebnisse auch, dass ab einem gewissen Grad der N-Düngung/Versorgung kein weiterer Ertragszuwachs in der Biomasse möglich war. Dabei kann mit dem Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachs auf eine weitere Grundlage des Pflanzenbaus verwiesen werden, die besagt, dass die Wirkung eines einzelnen Faktors geringer wird, je näher der Höchstertag erreicht wird (Berger et al., 2007).

Nachdem für iCrop die Temperaturparameter der Strahlungsnutzungseffizienz (siehe Tabelle 12) verringert wurden, konnte die oberirdische Biomasse mit einer Wahrscheinlichkeit von 85% und einem durchschnittlichen Prognosefehler von $170,45\text{g m}^{-2}$ simuliert werden. Der von iCrop unzureichend simulierte Ausreißer (siehe Abbildung 18) in der ungedüngten Variante im Jahr 2017 ist darauf zurückzuführen, dass wie bereits im vorangegangenen Kapitel erklärt wurde, der Blattflächenindex dieser Variante gleich dem Blattflächenindex der gedüngten Parzellen simuliert wurde. Dadurch wird im Modell in weiterer Folge mehr Strahlung

als in der Realität aufgenommen und es kommt zu größeren Tageszunahmen. An dieser Stelle wird ersichtlich, dass sich Fehler/Ungenauigkeiten der grundlegenden Modellierung wie beispielsweise Phänologie oder Blattflächenindex durch die weitere und darauf aufbauende Modellierung durchziehen. Dies wird auch von (Soltani und Sinclair, 2012) bestätigt, die in ihrem Buch davon schreiben, dass die korrekte Modellierung bestimmter Prozesse wesentlich ist, weil dadurch weitere Prozesse beeinflusst werden.

Verglichen mit iCrop konnte APSIM die oberirdische Biomasse mit einer Wahrscheinlichkeit von 93% und einem durchschnittlichen Prognosefehler von $96,42\text{g m}^{-2}$ sehr gut simulieren. Der Einfluss der N-Düngung auf die oberirdische Biomasse wurde gut wiedergespiegelt. Somit kann behauptet werden, dass APSIM die oberirdische Biomasse besser simulieren konnte als iCrop.

6.7 Ertrag

Bei abermaligen Vergleich der Versuchsergebnisse aus 2017 mit den praxisnahen Werten aus dem Internetdeckungsbeitrag-Rechner (www.idb.awi.bmlfuw.gv.at) wird ersichtlich, dass die ungedüngte Variante ähnlich wie bei der oberirdischen Biomasse leicht unter den durchschnittlichen Kornerträgen (Niederösterreich) von $84,3\text{dt/ha}$ lagen. Dagegen erreichten die gedüngten Varianten deutlich höhere Kornerträge, was ebenso auf die künstliche Bewässerung zurückgeführt werden kann. Da iCrop mit einer Wahrscheinlichkeit von 86% und einem durchschnittlichen Prognosefehler von $44,22\text{g m}^{-2}$ und APSIM mit Wahrscheinlichkeit von 84% und einem durchschnittlichen Prognosefehler von $124,97\text{g m}^{-2}$ die tatsächlichen Erträge simulieren konnte, war iCrop für diese Anforderung etwas besser geeignet. Ein grober Ausreißer war bei APSIM für die Simulation von N4 im Jahr 2016 zu verzeichnen. Hier wurden statt $1161,07\text{g m}^{-2}$, $1427,75\text{g m}^{-2}$ simuliert. Gründe dafür könnten sein, dass die Anzahl der Körner zu groß oder die Wachstumsrate der Körner zu hoch berechnet wurde. Für den durchgeführten Versuch kann behauptet werden, dass die geringere Komplexität bei der Simulation des Kornertrages keinen Nachteil darstellt. Hier sei nochmals in Erinnerung gerufen, dass iCrop zur Simulation des Kornertrags auf einen simplen Harvest Index zurückgreift, also einen bestimmten Teil der oberirdischen Biomasse ins Korn verlagert (Soltani und Sinclair, 2012). Weiters muss immer bedacht werden, dass zuerst die Gesamtbiomasse korrekt simuliert werden muss, um dann mit dem Kornertrag ein richtiges Teilergebnis der gesamten Simulation zu erhalten. Da in den Simulationsergebnissen der oberirdischen Biomasse bereits Ungenauigkeiten enthalten waren, können durch weiteren Fokus auf die Verbesserung dieser Ergebnisse auch die Simulationsergebnisse des Kornertrags verbessert werden.

6.8 Blatt und Stängelbiomasse

Zu Beginn dieses Abschnitts ist anzumerken, dass die Blatt- und Stängelbiomassen am Feld bei der letzten Probenahme niedriger als bei der vorletzten Probenahme lagen. Obwohl die abgestorbenen Pflanzenteile auch eingesammelt und zugeordnet wurden, konnten diese bei der letzten Probenahme nicht mehr zur Gänze identifiziert werden. Einige abgestorbene Teile wurden verweht oder waren bereits verwittert (untere Blattetage), weshalb sich die Gewichtsabnahme der letzten Probenahme begründet.

Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse (2017) für Blatt und Stängelbiomasse (Abbildung 20) von iCrop spiegelt sich die Überschätzung der Gesamtbiomasse (Abbildung 17) wieder. Da iCrop bis zur Kornfüllung die aufgenommene Biomasse in zwei Phasen auf Blatt und Stängel aufteilt (Soltani und Sinclair, 2012), wurden auch diese überschätzt. Weiters wurde der am Feld festgestellte Einfluss der N-Düngung auf die beiden Organe von iCrop nicht simuliert. Das bedeutet, dass für die Entwicklung von Blatt- und Stängelbiomasse in iCrop kein N-Stress simuliert wurde und mit den Simulationsergebnissen aus Blattanzahl und Fläche in Einklang gebracht werden kann. Damit kann festgehalten werden, dass in iCrop nur bei der Kornfüllung N-Stress vorhanden war, wodurch die Kornerträge unterschiedlich simuliert wurden.

Betrachtet man die Simulationsergebnisse (2017) für Blatt und Stängelbiomasse (Abbildung 20) von APSIM so wird ersichtlich, dass diese ebenso ein Resultat aus der oberirdischen Biomasse sind. Die täglich produzierte Biomasse teilt sich je nach Entwicklungsstadium in unterschiedlichen Verhältnissen auf unterschiedliche Teile der Pflanze auf (www.apsim.info). Da sowohl in der ungedüngten als auch in der maximal gedüngten Variante die Blattbiomasse überschätzt und die Stängelbiomasse unterschätzt wurde, könnten für eine noch genauere Simulation Anpassungen in der Biomasseaufteilung vorgenommen werden. Im Gegensatz zum weniger komplexen Modell war es APSIM möglich, Unterschiede der Blatt- und Stängelbiomasse zwischen den Düngungsstufen aufzuzeigen, da bereits vor der Kornfüllung N-Stressfaktoren simuliert wurden.

6.9 Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse

Grundsätzlich konnte beobachtet werden, wie sich die Stickstoffgehalte der oberirdischen Biomasse am Feld, vor allem im zweiten Versuchsjahr (Abbildung 13), je nach Düngungsstufe differenzierten. Ähnliches wurde im zweijährigen N-Düngungsversuch von (Büchter et al., 2003) beobachtet, die die N-Auswaschungsprozesse bei Mais untersuchten. Der Unterschied im Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse zwischen der ungedüngten und der maximal gedüngten Variante betrug $18,92\text{g N m}^{-2}$. Da dieser größer als die volle N-Düngermenge von 160kg N ha^{-1} ist, muss darauf hingewiesen werden, dass die Parzellen nach dem ersten Versuchsjahr bereits unterschiedliche Nmin Gehalte aufwiesen.

Betrachtet man die Simulationsergebnisse des Stickstoffgehalts der oberirdischen Biomasse in Abbildung 21, so kann darauf geschlossen werden, dass beide Modelle in der Lage waren den Einfluss der N-Düngung darzustellen. Da iCrop bereits die oberirdische Biomasse überschätzte, kam es auch zu einer Überschätzung des Stickstoffgehalts der oberirdischen Biomasse, die jedoch aufgrund der guten Simulation der Kornbiomasse zum Ende der Saison keine große Differenz ausmachte.

APSIM zeigte ähnliche Simulationsverläufe. Der große Unterschied in der Simulation des N-Gehalts beruht jedoch darauf, dass die minimalen bzw. Ziel-N Konzentrationen je Organ für 5 unterschiedliche Entwicklungsstufen parametrisiert werden kann. Für iCrop kann lediglich ein Wert vorgegeben werden.

Betrachtet man nun die Ergebnisse aus der linearen Regression für den Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse (Abbildung 22), so ist ersichtlich, dass APSIM mit nur einem Prozent mehr Wahrscheinlichkeit bzw. einer Differenz in RMSE von $1,21\text{g N m}^{-2}$ das korrekte Ergebnis simulierte. Dadurch kann abermals auf sehr gute Simulationsergebnisse trotz geringerer Komplexität verwiesen werden. Dies wird auch von (Soltani und Sinclair, 2015) gestützt, die in ihrem Paper schreiben, dass höhere Komplexität nicht zwingend notwendig ist, um bessere Simulationsergebnisse zu liefern und ein Modell so einfach wie möglich gehalten werden sollte.

6.10 Stickstoffgehalt Korn

Der Stickstoffgehalt des Korns kann sehr ähnlich beschrieben werden, wie der Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse. Am Feld konnte die Differenzierung der N-Gehälter ebenso im zweiten Versuchsjahr gut beobachtet werden (siehe Abbildung 14). Da bei Mais für die Körnernutzung der N-Gehalt in vielen Fällen eine untergeordnete Rolle spielt, kann hier angemerkt werden, dass der Ertrag durch die verringerte N-Düngung weniger stark beeinflusst wurde. Eine andere Rolle kommt dem N Gehalt beispielsweise in der tierischen Nutzung von Mais zu. Hier entscheidet der N-Gehalt der Körner über die Zusammensetzung der Futtermittel (Kirsch et al., 1967).

Da von iCrop bereits der Kornertrag mit einer sehr hohen Genauigkeit simuliert wurde, konnten daraus auch die Stickstoffgehalte des Korns gut abgebildet werden. Denn der tägliche N-Bedarf der Körner wird aus der Wachstumsrate der Körner und der N-Konzentration der Körner ermittelt (Soltani und Sinclair, 2012). Nachdem die N-Konzentration der Körner, wie in Tabelle 13 zu sehen ist, angepasst wurde, konnten mit iCrop bei einem durchschnittlichen Prognosefehler von $1,62\text{g N m}^{-2}$ äußerst genaue Simulationsergebnisse erzielt werden.

Obwohl APSIM für die Simulation des Stickstoffgehalts der Körner den komplexeren Weg über einen Stressfaktor bei N-Mangel wählt (www.apsim.info), war es nicht in der Lage

ebenso exakte Simulationsergebnisse wie iCrop zu liefern. Hier sei nochmals hervorgehoben, dass der komplexere Weg nicht immer der genauere sein muss.

Ebenso muss an dieser Stelle nochmals auf die Zusammenhänge in Modellen überhaupt verwiesen werden, da für die korrekte Simulation des N-Gehalts der Körner davor schon die Phänologie und der Kornertrag korrekt simuliert werden müssen, damit ein Modell durchgängig richtig arbeiten kann.

6.11 Bodenstickstoff

Ebenso von vielen Faktoren abhängig sind die Simulationsvorgänge bezüglich Boden Diese werden in den nächsten zwei Kapiteln kurz diskutiert, um einen Überblick dazu zu schaffen.

Betrachtet man die Stickstoffbilanz (aus 2017) in Tabelle 14 so wird ersichtlich, dass diese am Feld immer negativ war, da keine Stickstoffumwandlungsprozesse gemessen wurden. Die Verflüchtigung von Stickstoff kann aufgrund der guten Löslichkeit von Kalkammonsalpeter bzw. der schnellen Einarbeitung durch Hacken nahezu ausgeschlossen werden. Ebenso kann Stickstoffverlust durch Auswaschung vernachlässigt werden, da die Niederschläge im Jahr 2017 gering waren und künstliche Bewässerung durchgeführt werden musste.

Die Denitrifikation, die als Reduktion des Nitrats zu molekularem Stickstoff bzw. Nitrat mit geringerem Oxidationszustand definiert werden kann (Glinski et al., 2011), wurde im Feldversuch nicht gemessen. Laut (Hofstra und Bouwman, 2005) die in ihrer Studie aus 336 weltweiten Denitrifikations-Messungen mittlere jährliche Denitrifikations-Raten erstellt haben, lagen diese für die vorliegenden Verhältnisse zwischen 6 (N0) und 11 (N4) kg N pro Hektar und Jahr. Bei der N-Mineralisation wird organisch gebundener Stickstoff durch Mikroben in dessen anorganische Formen überführt (Glinski et al., 2011). Da dieser Prozess am Feld ebenso nicht gemessen wurde, ist er der Hauptgrund für die negativen Stickstoffbilanzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass für N0 mindestens 82,55 kg N ha⁻¹ und für N4 mindestens 18,12 kg N ha⁻¹ mineralisiert wurden. Dieses Bild wurde für die ungedüngte Variante von iCrop mit wenigen Kilogramm Differenz bestätigt, auch die Denitrifikation von 6kg N ha⁻¹ kann somit als realistisch angesehen werden. APSIM überschätzte die Mineralisation bei der ungedüngten Variante deutlich, auch der N-Gehalt der oberirdischen Biomasse war zu hoch. Im Vergleich mit der maximalen Düngungsstufe simulierte iCrop den N-Endgehalt im Boden zwar nahezu korrekt, jedoch waren die Mineralisation, die N-Aufnahme der oberirdischen Biomasse und die Denitrifikation deutlich zu hoch angesetzt. Ähnliches gilt in dieser Düngungsstufe für APSIM, wobei die Denitrifikation deutlich geringer war. Grundsätzlich konnte für APSIM keine ausgeglichene N-Bilanz erstellt werden. Nach gründlicher Analyse dieses Problems via (www.apsim.info) wurde festgestellt, dass in der vorliegenden Version von APSIM der N-Gehalt des Wurzelsystems nicht ausgegeben werden kann. Daher wird angenommen, dass der Überschuss in der N-Bilanz von APSIM in die Wurzeln verlagert wurde.

Trotz der besseren Simulation der ungedüngten Variante durch iCrop kann durch Analyse von einer Stickstoffbilanz nicht behauptet werden, dass dieses für die Simulation von Bodennstickstoff das bessere Modell ist. Wie eingangs erwähnt, ist die Simulation von Bodennstickstoff von vielen Faktoren abhängig, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass diesbezüglich auch mit weniger komplexen Modellen gute Simulationsergebnisse erzielt werden können.

6.12 Bodenwasser

Wie bereits in Punkt 5.4.10 erwähnt, waren bei der Bodenwassermessung am Feld starke Schwankungen der Ergebnisse zu verzeichnen. Trotz exakt durchgeführter Probenahme kam es zwischen den Wiederholungen zu Schwankungen im Wassergehalt von 10%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits sehr kleinräumige Bodenunterschiede den Wassergehalt und damit die Speicherfähigkeit des Bodens beeinflussen. Da zwischen der ungedüngten und voll gedüngten Variante ausschließlich zum Erntetermin ein signifikanter Unterschied gemessen wurde, kann behauptet werden, dass die Pflanzen der voll gedüngten Parzellen zum Ende der Saison einen erhöhten Wasserbedarf hatten. Dieses Bild wurde von beiden getesteten Modellen bestätigt. Ab der Blüte kam es zu einer Differenzierung zwischen den beiden N-Düngungsvarianten, wobei aus den ungedüngten Parzellen um ca. 50mm weniger Wasser entzogen wurde als aus den voll gedüngten Parzellen. Grundsätzlich waren die Simulationsverläufe beider Modelle ähnlich, daher kann für die Simulation von Bodenwasser keine Tendenz zu einem Modell gegeben werden.

7 Schlussfolgerung

Der Vergleich der simulierten und gemessenen Daten zeigte, dass sowohl APSIM als auch iCrop in der Lage waren Pflanzenwachstum und Ertragsbildung von Mais zu simulieren. Da iCrop das weniger komplexe Modell ist, lassen sich die Vorgänge im Hintergrund leichter verstehen, weshalb die Parametrisierung leichter als bei APSIM durchgeführt werden konnte. Wir stellten fest, dass die geringere Komplexität von iCrop bei der Simulation von Phänologie, Blattanzahl, und Biomasse keinen Nachteil gegenüber dem komplexeren Modell zeigte. Bei der Simulation des Stickstoffhaushalts zeigten sich allerdings die Grenzen eines simplifizierten Modells, da der über den Wachstumsverlauf variable Stickstoffbedarf konstant simuliert wurde. Daher sollten für die korrekte Simulation des N-Haushalts zusätzliche N-Parameter implementiert werden.

Da sich zeigte, dass bei Veränderung von nur einem Parameter oft mehrere Ergebnisse weitreichend beeinflusst werden, wurde besonderer Wert darauf gelegt, die Parameter konsistent festzulegen. Die dafür verwendeten Daten waren von hoher Qualität, allerdings war die Bandbreite des Stickstoffangebots begrenzt. Dadurch kann nun von einer für diesen Bereich eingeschränkten Anwendbarkeit der Modelle ausgegangen werden. Bei weiterer Forschungsarbeit sollte darauf geachtet werden gegen Daten mit stärkerem N-Stress zu testen. Ebenso kann die vorliegende Parametrisierung besser evaluiert werden, indem unterschiedliche Standorte und Jahre herangezogen werden. In einer weiteren Parametrisierung ist es notwendig, umfangreichere Daten zu verwenden. Beispielsweise sollte die N-Mineralisierung anhand empirischer Daten abgeschätzt werden, um diesen Prozess in beiden Modellen zu verbessern.

Nach intensiver Forschung sind umfangreiche Bodenanalysen und der Einsatz von Zwischenfrüchten zur Speicherung von Nährstoffen aus dem modernen Pflanzenbau nicht mehr wegzudenken. In der vorliegenden Masterarbeit wurde gezeigt, dass Pflanzenwachstumsmodelle bei korrekter Parametrisierung sehr genaue Ergebnisse liefern können. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass diese bei ebenso intensiver Forschung in Zukunft breitere Anwendung finden. Beispielsweise können sie gemeinsam mit N-Düngungssensoren zur optimierten Ausbringung von Düngemitteln, als Planungswerkzeug zur Abschätzung von Erntemengen, oder als Entscheidungshilfe bei der Kultur- und Sortenwahl dienen. Auch ich als praktizierender Landwirt, der versucht nach ökonomischen und ökologischen Grundsätzen zu handeln, kann Pflanzenwachstumsmodelle als weiteres Werkzeug für pflanzenbauliche Entscheidungen sehr begrüßen. Aus diesen Gründen bleibt abschließend festzuhalten, dass der iterative Prozess von Parametrisierung, Anwendung und Adaptierung von Pflanzenwachstumsmodellen einen wichtigen Beitrag für die zukünftige und nachhaltige Bewirtschaftung unserer Kulturlandschaft darstellt.

8 Literaturverzeichnis

- Berger, L., Etzelstorfer, G., Gruber, P., Huber, E., Kremaier, H., Panzenböck, J., Rehm, F., Schnabel, A., Waldhör, A., Zobl, F. (2007): Pflanzenbau 1. 2. Auflage, Graz: Leopold Stocker Verlag.
- BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2017): Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland - Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft. 7. Auflage, Wien: Selbstverlag.
- Büchter, M., Wachendorf, M., Volkers, K., Taube, F. (2003): Silomaisanbau auf sandigen Böden Norddeutschlands - Einfluss von Untersaat, Gülle und Mineral-N-Düngung auf den Nitrataustrag. Pflanzenbauwissenschaften 7, 64–74.
- Bundesanstalt für Agrarwirtschaft (s.a.): AWI - Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten - Körnermais. <https://idb.awi.bmlfuw.gv.at/koernermais.html> (16.6.2019).
- Bundesanstalt für Agrarwirtschaft (s.a.): AWI - Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten - Silomais. <https://idb.awi.bmlfuw.gv.at/silomais.html> (16.6.2019).
- Chen, K., Kumudini, S.V., Tollenaar, M., Vyn, T.J. (2015): Plant biomass and nitrogen partitioning changes between silking and maturity in newer versus older maize hybrids. Field Crops Research 183, 315–328.
- Das Kulturinformationssystem aeiou (s.a.): Tullnerfeld. <http://www.aeiou.at/aeiou.encyclop.t/912556.htm> (07.05.2018).
- Devkota, K.P., Manschadi, A.M., Devkota, M., Lamers, J.P.A., Ruzibaev, E., Egamberdiev, O., Amiri, E., Vlek, P.L.G. (2013): Simulating the impact of climate change on rice phenology and grain yield in irrigated drylands of Central Asia. Journal of Applied Meteorology and Climatology 52, 2033–2050.
- eBod - digitale Bodenkarte (s.a.): <https://bodenkarte.at/#/center/16.07073,48.31861/zoom/16.6/l/ba,true,60,kb> (6.10.2019)
- Ebrahimi, E., Manschadi, A.M., Neugschwandtner, R.W., Eitzinger, J., Thaler, S., Kaul, H.-P. (2016): Assessing the impact of climate change on crop management in winter wheat - A case study for eastern Austria. The Journal of Agricultural Science 154, 1153–1170.
- Eck, C., Garcke, H., Knaber, P. (2017): Mathematische Modellierung. 3.Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodá, E., Hlavinka, P., Šiska, B., Takáč, J., Malatinská, L., Novárká, M., Dubrovský, M., Žalud, Z. (2013): Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe - Hotspots, regional differences and common trends. The Journal of Agricultural Science 151, 787–812.
- Everitt, B.S., Hothorn, T. (2005): A Handbook of Statistical Analyses Using R. London, Erlangen: Routledge.
- Frost, I. (2018): Einfache lineare Regression - Die Grundlage für komplexe Regressionsmodelle verstehen. Wiesbaden: Springer.
- Gaydon, D.S., Balwinder-Singh, Wang, E., Poulton, P.I., Ahmad, B., Ahmed, F., Akther, S., Ali, I., Amarasingha, R., Chaki, A.K., Chen, C., Choudhury, B.U., Darai, R., Das, A., Hochman, Z., Horan, H., Hosang, E.Y., Vijaya Kumar, P., Khan, A.S.M.M.R., Laing, A.M., Liu, L., Malaviachichi, M.A.P.W., Mohapatra, K.W., Muttaleb, M.A., Power, B., Radanielson, A.M., Rai, G.S., Rashid, M.H., Rathnayake, W.M.U.K., Sarker, M.M., Sena, D.R., Shamim, M., Subash, N., Suriadi, A., Suriyagoda, I.D.B., Wang, G., Wang, J., Yadav, R.K., Roth, C.H. (2017): Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. Field Crops Research 204, 52–75.
- Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften (2009): Modellierung des Systems Nutzpflanzen-Boden - Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Göttingen: Selbstverlag

- Glinski, J., Horabik, J., Lioiec, J. (2011): *ENCYCLOPEDIA of AGROPHYSICS*. Lublin: Springer.
- Google Maps (s.a.): Standort des Versuchsfeldes.
<https://www.google.at/maps/place/3430+Tulln+an+der+Donau/@48.3314176,16.0608262,19.5z/data=!4m5!3m4!1s0x476d73e520720b45:0x40097572de63c40!8m2!3d48.3314949!4d16.060737> (07.05.2018).
- Hartge, K.H., Horn, R. (2014): *Einführung in die Bodenphysik - mit 24 Tabellen*. 4. vollst. überarb. und erw. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart.
- Hartge, K.H., Horn, R. (1999): *Einführung in die Bodenphysik*. 3. überarbeitete Auflage, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Hodges, T. (1991): *Predicting crop phenology*. Boca Raton: CRC Press.
- Hofstra, N., Bouwman, A.F. (2005): Denitrification in agricultural soils - summarizing published data and estimating global annual rates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 267–278.
- Jani, A.D., Mulvaney, M.J., Leon, R.G., Rowland, D.L., Erickson, J.E., Wood Wesely, C. (2018): Conventional Harvest Index Methods may Overestimate Biomass and Nutrient Removal from Abscising Crop Species. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49, 2883–2893.
- Jianyang, X., Shiqiang, W. (2013): Independent effects of warming and nitrogen addition on plant phenology in the Inner Mongolian steppe. *Annals of Botany* 111, 1207–1217.
- Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R. (2016): Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems* 155, 240–254.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J. (2003): An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18, 267–288.
- Kirsch, W., Splittgerber, H., Fender, M. (1967): *Die Fütterung der landwirtschaftlichen Nutztiere: Schweine, Rinder, Schafe, Pferde, Geflügel*. 4. völlig Neubearbeitete Auflage, Hamburg: Parey.
- WIFO - Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (2004): *Umsetzung der Wasser-rahmenrichtlinie für den Sektor der Landwirtschaft - Ökonomische Analyse der Wassernutzung*. Wien: Selbstverlag.
- Lancashire, P.D., Bleiholder, H., Van den Boom, T., Langelüddke, P., Stauss, R., Weber, E., Witzsenberge, A. (1991): A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* 119, 561–601.
- Manschadi, A.M., Christopher, J., de Voil, P., Hammer, G.L. (2006): The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional Plant Biology* 33, 823–837.
- Manschadi, A.M., Kaul, H.-P., Vollmann, J., Eitzinger, J., Wenzel, W. (2014): Developing phosphorus efficient crop varieties - An interdisciplinary research framework. *Field Crops Research* 162, 87–98.
- McMaster, G.S. (2005): Phytomers, phyllocrons, phenology and temperate cereal development. *Journal of Agricultural Science* 145, 137–150.
- Moeller, C., Pala, M., Manschadi, A.M., Meinke, H., Sauerborn, J. (2007): Assessing the sustainability of wheat-based cropping systems using APSIM - model parameterisation and evaluation. *Australian Journal of Agricultural Research* 58, 75–86.

- Palosua, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Mirschel, W., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R., Ruget, F., Rumbaur, C., Saylan, L., Tacak, J., Trnka, M., Rötter, R. (2011): Simulation of winter wheat yields and yield variability in different climates of Europe. - A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* 35, 103–114.
- Plénet, D., Lemaire, G. (1999): Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. - Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216, 65–82.
- Rötter, R., Carter, T.R., Olesen, J.E., Porter, J.R. (2011): Crop-climate models need an overhaul. *Nature Climate Change* 1, 175-177.
- Schwartz, M.D. (2003): PHENOLOGY - An Integrative Environmental Science, Tasks For Vegetation Science. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.
- Schwarz, H.R., Köckler, N. (2009): Numerische Mathematik. 7. überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Schwedt, G., Vogt, C. (2010): Analytische Trennmethode. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Seidel, S.J., Palosuo, T., Thorburn, P., Wallach, D. (2018): Towards improved calibration of crop models - Where are we now and where should we go? *European Journal of Agronomy* 94, 25–35.
- Soltani, A. (2014): SSM-Maize Model - Quick and Easy User Guide. s.l.: Selbstverlag.
- Soltani, A., Hoogenboom, G. (2007): Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research* 103, 198–207.
- Soltani, A., Maddah, V., Sinclair, T.R. (2013): SSM-Wheat - a simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production* 7, 711–740.
- Soltani, A., Sinclair, T.R. (2015): A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency - Simulation in a temperature, sub-humid environment. *Field Crops Research* 175, 37–46.
- Soltani, A., Sinclair, T.R. (2012): Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. Wallingford: CABI.
- Steponas, R. (2017): Application of statistics in plant and crop research - important issues. *Zemdirbyste-Agriculture* 104, 377–382.
- Svoboda, N., Wienforth, B., Mehrtens, H., Sieling, K., Kage, H., Taube, F., Herrmann, A. (2009): Modellierung des Systems Nutzpflanze-Boden - Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Göttingen: Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften.
- Tao, F., Rötter, R.P., Palosuo, T., Ambrona-Díaz, C.G.H., Mínguez, I.M., Semenov, M.A., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Cammarano, D., Hoffmann, H., Ewert, F., Dambreville, A., Martre, P., Rodríguez, L., Ruiz-Ramos, M., Gaiser, T., Höhn, J.G., Salo, T., Ferrise, R., Bindi, M., Schulman, A.H. (2016): Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *European Journal of Agronomy* 82, 144–162.
- Universität für Bodenkultur Wien (s.a.): Technik am Standort Tulln (UFT). <https://www.dnw.boku.ac.at/pb/forschung/wetterdaten/standort-tulln-uft/> (08.05.2018).
- Wilhelm, W.W., McMaster, G.S. (1995) SYPOSIUM ON THE PHYLLOCHRON - Importance of the Phyllochron in Studying Development and Growth in Grasses. *Crop Science* 35, 1–3.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des iCrop Phänologie Modells. Kumulierte biologische Tage (CBD), Biologischer Tag pro Kalendertag (BD, bd), Photoperiodenfunktion (ppfun), Ende der Reaktion auf Photoperiode (bdTRP), Beginn der Reaktion auf Photoperiode (bdBRP), Sensitivitätskoeffizient der Photoperiode (ppsen), kritische Tageslänge (CPP, h), tatsächliche Photoperiode (PP, h), Temperaturfunktion (tempfun), Temperaturuntergrenze (TBD, °C), optimale Temperatur 1 (TP1D, °C), optimale Temperatur 2 (TP2D, °C), Temperaturobergrenze (TCD, °C), tatsächliche mittlere Tagestemperatur (TMP, °C), Quelle: Soltani und Sinclair, 2012.....	13
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des iCrop Biomasse Modells. Lichtextinktionskoeffizient (KPAR), Anteil aufgenommener Strahlung (FINT, MJ m ⁻² d ⁻¹), Blattflächenindex (LAI, m ² m ⁻²), oberirdische Gesamtbiomasse (WTOP, g m ⁻²), tägliche Zunahme der Biomasse (DDMP, g m ⁻² d ⁻¹), photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, MJ m ⁻² d ⁻¹), potenzielle Strahlungsnutzungseffizienz (IRUE, g MJ ⁻¹), tatsächliche Strahlungsnutzungseffizienz (RUE, g MJ ⁻¹), Temperaturkorrekturfaktor (TCFRUE), tatsächliche mittlere Tagestemperatur (TMP, °C), Temperaturuntergrenze (TBRUE, °C), optimale Temperatur 1 (TP1RUE, °C), optimale Temperatur 2 (TP2RUE, °C) und Temperaturobergrenze für die Strahlungsnutzungseffizienz (TCRUE, °C), Quelle: Soltani und Sinclair, 2012.	15
Abbildung 3:	Versuchsaufbau des Maisversuchs von 2016 und 2017 in Tulln (nicht maßstabsgetreu).	27
Abbildung 4:	Statistische Analyse (ANOVA und TukeyHSD-Test) des Kornertrages aus dem Versuchsjahr 2017.....	34
Abbildung 5:	Monatliche Regenmengen während der Vegetationsperiode im Durchschnitt von 1991-2017 und für die Jahre 2016 und 2017.....	36
Abbildung 6:	Maximale (tmax) und minimale (tmin) Temperaturverläufe während der Vegetationsperioden in den Jahren 2016 (a) und 2017 (b), mit mittleren maximalen(mtmax) und minimalen (mtmin) Temperaturen der Jahre 1991-2017.....	37
Abbildung 7:	Kumulierte Globalstrahlung der Vegetationsperiode im Durchschnitt von 1991-2017 und der Jahre 2016 und 2017.....	38

Abbildung 8:	Phänologie der Maispflanzen im Zeitverlauf, der Jahre 2016 (a) und 2017 (b) jeweils ohne N-Düngung (N0) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4).....	39
Abbildung 9:	Blattanzahl im Zeitverlauf. Im Jahr 2016 (a) und 2017 (b) jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 80kg N ha ⁻¹ N (N2) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4).	40
Abbildung 10:	Verlauf des Blattflächenindex der Jahre 2016 (a) und 2017 (b) jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha ⁻¹ (N1), mit 80kg N ha ⁻¹ (N2), mit 120kg N ha ⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4).	41
Abbildung 11:	Oberirdische Biomasse zum Erntezeitpunkt der Jahre 2016 (a) und 2017 (b), jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha ⁻¹ (N1), mit 80kg N ha ⁻¹ (N2), mit 120kg N ha ⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4).	42
Abbildung 12:	Kornertrag im Jahr 2016 (a) und 2017 (b), jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha ⁻¹ (N1), mit 80kg N ha ⁻¹ (N2), mit 120kg N ha ⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4).	43
Abbildung 13:	Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse zum Erntezeitpunkt für die Jahre 2016 (a) und 2017 (b),jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha ⁻¹ (N1), mit 80kg N ha ⁻¹ (N2), mit 120kg N ha ⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4).	44
Abbildung 14:	Stickstoffgehalt der Körner zum Erntezeitpunkt für die Jahre 2016 (a) und 2017 (b),jeweils ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha ⁻¹ (N1), mit 80kg N ha ⁻¹ (N2), mit 120kg N ha ⁻¹ (N3) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4). ...	45
Abbildung 15:	Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Blattanzahl in den Jahren 2016 (a) und 2017 (b) für alle N-Düngungsstufen.....	50
Abbildung 16:	Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Blattflächenindizes aus dem Jahr 2016, jeweils ohne N-Düngung (a) und mit 160kg N ha ⁻¹ (N4). .	51
Abbildung 17:	Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Ergebnisse der oberirdischen Biomasse im Jahr 2017,in den Varianten ohne N-Düngung (a) und mit 160kg N ha ⁻¹ (b).....	52
Abbildung 18:	Simulierte und tatsächliche oberirdische Biomasse aller N-Düngungsstufen beider Jahre zum Erntezeitpunkt, dargestellt mittels linearer Regressionsgeraden für iCrop (a) und APSIM (b).....	53
Abbildung 19:	Simulierte und tatsächliche Erträge aller N-Düngungsstufen beider Jahre, dargestellt mittels linearer Regressionsgeraden für iCrop (a) und APSIM (b).....	54
Abbildung 20:	Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Blatt- und Stängelbiomassen im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a, c) und mit 160kg N ha ⁻¹ (b, d).....	55

Abbildung 21:	Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Ergebnisse der Stickstoffgehalte der oberirdischen Biomasse, im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a) und mit 160kg N ha ⁻¹ (b).	56
Abbildung 22:	Simulierte und tatsächliche Stickstoffgehalte der oberirdischen Biomasse aller N-Düngungsstufen beider Jahre zum Erntezeitpunkt, dargestellt mittels linearer Regressionsgeraden für iCrop (a) und APSIM (b).	57
Abbildung 23:	Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Stickstoffgehalte des Korns, im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a), mit 40kg N ha ⁻¹ (b) und mit 160kg N ha ⁻¹ (c).	58
Abbildung 24:	Gemessene (Punkte) und simulierte (Kurven) Wassergehalte des Bodenhorizonts von 0-120cm im Jahr 2017, ohne N-Düngung (a), und mit 160kg N ha ⁻¹ (b).	60
Abbildung 25:	Fotographien aus dem Feldversuch: Einfluss der N-Versorgung (a), Messung der Lagerungsdichte (b), Biomassemessung (c) und Bodenprobenahme (d).	78

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung wichtiger Merkmale beider Pflanzenwachstumsmodelle. ...	22
Tabelle 2:	Die durchgeführten Maßnahmen im Maisversuch für die Jahre 2016 und 2017	28
Tabelle 3:	Auflistung Biomasseerhebungstermine beider Jahre.....	29
Tabelle 4:	Auflistung der Termine für die Erhebung der Bodenproben in beiden Jahren, W=Bodenwasser, N=Bodenstickstoff.....	31
Tabelle 5:	Einteilung der Bodenhorizonte in Abhängigkeit der Untersuchungsart für beide Jahre.	32
Tabelle 6:	Auflistung der Inputparameter für Bodenwasser, Wassersättigung (SAT), Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP), alle Angaben sind volumetrische. Wassergehalte ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).	46
Tabelle 7:	Auflistung der horizontalen Inputparameter für Bodenstickstoff (kg Nmin ha^{-1}) zu Simulationsbeginn ohne N-Düngung (N0), mit 40kg N ha^{-1} (N1), mit 80kg N ha^{-1} (N2), mit 120kg N ha^{-1} (N3) und mit 160kg N ha^{-1} (N4). .	47
Tabelle 8:	Auflistung der Bodeninputparameter TOC, NORG und BD.....	47
Tabelle 9:	Gemessene und simulierte (iCrop, APSIM) Ergebnisse der Phänologie aller Düngungsstufen, in Tagen nach Saat (DAP).	49
Tabelle 10:	Geänderte genetische Parameter hinsichtlich Phänologie.....	49
Tabelle 11:	Wichtige und geänderte genetische Parameter betreffend Blattanzahl.....	50
Tabelle 12:	Geänderte genetische Parameter betreffend oberirdischer Biomasse.....	56
Tabelle 13:	Veränderte genetische Parameter betreffend Stickstoffaufnahme der oberirdischen Biomasse.	58
Tabelle 14:	Stickstoffbilanz der gemessenen und mit iCrop und APSIM simulierten Ergebnisse für das Jahr 2017, ohne N-Düngung (N0) und mit 160kg N ha^{-1} (N4).....	59
Tabelle 15:	Veränderte genetische Parameter betreffend der Wurzeln.....	60

11 Appendix



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 25: Fotografien aus dem Feldversuch: Einfluss der N-Versorgung auf den Pflanzenbestand (a), Messung der Bodenlagerungsdichte (b), Biomassemessung (c) und Bodenprobenahme (d).