



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Simulation von Pflanzenwachstum und Ertrag am Beispiel Kartoffel (*solanum tuberosum*).

verfasst von

Bernd BRODTRAGER, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Nutzpflanzenwissenschaften

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, November 2021

Betreut von:

Assoc. Prof. Dr. Ahmad M. Manschadi
Institut für Pflanzenbau
Department für Nutzpflanzenwissenschaften

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.

Gleisdorf, am 30.10.2021

Bernd Brodtrager

Danksagung

Zu Beginn möchte ich meinen größten Dank dem Professor und Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Ahmad M. Manschadi aussprechen, der mir seit Beginn der Arbeit jederzeit mit seinem enormen Fachwissen im Bereich der Pflanzenwachstumsmodelle zur Seite stand und meine Fragen bis zum Abschluss meiner Diplomarbeit auf hohem Niveau beantwortet hat. Besonders bedanken möchte ich mich vor allem für die aufgebrachte Geduld und für die Berücksichtigung meiner Anliegen, da des Öfteren für viele arbeitsrelevanten Punkte aufgrund meiner beruflichen Tätigkeit nicht sofort Zeit gefunden wurde.

Ebenso möchte ich mich bei Wolfgang Fuchs, Stefan Ryall und Lukas Koppensteiner bedanken, die mich sowohl beim Versuchsaufbau, bei der Datensammlung, bis hin zur Auswertung und Interpretation jederzeit unterstützt und mir viele hilfreiche Tipps mit auf meinem Weg zur fertigen Diplomarbeit gegeben haben. Ohne diese wertvollen Wortmeldungen und Hilfestellungen solch erfahrener Personen würden viele Arbeiten nicht in dieser Qualität vorgelegt werden können, der sie üblicherweise entsprechen sollen.

Viele Mühen hat es während meines Studiums gegeben, und viele davon wären nie ohne die gute Zusammenarbeit mit meinen vielen Studienkolleginnen und -kollegen vonstatten gegangen. Die vielen unvergesslichen Momente und Begegnungen in der Studienzeit werden mich ein Leben lang begleiten. Viele Begegnungen davon haben sich bereits als lebenslange Freundschaften herausgestellt, und bei vielen Studienkollegen und Studienkolleginnen gab es ein Wiedersehen im beruflichen Alltag, das nun viele Informationswege enorm verkürzt und erleichtert. Ebenso werde ich die vielen unterhaltsamen und inhaltlich intensiven Diskussionen am Rande des Unigeschehens in diversen Gasthäusern und Lokalitäten nie vergessen. So lehrreich, lustig, unbeschwert, aber auch intensiv und nervenraubend wird wohl nie mehr einer meiner kommenden Lebensabschnitte werden. Daher gilt ein großer Dank an meine Kolleginnen und Kollegen, die in der Studienzeit einen Teil meines Weges mitgegangen sind. Ich werde diese Zeit nie missen.

Zuletzt aber gilt mein Dank an meine Familie, die mir die Möglichkeit gegeben haben, ein Studium zu absolvieren und an der Universität für Bodenkultur inskribieren zu können. Trotz sämtlicher Höhen und Tiefen während meiner Zeit an der BOKU konnte ich mich immer darauf verlassen, dass meine Eltern, Karl und Gertrud, jederzeit hinter mir standen, auch finanziell. Sie waren die größte Stütze während meiner Studienzeit in Wien.

Besonders bedanken möchte ich mich aber auch bei meinem Onkel, Franz Tiefengrabner, der das Interesse für die Landwirtschaft in mir geweckt hat. Ebenso gebührt mein Dank an Erich Eberl, der mich im landwirtschaftlichen Bereich von Beginn an und zu jeder Stunde zuhause unterstützt hat. Und zu guter Letzt meinem Großonkel Alois Resch, dessen fachliche Expertise ich meine Theorie des Gelernten mit seinen Erfahrungen aus der Praxis in meinem Studium auf der BOKU bestmöglichst vereinen konnte. Ohne diese Personen hätte ich wohl nie diesen Weg eingeschlagen. Es war die beste Entscheidung meines Lebens.

Zusammenfassung

Modelle sind eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit, die als nützliches Werkzeug für die Erklärung komplexer Systeme gesehen werden können. In dieser Arbeit wurde erstmals versucht, mithilfe des Pflanzenwachstumsmodells *APSIM-Potato* die Ertragsbildung und das Pflanzenwachstum von *Solanum tuberosum* unter österreichischen Gegebenheiten zu simulieren und das Modell zu parametrisieren. Dazu wurde am Standort Oberhausen ein zweistufiger On-Farm-Bewässerungsversuch und am Standort Zwettl ein zweistufiger Düngungsversuch durchgeführt. Im destruktiven Bereich der Parzellen wurden regelmäßig Pflanzenproben entnommen, in Blätter, Stängel und Knollen aufgeteilt und deren Biomasse und Stickstoffkonzentration bestimmt. Im nicht destruktiven Bereich der Parzellen wurden die phänologische Entwicklung und der Knollenertrag bestimmt. Am Standort Zwettl wurden zudem Bodenproben für die Bestimmung von Bodenwasser und Bodenstickstoff gezogen, die im Modell als Ausgangspunkt für beide Standorte verwendet wurden. Anhand der gemessenen Daten wurde versucht, eine Parametrisierung des Modells im Bereich der genetischen Eigenschaften der Sorten vorzunehmen. In Zwettl zeigten die Feldversuche keinen signifikanten Einfluss der Stickstoffdüngung auf den Ertrag, jedoch wurde in der Biomassebildung von Blättern und Stängel sowie im Knollenstickstoff ein signifikanter Einfluss bei der vorletzten Probenentnahme festgestellt. Aufgrund des Auftretens der „*Candidatus Phytoplasma solani*“ am Standort Oberhausen konnten diese Ergebnisse nur eingeschränkt verwendet werden. *APSIM-Potato* war in der Lage, den Ertrag am Standort Zwettl sehr präzise zu simulieren. Die Gesamtstickstoffaufnahme der Pflanze konnte in Zwettl teilweise sehr realitätsnah simuliert werden. Die Biomassebildung wurde an beiden Standorten von *APSIM-Potato* grundsätzlich unterschätzt. Zukünftig sind für eine exakte Parametrisierung und eine präzisere und sichere Modellierung weitere Daten aus mehrjährigen Feldversuchen notwendig. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass das *APSIM-Potato* Model in der Kartoffelmodellierung an seine Grenzen stößt, da es noch an wissenschaftlich quantitativen Erklärungen in der Knollenphysiologie fehlt.

Abstract

Models are a simplified representation of the reality and can be seen as a useful tool for explaining complex systems. This crop modelling study was the first attempt to use the plant growth model *APSIM-Potato* for simulating yield formation and plant growth of *Solanum tuberosum* under Austrian conditions. To parameterize the model, a two-level irrigation on-farm trial was conducted in Oberhausen and a two-level fertilization trial in Zwettl. At regular intervals, plants were sampled from the destructive part of the trial plots and divided into leaves, stems and tubers. Their biomass and nitrogen concentration were determined. Phenological development and final tuber yield were determined in the non-destructive part of the plot. In addition, soil samples were taken in Zwettl for the determination of soil water and soil mineral nitrogen, which were used in the model as a starting point for both sites. Based on the measured data, an attempt was made to parameterize the model for the genetic characteristics of the varieties. In Zwettl, the field trial showed no significant influence of nitrogen fertilization on yield, but a significant influence on the above ground biomass and tuber nitrogen content could be seen from the second last sampling. Due to the occurrence of "*Candidatus Phytoplasma solani*" in the potato field trial in Oberhausen, the obtained potato tuber yields were not representative for the region. *APSIM-Potato* was able to simulate the yield for the site in Zwettl accurately. The plant total nitrogen uptake was also simulated realistically in Zwettl. Above ground biomass was underestimated by *APSIM* at both sites. It was concluded that for a more precise and reliable potato modelling in the future, further multi-environment data from field experiments are necessary for exact parameterization of the model. It was found that the *APSIM-Potato* is limited when it comes to modelling the potato, due to the lack of quantitative evaluation in tuber physiology.

Literaturverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Stand des Wissens	11
2.1	Pflanzenwachstumsmodelle	11
2.1.1	Geschichtlicher Hintergrund	12
2.1.2	Wahl des Modells	12
2.2	APSIM	14
2.3	Das APSIM Potato-Model	15
2.3.1	Strukturaufbau des Modells	15
2.3.2	Phänologie	16
2.3.3	Der Vermittler	19
2.3.4	Ablauf der Übertragung von Trockenmasse und Stickstoff in der Simulation	20
3	Forschungsfrage	22
4	Material und Methode	23
4.1	Standorte	23
4.1.1	Oberhausen	23
4.1.2	Zwettl	24
4.2	Versuchsaufbau	26
4.2.1	Oberhausen	26
4.2.2	Zwettl	28
4.3	Sortenbeschreibung	30
4.4	Versuchsdurchführung	32
4.4.1	Oberhausen	32
4.4.2	Zwettl	33
4.5	Boden - Probennahme und Datensammlung	34
4.5.1	Oberhausen	34
4.5.2	Zwettl	35
4.5.3	Bodenprofil am Standort Oberhausen	36
4.6	Pflanze - Probennahme und Datensammlung	38
4.6.1	Phänologie im nicht destruktiven Bereich	39
4.6.2	Biomasseproben im destruktiven Bereich	39
4.6.3	Blatt- und Knollenanalyse	40
4.6.4	Berechnung des Blattflächenindex	41
4.6.5	C/N-Analyse zur Ermittlung des N-Gehaltes in den Pflanzenteilen	42
4.6.6	Statistische Analyse und Datenverarbeitung	44
5	Ergebnisse	45
5.1	Wetterbedingungen	45

5.2	Ergebnisse der <i>On-Farm</i> - Versuche	48
5.2.1	Boden	48
5.2.2	Phänologie	50
	Blattanzahl am Hauptstängel.....	51
5.2.3	51
5.2.4	Blattflächenindex.....	52
5.2.5	Oberirdische Biomasse	53
5.2.6	Knollenerträge.....	54
5.2.7	Gesamtstickstoffaufnahme der Kartoffelpflanze	55
5.2.8	Stickstoffgehalte der Knollen	56
5.3	Initialisierung und Parametrisierung der Pflanzenwachstumsmodelle.....	57
5.3.1	Boden	57
5.3.2	Management	57
5.3.3	Genetische Parameter	58
5.3.4	Phänologie	58
	Oberirdische Biomasse	59
5.3.5	Blatt- und Stängelbiomasse.....	61
5.3.6	Knollenertrag.....	62
5.3.7	Gesamte Stickstoffaufnahme	64
5.3.8	Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse	65
5.3.9	Stickstoffgehalt in den Knollen	66
6	Diskussion	67
6.1	Wetter	67
6.2	Phänologie	67
6.3	Oberirdische Biomasse	68
6.3.1	Zwettl	68
6.3.2	Oberhausen	68
6.4	Blattbiomasse und Stängelbiomasse.....	69
	Blattanzahl am Hauptstängel	69
6.5	69
6.6	Knollenertrag.....	70
6.6.1	Zwettl	70
6.6.2	Oberhausen	70
6.7	Gesamte Stickstoffaufnahme	71
6.8	Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse	71
6.9	Stickstoffgehalt in den Knollen	72
7	Conclusio	73
8	Literaturverzeichnis	74

9	Abbildungsverzeichnis	77
10	Tabellenverzeichnis	79

1 Einleitung

Grundsätzlich sind Modelle eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit, die als nützliches Werkzeug für die Erklärung komplexer Systeme gesehen werden können. Die Modellierung selbst bezeichnet die Umsetzung konkreter Probleme in der Wissenschaft in eine mathematische Aufgabenstellung, jedoch stellen sich die zu beschreibenden Probleme als sehr komplex heraus und notwendige Daten sind nur spärlich oder gar noch nicht vorhanden, was in Modellen zu Vereinfachungen oder generellen Annahmen führt (Eck et al., 2011).

Pflanzenwachstumsmodelle sind grundsätzlich mathematische Modelle, mit denen man versucht, die Entwicklung, das Wachstum und den Ertrag von Nutzpflanzen unter einer Reihe von vorgegebenen Bedingungen darzustellen, da sie Wechselwirkungen verschiedener Komponenten gut quantifizieren können (Soltani und Sinclair, 2012). Gleichzeitig ist es das Ziel des erfolgreichen Pflanzenbaus, dass langfristig gesehen die ökonomische Erzeugung von Lebensmitteln und der größtmögliche Schutz des Naturhaushaltes im Einklang stehen (Nitsch, 2020).

Um also einerseits Ertrag und Wachstum gut darstellen zu können, Wechselwirkungen quantifizieren zu können und andererseits pflanzenbauliche Aspekte in der eigenen Kulturführung bestmöglich darzustellen, wurde in dieser Arbeit das Pflanzenwachstumsmodell APSIM gewählt, da es international als ein fortschrittliches Simulationsmodell für komplexe Agrarsysteme angesehen ist (Keating et al., 2003; Holzworth et al., 2014) und eines der ersten Modelle war, das nicht nur biophysikalische Prozesse simulieren konnte, sondern auch ökonomische und ökologische Entscheidungsprozesse aus dem Agrarmanagement sowie klimatische Wechselwirkungen miteinfließen ließ (Keating et al., 2003).

Für viele Kulturarten ist bereits eine große Menge an Datensammlungen vorhanden, die eine sehr genaue und realitätsnahe Modellierung und Simulation von Erträgen und Wachstum ermöglichen. Bei der Kulturpflanze Kartoffel (*Solanum tuberosum*), die als viertwichtigstes Nahrungsmittel auf der Welt gilt (Nitsch, 2020), sind notwendige Daten für Simulationen noch spärlich vorhanden. Die Kartoffel als Kulturpflanze ist für ein Pflanzenwachstumsmodell sehr herausfordernd, da sie sich vegetativ vermehrt und die Knolle ein lebender Organismus ist. Im Vergleich zu Samenpflanzen variiert in den Kartoffelknollen der physiologische Status, der unter anderem von Umweltfaktoren oder der Lagerung, ergo dem Management abhängen kann. Bislang fehlen noch genügend quantitative Erklärungen und es ist in unterschiedlichsten Modellen nicht gelungen, die Effekte der Knollenphysiologie darzustellen (Brown et al., 2011).

Ziel dieser Arbeit war, Felddaten aus On-Farm-Versuchen in Kartoffelkulturen zu sammeln und eine Parametrisierung des Pflanzenwachstumsmodells APSIM für österreichische Verhältnisse vorzunehmen. Längerfristig gesehen sollten daraus resultierend Empfehlungen für die Kulturführung oder vorausschauende Ertragsschätzungen abgeleitet werden können, aber eventuell auch neue Erfahrungen für pflanzenbauliche Aspekte gesammelt werden.

Mithilfe des Sub-Modells von APSIM, dem sogenannten APSIM-Potato Model, sollte an der Kulturpflanze Kartoffel versucht werden, Wechselwirkungen zu quantifizieren, gute Managementverfahren daraus abzuleiten, um eine effiziente Produktion im Pflanzenbau über diese Hilfestellungen zu ermöglichen. Dieses umfassende, deterministische Pflanzenwachstumsmodell ermöglicht neben der Einbeziehung von täglichen Wetterdaten über ein spezielles „Vermittler-Modul“ einen expliziten Link zwischen

Trockenmassezuwächsen (*dry mass - DM*) und Stickstoffkreisläufen (*nitrogen - N*) in Pflanze und Boden zu schaffen. So können beispielsweise über stabile Wasser- und Stickstoffmodelle Fruchtfolgen oder Managementverfahren miteinbezogen werden. In Kapitel 2.3 wird hier näher darauf eingegangen.

Das Modell konnte im Zuge dieser Arbeit in der Ertragssimulation und der Simulation der Stickstoffaufnahme gut abschneiden, jedoch wurde auch festgestellt, dass das Modell beim Auftreten abiotischer Faktoren, wie es durch die Infektion des Bakteriums „*Candidatus Phytoplasma solani*“ am Standort Oberhausen der Fall war, auch an seine Grenzen stößt. Pflanzenwachstumsmodelle werden jedoch mittelfristig gesehen sicherlich in einigen Wirtschaftsbereichen als hilfreiche Werkzeuge für die Einsparung von Ressourcen, von Arbeit und finanziellen Mitteln eine wesentliche Rolle spielen.

2 Stand des Wissens

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des Wissens erläutert und die Wahl und Funktion des Modells, das für diese Studie herangezogen wurde, erklärt.

2.1 Pflanzenwachstumsmodelle

Grundsätzlich sind Modelle eine vereinfachte Darstellung der Wirklichkeit, die als nützliches Werkzeug für die Erklärung komplexer Systeme gesehen werden können. Mit der Modellierung bezeichnet man die Umsetzung konkreter Probleme aus einem Wissenschaftsbereich in eine mathematische Aufgabenstellung (Eck et al., 2011). Die Essenz der Modellierung besteht darin, ein Bild zu erzeugen, wie ein System funktioniert. Es gibt unterschiedliche Arten von Modelle, zu welchen auch mathematische Modelle gehören. Sie bestehen aus verschiedenen Formen mathematischer Gleichungen, die ein System und seine Funktionsweise beschreiben. Pflanzenwachstumsmodelle sind grundsätzlich mathematische Modelle, mit denen man versucht, die Entwicklung, das Wachstum und den Ertrag von Nutzpflanzen unter einer Reihe von vorgegebenen Bedingungen darzustellen, da sie Wechselwirkungen verschiedener Komponenten gut quantifizieren können (Soltani und Sinclair, 2012). „In der Regel sind die zu beschreibenden Probleme sehr komplex, und es ist nicht möglich oder nicht sinnvoll, alle Aspekte bei der Modellierung zu berücksichtigen, weil zum Beispiel nicht alle dafür notwendigen Daten bekannt sind oder das gewonnene Modell sich nicht mehr lösen lässt oder eine Eindeutigkeit oder Existenz einer Lösung nicht nachweisen kann. Daher beinhaltet jedes Modell Vereinfachungen und Modellannahmen“ (Eck et al., 2011).

Pflanzenwachstumsmodelle finden in unterschiedlichen Bereichen ihre Anwendungsberechtigung. Im Bereich der Pflanzenforschung können Modelle dazu dienen, mithilfe der Datengenerierung von bestehenden Datenbanken Wechselwirkungen zwischen der Pflanzengenetik, der Pflanzenphysiologie und ihrer Umwelt zu erklären (Boote et al., 1996). Beispielsweise versuchten Manschadi et al. (2016) mithilfe des Pflanzenwachstumsmodells *APSIM* eine Simulationsanalyse für Wurzelsysteme bei trockenheitstoleranten Weizensorten durchzuführen, um ein besseres Verständnis für die Struktur und Funktion des Wurzelsystems zu bekommen, um Anpassungen in wasserarmen Gebieten bewerten zu können.

In Bezug auf das Management eines landwirtschaftlichen Betriebes können Pflanzenwachstumsmodelle dabei helfen, Entscheidungen in der Kulturführung, wie etwa in der Düngung, bei Bewässerungen oder dem Pflanzenschutzmitteleinsatz, schneller oder besser treffen zu können (Boote et al., 1996). Als Beispiel haben unter anderem Soltani und Hoogenboom (2007) mithilfe von *DSSAT* versucht, die Eignung von verschiedenen Wetterdaten, die als Input für Entscheidungen dienen, zu bewerten, um aus einer Reihe von Kulturführungsmaßnahmen bei unterschiedlichen Feldfrüchten (Anbau, Pflanzendichte, Bewässerung etc.) die besten Methoden daraus bestimmen zu können.

Ein weiterer Anwendungsbereich von Pflanzenwachstumsmodellen ist die Mithilfe bei politischen Entscheidungsträgern in der Vorhersage von Bodenerosion, Auswaschungen von Agrarchemikalien, Auswirkungen des Klimawandels oder bei der Erstellung von Ertragsprognosen (Boote et al., 1996). Das webbasierte „Crop-Loss Assessment Monitor“-Tool (CAM) kann beispielsweise eine Echtzeitüberwachung der Pflanzenentwicklung

vornehmen und Verlust- bzw. Ertragsschätzungen bei Mais, Weizen, Reis oder Soja vornehmen, die unter anderem für Versicherungsanalysen dienen (Aggarwal et al., 2020).

2.1.1 Geschichtlicher Hintergrund

Die ersten Modellierungen für landwirtschaftliche Systeme wurden in den 1960er Jahren von Earl Heady durchgeführt. Die Modelle zielten darauf ab, Entscheidungen auf landwirtschaftlicher Betriebsebene zu optimieren und eine Bewertung der politischen Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Nutzen in der Landwirtschaft durchzuführen (Jones et al., 2017). Die Modelle wurden mit der Zeit immer umfangreicher und ausgereifter. Dies führte Anfang der 1970er Jahre zur Entwicklung des „*International Biological Program*“ (*IBP*), wo erstmals in den Modellen ein ökologischer Schwerpunkt gesetzt wurde und unter anderem die Entwicklung von Grasland-Ökosystemmodellen vorantrieb. Das *IBP* legte den Grundstein für die heute laufenden Arbeiten in diesem Bereich (Jones et al., 2017).

Das erste umfassende Modell für Kartoffeln wurde 1984 von Ng und Loomis entworfen. Ng und Loomis machten vom *SUCROS*-Modell von Van Keulen Gebrauch, das damals schon das potentielle Wachstum über Photosynthese und Trockenmasseverteilungen berechnen konnte (Haverkort et al., 2015). In den 1990er Jahren wurden Kartoffelwachstumsmodelle mit Bodenwasser- und Boden-Stickstoffmodellen verknüpft. Diese Modelle wurden danach für Empfehlungen im Bereich der N-Düngung und für die Bewässerungsmaßnahmen herangezogen (MacKerron, 2008). Später berücksichtigte das Modell *WOFOST* (Van Diepen et al. 1989) die Bodenwasser-Beziehungen, um genauere Simulationen der tatsächlichen Erträge zu ermöglichen (Haverkort et al., 2015). Das ursprüngliche Modell *LINTUL-POTATO* wurde in den frühen 1990er Jahren von Kooman und Haverkort (1994) entwickelt. Ziel des Kartoffelmodells war es, das *LINTUL-POTATO-Model* von einem wissenschaftlichen Modell zu einem brauchbaren Werkzeug für die Kartoffelindustrie zu Ertrags- und Qualitätsschätzungen umzufunktionieren, um Erträge und Knollenqualitäten vorherzusagen. Zusätzlich wurde das Modell für eine Analyse von Ertragslücken und zur Bewertung von Wetter- und Klimagefahren eingesetzt (Haverkort et al., 2015). Die meisten Kartoffelwachstumsmodelle wurden von anderen, allgemeinen Pflanzenwachstumsmodellen abgeleitet oder auch verschmolzen (aus *LINTUL* wurde *LINTUL-Potato*) (Kooman and Haverkort, 1995). Das *SIRIUS Wheat Model* diente beispielsweise als Ausgangsmodell für das *POTATO CALCULATOR Model* (Jamieson et al., 2006), um ihre Performance zu verbessern. Das *APSIM- Model* wurde 1991 von der *APSRU* – der „Agricultural Production Systems Research Unit“ – in Australien entwickelt. *APSIM* ist im Vergleich zu anderen ein sehr komplexes Modell, das nicht nur die biophysikalischen Prozesse in Agrarsystemen simulieren und Ertragsprognosen abgeben konnte, sondern es konnte als eines der ersten Modelle die Ergebnisse aus wirtschaftlichen Entscheidungsprozessen im Agrarmanagement abschätzen (vgl. Keating et al., 2003).

2.1.2 Wahl des Modells

Anhand der Modellierung landwirtschaftlicher Systeme zeigt sich, dass wichtige Beiträge aus verschiedenen Disziplinen geleistet wurden, die sich mit unterschiedlichen Produktionssystemen am Feld bis hin zur betrieblichen Ebene und darüber hinaus befassen. Es können verschiedene Komponentenmodelle aus verschiedenen Disziplinen auf unterschiedliche Weise kombiniert werden, um umfassendere Systemmodelle zu erstellen, die biophysikalische, sozioökonomische und ökologische Reaktionen berücksichtigen (Jones et al., 2014). Bei steigenden Ansprüchen eines Pflanzenwachstumsmodells, die

Simulationsergebnisse so nah wie möglich an die Realität heranzuführen versuchen, besteht jedoch die Gefahr, dass das eigentliche Pflanzenwachstumsmodell aufgrund der Anhäufung von Submodellen und Subkomponenten an Komplexität gewinnt. Ziel muss es aber sein, die Komplexität eines Modells so gering wie möglich und gleichzeitig Datenmenge und Dateneingabe (Inputs) so einfach wie möglich zu halten, um präzise Ergebnisse mit klarer Nachvollziehbarkeit erreichen zu können.

Des Weiteren muss vor Beginn klar sein, welche Ergebnisse (Outputs) man mit der Simulation verfolgen möchte und welches Modell sich dafür eignet (vgl. Palosua et al., 2011). Pflanzenwachstumsmodelle können sehr viele, aber nicht alle Fragen einer Problemstellung beantworten – sie haben Stärken und Schwächen, wie andere Modelle auch. Um die gewünschten Ergebnisse durch die Anwendung eines Modells zu bekommen, muss der Anwender die Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Pflanzenwachstumsmodelle genau kennen (Soltani und Sinclair, 2012). Das Ziel in dieser Arbeit war es, mithilfe eines Modells das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Kartoffeln zu simulieren.

Die Kartoffel als Kulturpflanze ist für ein Pflanzenwachstumsmodell sehr herausfordernd, da sich die Kartoffel vegetativ vermehrt und ausbreitet und die Knolle zudem ein lebender Organismus ist (Brown et al., 2011). Von rund 40 Kartoffelwachstumsmodellen, die die Autoren Raymondo et al., 2014 in ihrem Review-Paper aufgelistet haben, können generell nur drei von ihnen den Ertrag simulieren. Dazu zählt auch *APSIM*. Zudem sind die meisten Modelle nur auf Wasser- und Stickstoffkreisläufe ausgelegt. *APSIM* schafft aber auch hier die Möglichkeit, neben der Simulation des Ertrages und der Kreisläufe von Wasser und Stickstoff, die Komponenten der Fruchtfolge und jene des Kulturführungsmanagements miteinzubeziehen (Brown et al., 2011), was wiederum der Grund für die Auswahl des Modells war.

2.2 APSIM

Die Entwicklung von APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) begann 1991 von der APSRU – der „Agricultural Production Systems Research Unit“ – in Australien. APSIM ist ein Modellierungsprogramm für biophysikalische Prozesse unterschiedlicher Kulturpflanzen und wird international als ein fortschrittliches Simulationsmodell für komplexe Agrarsysteme angesehen (vgl. Keating et al., 2003; Holzworth et al., 2014). APSIM ist nach Pflanzen-, Boden- und Managementmodulen strukturiert (<https://www.apsim.info>, abgerufen am 15.11.2020). Diese Module beinhalten eine Auswahl an verschiedenen Tools von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, eine Auswahl an Bodenprozessen wie Stickstoff- und Phosphortransformationen, Bodenwasserbilanzen, pH-Wert- und Bodenerosionsberechnungen bis hin zu unterschiedlichen Management-Tools für die Kulturführung (Abb.1). APSIM war eines der ersten Modelle, das nicht nur diese biophysikalischen Prozesse in Agrarsystemen simulieren konnte, sondern es ermöglichte auch die Ergebnisse (Outcomes) aus ökonomischen und ökologischen Entscheidungsprozessen im Agrarmanagement widerzuspiegeln und zugleich klimatische Risiken miteinzuberechnen (vgl. Keating et al., 2003). APSIM wird auch verwendet, um Möglichkeiten und Lösungen auf aktuelle Fragen der Ernährungssicherheit, der Anpassung an den Klimawandel und den Emissionshandel (orig. „carbon trading“) bieten zu können (<https://www.apsim.info>, abgerufen am 15.11.2020).

Die Simulationsprozesse selbst sind in APSIM sehr kompliziert und schwer nachzuvollziehen, da die technisch-wissenschaftliche Dokumentation nicht vollständig vorhanden ist. Aufgrund der Kompliziertheit sind viele Inputparameter in APSIM grundsätzlich vorgegeben und müssen vom Anwender nicht verändert werden, bei Bedarf aber verändert werden können (vgl. Soltani und Sinclair, 2015).

In den folgenden Abschnitten wird das „*APSIM Potato-Model*“, das speziell für die Simulation von Phänologie und Ertragsbildung von Kartoffelbeständen entwickelt wurde, erklärt. Als Quelle dient die Vorlage von Brown et al. (2011), die das Kartoffelmodell erstmals beschrieben haben. Die genaue Beschreibung des Modells ist auf der Homepage www.apsim.info zu finden.

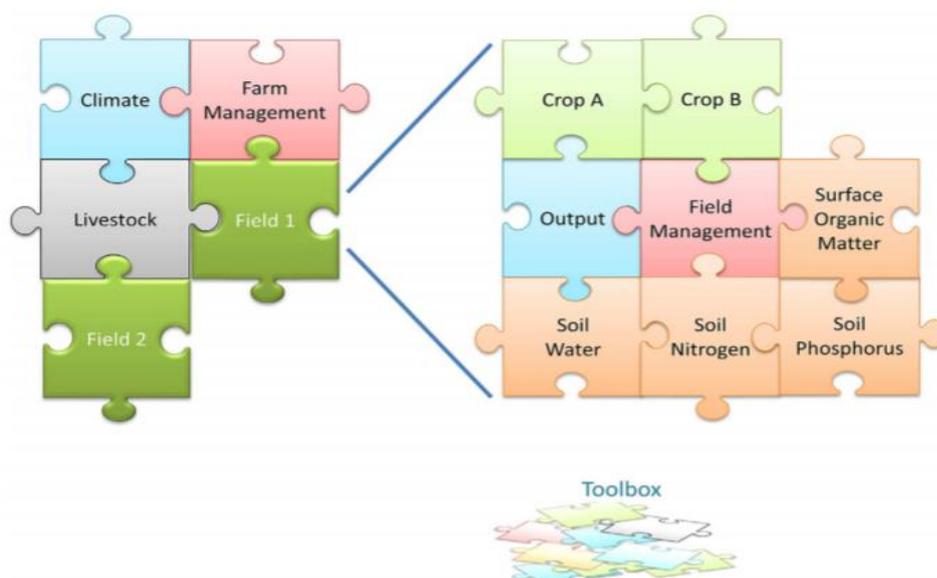


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung eines APSIM-Pflanzenwachstumsmodells (<https://www.apsim.info/apsim-model/>).

2.3 Das APSIM Potato-Model

Sofern nicht anders erwähnt, wurde das *APSIM Potato-Model* erstmals von Brown et al. (2011) beschrieben. Es ist ein umfassendes, deterministisches Pflanzenwachstumsmodell, das in täglichen Zeitstufen aufgebaut ist. Über ein spezielles, sogenanntes „Vermittler-Modul“ schafft das Modell die Möglichkeit, einen expliziten Link zwischen Trockenmassezuwächsen (*dry mass - DM*) und Stickstoffkreisläufen (*nitrogen - N*) in Pflanze und Boden zu schaffen. Weitere Gründe, warum *APSIM* für die Kartoffelmodellierung ausgewählt wurde, sind, dass das Modell stabile Wasser- und Stickstoffmodelle beinhaltet, die Möglichkeit einer Eingabe von Fruchtfolgen hat und eindrucksvolle Managementverfahren miteinbezogen werden können.

Das Kartoffelmodell besteht aus verschiedenen Modellkomponenten:

- dem **Phänologie-Modell**, das die Entwicklung den Phänologiestadien simuliert,
- dem **Struktur-Modell**, welches die Pflanzenmorphologie simuliert,
- dem **Wachstumsmodell**, das den Stickstoffbedarf und den Trockenmassezuwachs der jeweiligen Pflanzenorgane simuliert und
- dem „**Vermittler**“, der den Bedarf an Stickstoff und Trockenmasse den unterschiedlichen Pflanzenorganen zuordnet und verteilt.

In den folgenden Abschnitten sind der Aufbau und der Simulationsablauf des Modells sowie Aufgabe des „Vermittlers“ vereinfacht erklärt. Die Erklärung folgt der Beschreibung nach Brown et al. (2011).

2.3.1 Strukturaufbau des Modells

Das *APSIM Potato-Model* bietet die Möglichkeit, das Wachstum (= kumulierter Tageszuwachs der Trockenmasse), die N-Aufnahme und die Wassernutzung der Pflanzen zu simulieren.

Die *tägliche Zunahme der Trockenmasse* (dry matter, DM) wird grundsätzlich bei allen Kulturpflanzen in *APSIM* gleich berechnet:

$$\Delta DM = Radn \times \frac{I}{I_0} \times RUE \times fw \times ft \times fCO_2 \quad (2.1)$$

Radn: tägliche Sonneneinstrahlung [MJ m⁻²]

$\frac{I}{I_0}$: Fraktion der Sonnenstrahlung, die die Pflanze täglich abfängt (abhängig von der Blattdecke; wird über den Extinktionskoeffizient von konstanten 0.8 berechnet)

RUE: potentielle Strahlennutzungseffizienz (konstanter Wert von 1.44 [g/MJ])

fw: Faktor Wasserstress von 1 (adäquates Wasserangebot) bis 0 (komplett trockener Boden)

ft: Faktor Temperaturstress (steigt von 0 ab einer tägl. Durchschnittstemp. > 2°C; bleibt bei 1 zw. 12-24°C; nimmt Richtung 0 ab, wenn Temp. >34°C)

fCO₂: Faktor CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (1, wenn CO₂=350ppm)

Die DM-Berechnung ist das Produkt aus der täglichen Sonneneinstrahlung [MJ m⁻²], der Strahlungsaufnahme, die die Pflanze täglich abfängt, der potentiellen Strahlungsnutzungseffizienz [g MJ⁻¹] und aus den Stressfaktoren aus Wasser, Temperatur und dem CO₂-Gehalt [Werte zw. 0-1]. Die Strahlungsaufnahme ist abhängig von der Blattdecke der Kartoffelpflanze, daher wird auch später folgend der Vorgang der Blattdeckenmodellierung kurz erläutert.

2.3.2 Phänologie

Das Modell simuliert die Entwicklung der Kartoffel nach Entwicklungsphasen. Der Beginn einer jeden Entwicklungsphase ist in *APSIM* von der Temperatursumme abhängig, auch jene, die über das Auftreten des ersten Blattes bis zur Seneszenz der Blätter gesteuert werden. Jede Phase benötigt ein Zielsignal (*Target*), demnach die Summe einer täglich kumulierten Temperatur über einen vorgegebenen Zeitraum, die erreicht werden muss, damit die darauffolgende Phase beginnen kann. Dafür wird die sogenannte „*Thermal Time*“ verwendet, um die Dauer zwischen den Phasen festzulegen. Sie wird über das Mittel von jeweils drei Temperatur-Schätzungen in jeder Stunde berechnet. Die *Thermal Time* wird solange akkumuliert, bis das Endziel der Summe (= *Target*) erreicht ist. Danach wird die nächste Phase eingeleitet. Die Minimumtemperaturen für die Kartoffelsimulation liegen bei 2 Grad (Brown et al 2011; Oliveira, 2015) und die Maximumtemperaturen bei 30 Grad (Van Keulen et al, 1995).

Im *APSIM Potato-Model* wird in acht Entwicklungsstadien und sieben Entwicklungsphasen unterteilt, die bei der Simulation der phänologischen Entwicklung der Kartoffelpflanzen verwendet werden. (Tabelle 1).

Tabelle 1: Entwicklungsphasen und Entwicklungsstadien für die Simulation der Kartoffelpflanzen im APSIM Potato-Model.

Entwicklungsstadium	Entwicklungsphase	Definition
<i>1 Planting</i>		Legen der Kartoffelknollen
	<i>Dormant</i>	Dormanz (Phase zw. Legen und erstem Durchstoßen der Keimlinge)
<i>2 Peeping</i>		Keimlinge durchstoßen der Erdkruste
	<i>Sprouting</i>	Keimung (Phase zw. Durchstoßen und Erscheinen der Pflanzen)
<i>3 Emergence</i>		Erscheinen der Pflanze
	<i>Vegetative</i>	Trockenmassezunahme (vom Auflaufen der Pflanze bis zum Beginn des Knollenwachstums)
<i>4 TuberInitiation</i>		Knollenbildung
	<i>Early Tuber</i>	Früher Knollenansatz (Beginn Knollenansatz bis zum Auftreten des letzten Blattes am Hauptstängel)
<i>5 FinalLeaf</i>		Ende des Blattwachstums des letzten Blattes am Hauptstängel
	<i>Later Tuber</i>	Später Knollenansatz (Aufkommen der letzten Blätter bis Seneszenz der letzten Blätter)
<i>6 FullSenescence</i>		Das letzte Blatt am Hauptstängel ist komplett abgestorben.
	<i>Senesced</i>	Alterung (von der vollen Seneszenz bis zur Knollenreife)
<i>7 Maturity</i>		Knollenreife
	<i>Maturity</i>	Fertige Knollenreife (beginnend von der Reife bis zur Keimruhe); Ende der Phänologie.
<i>8 Eternity</i>		Vollreife; Schalenfestigkeit

Besonderheiten der Entwicklungsphasen (der simulierten Phänologie)

Die sogenannte „*Sprouting Phase*“ kontrolliert, wann die Pflanzenkeimlinge am Feld erstmals auftreten. Bei der Kartoffel am Feld ist dies vom physiologischen Zustand der Saatkollen beim Legetermin abhängig. Diese Phase ist aufgrund verschiedener Beeinflussungen schwer zu modellieren, da die Kartoffelknolle ein lebender Organismus ist und sich vegetativ vermehrt. Dem Verwender des Modells steht also derzeit nur die Veränderung der Legetiefe zur Verfügung, die allein durch die Kulturführung (Managementtool im Modell) beeinflussbar ist. Das *Target* der *Thermal Time* wird hier berechnet mit:

$$\text{Target} = \text{Sowing Depth} \times \text{ShootRate [fixed]} + \text{ShootLag [fixed]} \quad (2.2)$$

Während der sogenannten „*Vegetative Phase*“ wird nur das Wachstum von Stängel, Wurzel und Blätter simuliert. Auch hier ist am Feld diese Phase abhängig vom physiologischen Zustand der Saatkollen beim Legetermin. In der Simulation ist daher die *Thermal Time* bei der vegetativen Phase konstant.

Die „*Early-Tuber Phase*“ geht bis zum Ende des Wachstums des letzten Blattes am Hauptstängel. Die Dauer ist festgelegt über die Blatterscheinungsrate (*Structure.Phyllchron*) und Blattanzahl am Hauptstängel (*Structure.FinalLeafNumber*). Diese beiden Werte sind wichtig für die Parametrisierung, um die Wachstumsdauer vorauszusagen. Die *FinalLeafNumber* ist auch wieder von der Vorbehandlung der Saatkollen beeinflusst (kann aber eingestellt werden in „*PotatoPlantandHarvest*“, wenn mehr Wissen über gewisse Sorten zur Verfügung stehen).

Die „*Late-Tuber Phase*“ geht bis zur vollständigen Seneszenz des letzten Hauptstängelblattes. Daher ist diese Phase von der Blattanzahl am Hauptstängel abhängig und der Alterungsrate (die wiederum abhängig vom Auftauchen des finalen Blattes ist).

Während der „*Senesced Phase*“ hat die Kartoffel keine oberirdische Biomasse mehr. Die Knollen reifen aber noch bis zu Schalenfestigkeit.

Modellierung der Blattdecke

Die Blattdecke wird über die Anzahl der Hauptstängel modelliert. Die Anzahl der Hauptstängel ist abhängig vom Legeabstand, Reihenabstand und der Anzahl der Stängel, die jede Knolle produziert. Die Hauptstängelanzahl ist also von der Kartoffelsorte und der Kulturführung abhängig. Die Gesamtstängelanzahl am Hauptstängel wird als konstant betrachtet, da es in Zukunft erst möglich sein wird, über eine Funktion der Knollengröße und der Vorerntebehandlung die Stängelanzahl individuell zu modellieren.

Blattanzahl und Blattgröße an jedem Hauptstängel ist über den Tag des Durchstoßens der Pflanze in der „*Sprouting Phase*“ vorgegeben. Das Auftauchen weiterer Blätter am Hauptstängel wird über die *Thermal Time* und das *Phyllchron* vorhergesagt.

Die maximale Blattanzahl ist mit 34 festgelegt. In der Realität wäre die Blattbildung eine Funktion der Photoperiode. Da aber alle Daten auf den Legezeitpunkt beruhen und nur sehr kurze Zeitfenster vorkommen, verzichtet man darauf.

Die Potentielle Blattflächenzunahme (*leaf area expansion*) und die spezifische Blattfläche (*specific leaf area, SLA*) steuern den Bedarf der Blätter an Trockenmasse (DM). Wenn der DM-Bedarf der Blätter nicht vollständig erfüllt wird, nimmt die Blattdicke ab. Wenn auch die

DM-Zuteilung für die Erlangung der maximalen Blattfläche ungenügend ausfällt, wird auch das Blattflächenwachstum (*leaf area expansion*) gehemmt. Den gleichen Effekt erbringt der Wasserstress.

2.3.3 Der Vermittler

Der wichtigste Akteur in dieser Modellierung ist der sog. „*Vermittler*“ (in *APSIM* der sog. „*Arbitrator*“). Er legt täglich fest, wie viel von der potenziellen DM- Produktion assimiliert werden kann und wie die Verteilung von DM und N in den jeweiligen Organen verläuft. Der *Vermittler* wird aber auch in anderen Pflanzenwachstumsmodellen, wie beispielsweise im *APSIM Plant.Net-Model* (Brown et al., 2011), eingesetzt.

Zuteilung der Trockenmasse über den *Vermittler*

Alle Pflanzenorgane haben ein gewisses Angebot und einen gewissen Bedarf an Trockenmasse (DM) und Stickstoff (N), welche dem *Vermittler* Bescheid bekannt sind. Der *Vermittler* kann dadurch die Bedürfnisse jedes einzelnen Organs steuern – abhängig von der abgerufenen Information. Jedes Pflanzenorgan hat die Trockenmasse und den aufgenommenen Stickstoff in drei Formen vorliegen, die abhängig von der Art der Übertragung der (überschüssigen, produzierten) Trockenmasse des abgebenden Organs sind:

- Strukturelle Form,
- Metabolische Form,
- Nichtstrukturelle Form.

Im *Plant.Net Framework* gibt es sogenannte „Standard-Organen“ und einen *Vermittler*, im *APSIM Potato-Model* wurde ein alternativer *Vermittler* und Klassen von Standard-Organen hinzugefügt.

Der *Vermittler* besitzt im *APSIM Potato-Model* aktuelle Informationen über Angebot und Nachfrage der benötigten Trockenmasse aller Pflanzenorgane und ordnet über diese Information die potentielle Trockenmasse dementsprechend zu. Ist das Angebot größer als die Nachfrage, teilt der *Vermittler* den Überschuss den sogenannten „*Sink-Organen*“ zu, das bei der Kartoffelpflanze die Knollen wären. Ist jedoch die Nachfrage nach der benötigten Trockenmasse größer als das Angebot, wird die Trockenmasse aus labilen Trockenmassen, die in Blättern und Stängeln enthalten und als nicht strukturgebend eingestuft sind, remobilisiert.

Zuteilung von Stickstoff (N) über den *Vermittler*

Stickstoff (N) wird über den Bedarf der einzelnen Pflanzenorgane berechnet. Auch hier wird vom *Vermittler* die Stickstoffzufuhr über den vorigen Schritt der Trockenmassezuteilung und über akkumulierte Stickstoffdefizite gesteuert. Die Umverteilung erfolgt nach einem geordneten Prinzip. Wenn ersteres nicht verfügbar ist, wird die darauffolgende Variante für die Stickstoffzufuhr gewählt:

- Stickstoff aus alternden Pflanzenorganen
- Stickstoffaufnahme über den Boden
- Remobilisierung von Stickstoff aus nicht-strukturellen Pools in Pflanzenorganen.

Sobald die Stickstoffzuordnung („wer braucht was“) gesetzt ist, legt der *Vermittler* fest, ob genug Stickstoff für die Assimilation der potentiellen Trockenmasse verfügbar ist („was ist vorhanden“). Wenn nicht, wird die Trockenmassezuordnung bis auf das Minimum eines jeden Pflanzenorgans reduziert.

2.3.4 Ablauf der Übertragung von Trockenmasse und Stickstoff in der Simulation

Der *Vermittler* passiert verschiedene fortlaufende Stufen, um festzustellen, welche Menge an Trockenmasse und Stickstoff jedes einzelne Organ benötigt:

1. **Angebot und Bedarf der Trockenmasse** eines jeden einzelnen Pflanzenorgans werden über den *Vermittler* abgefragt und aufsummiert.
2. **Trockenmassezuteilung.** Hier wird festgelegt, wie viel Trockenmasse jedes Organ bekommt, sofern genügend Stickstoff vorhanden ist, um die minimale Stickstoff-Konzentration des Organs zu erreichen.

Nach den ersten beiden Stufen legt der *Vermittler* die potentiellen Trockenmassezuteilungen fest und geht weiter zur Stickstoffverteilung:

3. **Angebot und Bedarf des Stickstoffs** eines jeden einzelnen Pflanzenorgans werden über den *Vermittler* abgefragt und aufsummiert. Der *Vermittler* ordnet nach Wichtigkeit der Pflanzenorgane (strukturelle und metabolische Pools) und verteilt zunächst die kleinsten benötigten Mengen, die zuerst das wichtigste Organ benötigt (Knollen > Wurzeln > Blatt > Stängel).
Danach wird das Angebot an Stickstoff (*N-Supply*) auf die nichtstrukturellen (=Luxus) Organe mit zusätzlichem Bedürfnis aufgeteilt (in Relation zum Gesamtbedarf der Pflanze; Organe mit dem größten Bedürfnis bekommen den größten Teil). Danach setzt der *Vermittler* die aufgenommene Stickstoffmenge eines jeden Organs fest.
4. **N-Umverteilung** (*Reallocation*): Hier wird Stickstoff aus alten (teilweise abgestorbenen) Organen entnommen und Pflanzenorganen mit Bedarf zugeführt. Stickstoff wurde schon über die Pflanze aufgenommen und in organische Formen umgewandelt, welcher nun für die mineralische N-Aufnahme dient.
5. **N-Aufnahme** (*N-Uptake*): Hier wird Stickstoff aus dem Boden an die restlichen Bedürfnisse der Pflanzenorgane durch den *Vermittler* verteilt.
Wenn die Nachfrage nach Stickstoff größer als die mögliche Stickstoffaufnahme ist, dann beginnt die Stickstoffkonzentration in den Organen abzunehmen. Ist die Nachfrage nach Stickstoff geringer als die eine potentielle Aufnahme, verbleibt der Stickstoff im Boden.
6. **[N-Retranslocation]**: Dieser Vorgang ist nur involviert, wenn die Umverteilung und die Aufnahme des Stickstoffs die Bedürfnisse von strukturellen und metabolischen Pflanzenteilen nicht erfüllen können. Der benötigte Stickstoff wird dann aus nichtstrukturellen Teilen in wachsende, strukturelle Organe umverteilt. Wenn auch dies zu wenig ist, wird Stickstoff aus metabolischen Teilen für wachsende Organe herangezogen.

7. **Aktuelle DM-Zuordnung:** Wie bereits oben erwähnt, ist die Zuordnung der Trockenmasse zuvor über die Zuordnung des Stickstoffs festgelegt. Der *Vermittler* überprüft wieder die strukturellen und metabolischen Bedürfnisse der einzelnen Organe nach Stickstoff. Wenn die Bedürfnisse nicht erfüllt sind, dann hemmt dieser die Trockenmassezunahme – sprich das Wachstum des jeweiligen Organs - und verwirft den Trockenmasse-Überschuss. In Realität soll dies einen Stickstoffstress der Pflanze darstellen, in dem die Pflanze die Photosyntheseaktivität herunterfährt und „*Sink-Organs*“ nicht vollständig beliefert werden können. Dies hat beispielsweise einen abnehmenden Knollenertrag zur Folge.
8. Nach diesen Schritten sendet der *Vermittler* die Ergebnisse den jeweiligen Pflanzenorganen, die wiederum den Organstatus erneut ändern.

3 Forschungsfrage

Ziel der Arbeit war die Sammlung von Daten aus *On-Farm*-Versuchen zur Parametrisierung von des *APSIM Potato Models* für österreichische Verhältnisse. Um das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Kartoffeln unter Einbeziehung von individuellen Kulturführungsmaßnahmen möglichst einfach zu simulieren, wurde folgende Forschungsfrage definiert:

Wie gut kann das Pflanzenwachstumsmodell APSIM das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung von Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) unter österreichischen Gegebenheiten simulieren?

4 Material und Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden im Jahr 2018 zwei *On-Farm*-Versuche mit einem Bewässerungsversuch und einem Düngungsversuch an Kartoffeln an zwei Standorten in Niederösterreich durchgeführt. Dabei wurden sämtliche Daten für die Parametrisierung und Bewertung des Modells erfasst.

4.1 Standorte

Für die Versuchsanlage wurden für diese Arbeit zwei Standorte in Niederösterreich ausgewählt. Für den Versuch der Stickstoffstufen wurde der Standort Zwettl herangezogen, für den Bewässerungsversuch der Standort Oberhausen.

4.1.1 Oberhausen

Region: Der Versuchsstandort Oberhausen befindet sich östlich von Wien, einem intensiv genutzten Ackerbauggebiet im Marchfeld, und liegt auf etwa 156 m über dem Meeresspiegel. Das 900 km² große Marchfeld liegt zwischen den beiden Großstädten Wien und Bratislava und ist eine der größten Ebenen Österreichs (regionmarchfeld.at,2019).

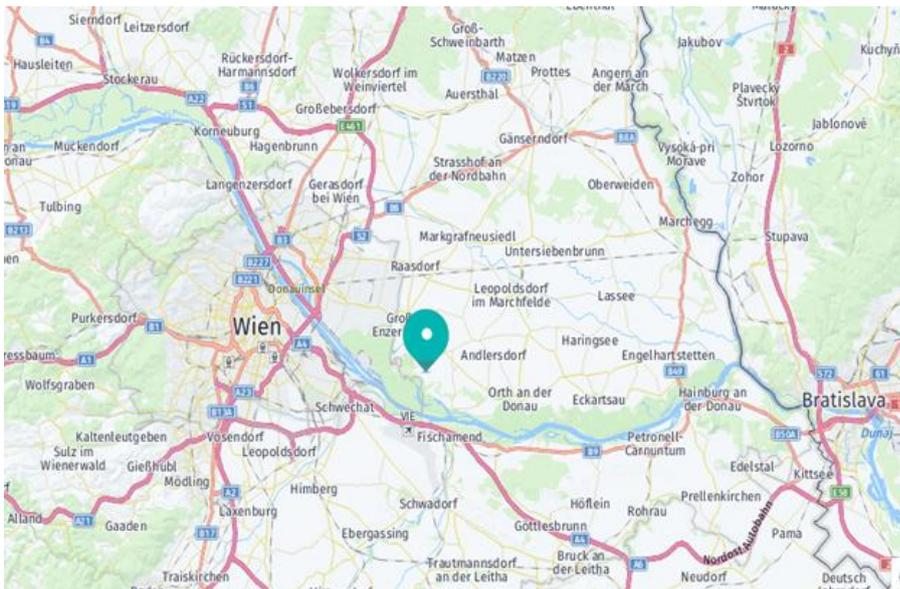


Abbildung 2: Lage des Versuchsstandortes in Oberhausen.

Geologisch gesehen ist das Marchfeld Teil des Wiener Beckens, ein Senkungsgebiet zwischen Ostalpen und Karpaten. Besondere Bodentypen mit einem hohen Humusanteil und unterschiedlich hohen Lehm- und Lößanteilen sowie das pannonische Klima bieten hier optimale Bedingungen für den Anbau von Gemüse (bmnt.gv.at, 2019). Die Region Marchfeld mit seinen hochwertigen Ackerböden ist eine der intensivsten, landwirtschaftlich genutzten Flächen Österreichs. Das Marchfeld gilt auch als die „Kornkammer Österreichs“, jedoch hat sich in den letzten Jahren vermehrt der Gemüsebau in dieser Region etabliert.

Durch Ablagerungen und Terrassenbildungen von Flüssen, wie jene der Donau, sowie aufgrund von Verwitterungsprozessen und Winderosionen entstanden über Millionen von Jahren in dieser Region fruchtbare Böden wie Tschernoseme oder Auböden.

Klima: Der pannonische Klimaeinfluss prägt das Marchfeld maßgeblich und gilt als Übergangsbereich zwischen dem osteuropäischen Kontinentalklima und dem mediterranen Klima in Westeuropa. Das Marchfeld zählt mit rund 550 mm Jahresdurchschnittsniederschlag zu den trockensten Regionen Österreichs. Häufige Trockenperioden und geringe Niederschläge sind typische Wetterkapriolen für dieses Gebiet (vgl. Fink et al. 1955). Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 9,6 Grad Celsius. Die Sommer sind sehr trocken und die Winter sehr kalt. Bis zu 1.900 Sonnenstunden und beständiger Wind prägen die Landschaft. Langanhaltende Trockenperioden führen immer wieder zu Ertragsausfällen, daher gewinnt die Beregnung von Kulturen wie Gemüse, Zuckerrübe oder Kartoffel zunehmend an Bedeutung. Zur Erzielung ausgeglichener Erträge ist klimabedingt eine Bewässerung besonders bei Feldgemüse und Hackfrüchten erforderlich (Embacher, 2009). Aufgrund einer jährlich langen Vegetationsperiode eignet sich das Marchfeld sehr gut für den Ackerbau. Heute werden rund 19% der weltweiten landwirtschaftlichen Nutzfläche bewässert. Auf diesen 19% Fläche werden jedoch 40% der globalen Nahrungsmittel produziert (Molden, 2010 zitiert nach Leibundgut und Vonderstrass, 2016). Dieses Verhältnis weist deutlich auf die Bedeutung der Bewässerung für die Nahrungsgüterversorgung hin (Leibundgut und Vonderstrass, 2016).

4.1.2 Zwettl

Region: Zwettl liegt mitten im Waldviertel, eingebettet in einer Hügellandschaft, wo der Fluss Zwettl in den Kamp mündet. Das Waldviertel ist eines der fünf Hauptregionen Niederösterreichs. Heute werden rund 51% der Fläche landwirtschaftlich genutzt: im westlichen Waldviertel werden Ackerbau (Roggen, Kartoffeln, Mohn, Braugerste) Forstwirtschaft, Grünland- und Viehwirtschaft (Milchvieh, Mutterkuhhaltung) sowie Fischzucht (Waldviertler Karpfen) betrieben, im östlichen Waldviertel überwiegt der Ackerbau (Weizen, Gerste, Zuckerrüben, Mais, Raps und Sonnenblumen) (austria-forum.org, 2019).

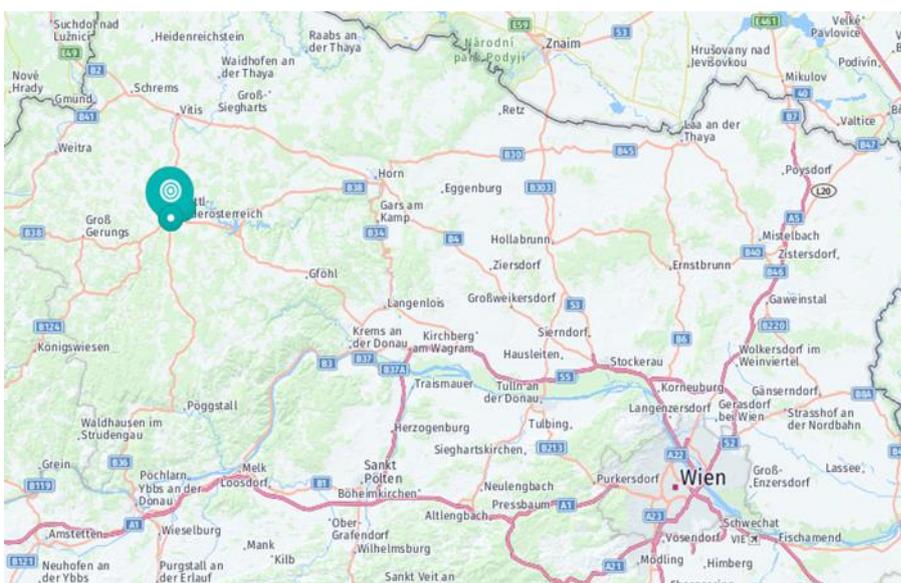


Abbildung 3: Lage des Versuchsstandortes in Zwettl.

Die wellige, hügelige Gebirgslandschaft ist Teil der böhmischen Masse und besteht vorwiegend aus Graniten und Gneisen. Diese Gesteine prägen die Böden in dieser Region maßgeblich. Hauptsächlich sind hier Braunerde-Böden zu finden, aber auch Podsole, die aufgrund von verwitterten, feinkörnigen Graniten eine geringe Bodenfruchtbarkeit aufweisen.

Klima: Das Gebiet ist Teil des kontinentalen Übergangsklimas und geht im Osten zum pannonischen Klima über. Daher ist es rund um Zwettl auch kühl und rau und aufgrund der vielen Täler und Senken ein Anziehungspunkt für Früh- und Spätfröste. Das Waldviertler Klima wird daher auch als „baltisches Klima“ oder „Hochlandklima“ bezeichnet. Zusätzlich weist das Waldviertel im Durchschnitt 14 Vegetationstage weniger als das Österreichsmittel auf (Harlfinger, 1999).

Die Vegetationszeit ist daher kurz gehalten, raue Nächte mit viel Nebel sorgen zudem in der Herbstzeit für verspätete Reifezeiten der landwirtschaftlichen Kulturen. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt in Zwettl bei etwa 6,6 Grad Celsius, die langjährige Niederschlagsmenge beträgt im Mittel rund 667 Millimeter. Der Niederschlag ist gleichmäßig verteilt, jedoch sind die Monate Mai bis August mit Mengen zwischen 57 und 96 Liter pro Quadratmeter die regenreichsten Monate. Zudem sind die vielen Sonnenstunden von bis zu 6,6 Stunden im Sommerhalbjahr charakteristisch für Zwettl (vgl. ZAMG, 2019).

4.2 Versuchsaufbau

Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche On-Farm-Versuche angelegt. Beide Versuche wurden im Zeitraum zwischen April und Oktober 2018 auf zwei unterschiedlichen, landwirtschaftlichen Partnerbetrieben der Universität für Bodenkultur durchgeführt. Der Standort Oberhausen umfasste einen Versuch mit zwei Bewässerungsstufen und jeweils drei Wiederholungen bei gleichbleibender Stickstoffdüngung in zwei unterschiedlichen Kartoffelsorten „Jelly“ und „Innovator“. Am zweiten Standort Zwettl wurde ein Stickstoffversuch mit zwei Düngungsvarianten bei drei Wiederholungen in der Speisesorte „Ditta“ durchgeführt.

4.2.1 Oberhausen

Abbildung 4 zeigt das Versuchsdesign am Standort Oberhausen. Der Versuchsplan beinhaltete die zwei Bewässerungsstufen „not irrigated“ und „irrigated“ (= engl. für nicht bewässert und bewässert). Alle Parzellen wurden genau vermessen. Für beide Sorten wurde das exakt gleiche Versuchsdesign verwendet.

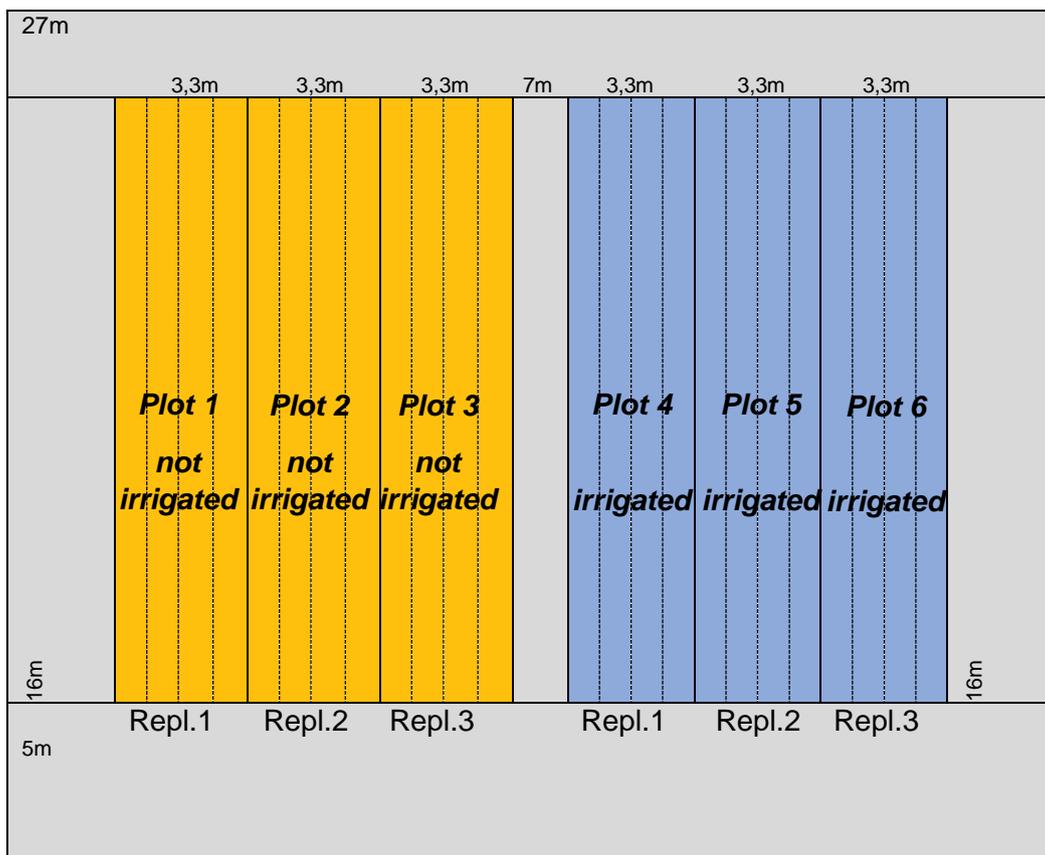


Abbildung 4: Versuchsdesign am Beispiel der Kartoffelsorte „Jelly“ des Standortes Oberhausen mit zwei Bewässerungsstufen; gelb: nicht bewässerte Parzellen; blau: bewässerte Parzellen.

Die braun unterlegte Fläche ist die nichtbewässerte Variante, die blau unterlegte Fläche die bewässerte. Eine Parzelle stellt aufgrund des Anbausystems jeweils zwei Doppelreihen mit einem Reihenabstand von 0,825 m und einem Pflanzabstand von 0,40 m in der Reihe dar. Beide Bewässerungsstufen wurden mit drei Replikationen belegt. Die einzelnen Parzellen sind insgesamt 3,30 m breit und 16 m lang. Zwischen den Reihen wurde ein Puffer in zwei Doppelreihen in einer Länge von circa 7 m angelegt, um eine gegenseitige Beeinflussung der Messergebnisse auszuschließen. Die Breiten- und Längenauswahl ergaben sich daraus, dass für eine Parzelle vier Reihen (= zwei Doppelreihen) gewählt wurden. Damit sich eine Datenbeeinflussung über Fahrgassen (Verzerrung der Ergebnisse durch Bodenverdichtungen und/oder Staunässe) vermeiden lässt, war es notwendig, die Breite der Parzellen zu reduzieren und das Längenmaß der Parzellen zu vergrößern. Zusätzlich wurden für die Probenziehungen, die für weitere labortechnische Untersuchungen erforderlich waren, insgesamt 150 Einzelpflanzen benötigt. Da eine Parzelle aus vier Einzelreihen bestand, wurden pro Reihe 37,5 Einzelpflanzen benötigt, die auf 40 gerundet wurden. Daraus ergab sich eine endgültige Parzellenlänge von 16 m.

Die Bewässerung erfolgte mittels Tropfschläuchen, welche beim Legen der Kartoffeln in jeden Damm auf ca. 5 cm unterhalb der Dammkrone miteingezogen wurden. Die Schläuche wurden danach am Vorgewende über ein Hauptrohr, das für die Wasserzufuhr benötigt wurde, miteinander verbunden. Mit der Tropfbewässerung möchte man das Ertragspotential der Kulturpflanze ausschöpfen, indem man Wasser und Nährstoffe in kleinen Mengen bedarfsgerecht und pflanzennah ausbringt (vgl. Eberhard, 2000). Somit ist eine optimale Bodenfeuchte gegeben und genügend Wasser nahe der Feldkapazität verfügbar. Laut Aussage des Landwirtes am Versuchsstandort erlaubt es eine stressfreie Wasseraufnahme über die Wurzel. Die Hauptvorteile der Tropfbewässerung gegenüber „Oberflächenbewässerungen“ sind die geringeren Maschinen-Ausstattung, hohe Produktqualität und Homogenität der Pflanzen, höhere Nutzungseffizienz des Düngers, weniger Unkrautdruck und weniger Arbeitsstunden pro Flächeneinheit (Goyal, 2014). Des Weiteren ist aufgrund des geringen Druckes, den die Tropfschläuche benötigen, eine Kostenersparnis bei den Dieselaggregaten zu erzielen.

4.2.2 Zwettl

Abbildung 5 zeigt den Stickstoffversuch am Standort Zwettl. Hier wurde ein Stickstoffversuch mit zwei Düngungsstufen durchgeführt, die aus einer ungedüngten Variante („No N-fertilisation“) und einer gedüngten Variante („N-fertilisation“) mit jeweils drei Replikationen bestanden.

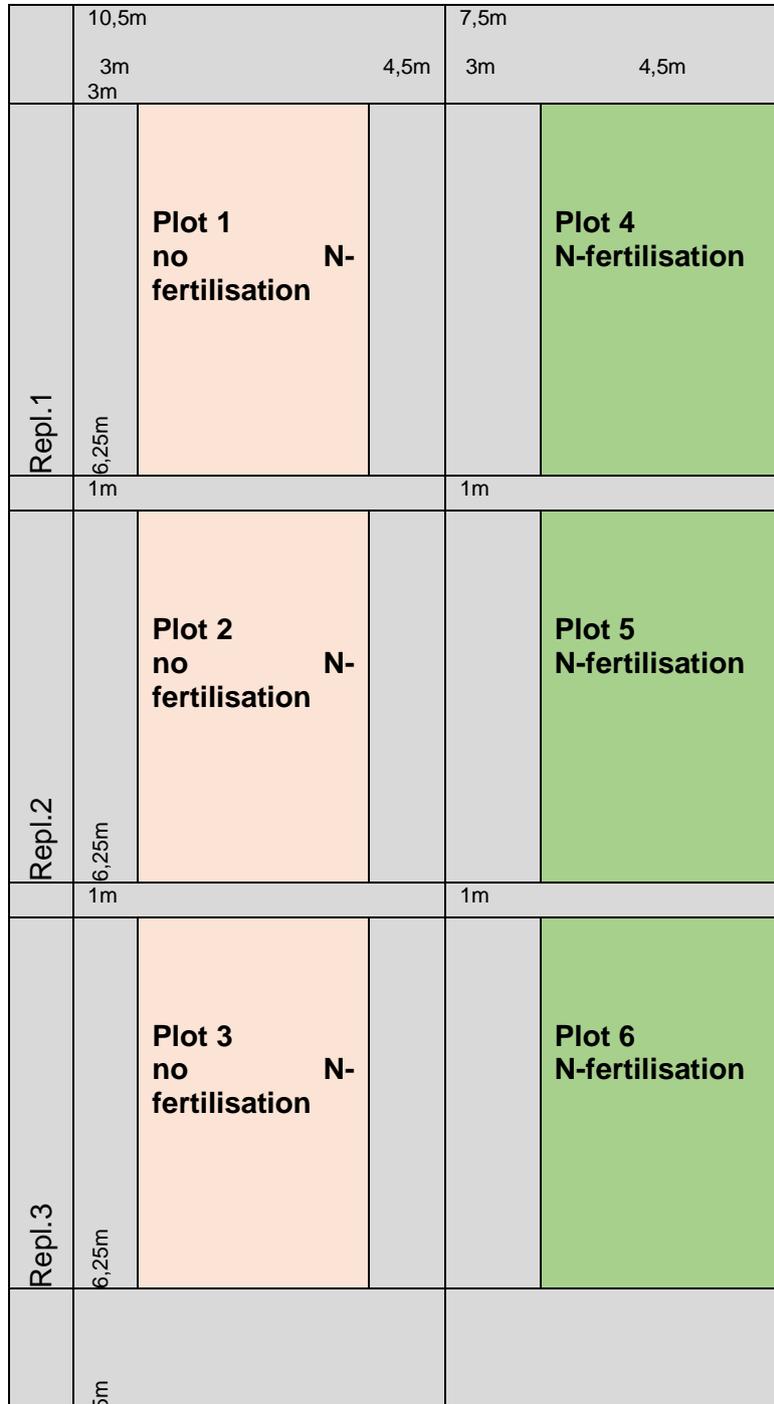


Abbildung 5: Versuchsdesign des Standortes Zwettl mit einer ungedüngten Variante (braun) und einer gedüngten Variante (grün) zu je drei Wiederholungen.

Daraus ergaben sich sechs Parzellen mit jeweils sechs Einzelreihen. Die einzelnen Parzellenmaße betragen in der Breite 4,50 m und in der Länge 6,25 m. Im Gegensatz zum Standort Oberhausen handelte es sich hier um sechs Einzelreihen mit einem Abstand von 0,75 m. Der Legeabstand innerhalb der Reihe betrug rund 0,29 m. Dividiert man die Reihelänge durch den Legeabstand und multipliziert das Ergebnis mit der Anzahl der Reihen, kommt man auf einen Gesamtbestand an Pflanzen von 150 Stück pro Parzellenanlage, die für die Versuchsauswertung benötigt wurden. Auch hier wurde die Versuchsanlage so angelegt, dass Fehler in den auszuwertenden Daten, die beispielsweise durch Fahrgassen auftreten konnten, so gut als möglich vermieden werden können.

4.3 Sortenbeschreibung

Am Standort Oberhausen wurden zwei unterschiedliche Sorten verwendet, „*Innovator*“ als Speiseindustriesorte und „*Jelly*“ als Speisekartoffel. Am Standort Zwettl wurde die klassische Sorte „*Ditta*“, eine bekannte Speisekartoffelsorte, gewählt.

Ditta

Ditta ist die klassische, festkochende Kartoffelsalat- und Beilagensorte, die vor allem in der Gastronomie hohen Zuspruch findet. Zudem ist die Sorte im Lager sehr keimruhig und die Beschädigungsempfindlichkeit bei der Ernte gering. Der Knollenansatz wird als mittelmäßig bis hoch eingestuft und liegt bei 15-20 Knollen (vgl. Mechtler, 2002). Da diese Sorte laut Sortenbeschreibung eine Neigung zu erhöhter Anfälligkeit an *Phytophthora Infestans* zeigt, sind gezielte Fungizidspritzungen erforderlich. Die Boden- und Wasseransprüche werden als mittelmäßig eingestuft und die Stickstoffdüngung liegt bei rund 140 kg pro Hektar. Die am Hektar empfohlene Pflanzdichte liegt bei rund 46.000 Pflanzen (Europlant, 2020).

Innovator

Innovator ist eine mehligke, mittelfrühe Speiseindustriesorte, und dient vorwiegend für die Erzeugung von Pommes-frites. Die Sorte wurde von der holländischen Kartoffelzucht „*HZPC*“ gezüchtet und auf den Markt gebracht. Kennzeichen für diese Sorte sind vor allem der sehr große Sortieranteil von Knollen über 50 Millimeter, die Rauschaligkeit und die langovale Knollenform. Die Sorte ist stark anfällig in Bezug auf *Phytophthora Infestans* und *Rhizoctonia* und verliert bei der Langzeitlagerung an Qualität in der Verarbeitung. Der Knollenansatz liegt im mittleren Bereich mit durchschnittlich 10 Knollen pro Staude bei einer Pflanzdichte von 35.000 bis 38.000 Knollen pro Hektar. Der Stickstoffbedarf ist im Vergleich sehr hoch und liegt bei 160kg pro Hektar (vgl. StMELF Bayern, 2019).

Jelly

Jelly ist eine spät abreifende Speisesorte mit einem guten Speisewert und hohen Knollenerträgen. Für diese vorwiegend festkochende Sorte wird eine verhaltene Stickstoffdüngung mit 80-100 kg empfohlen, um eine möglichst hohe Zahl an marktfähigen Knollen zu erhalten (vgl. StMELF Bayern, 2019), jedoch liegt das Ertragspotential bei bis zu 600 dt/ha (Europlant, 2012). Im Vergleich zu *Innovator* sind die Boden- und Wasseransprüche gering und es werden leichte Bodenstandorte empfohlen. Die Widerstandsfähigkeit gegen *Y-Virus*, *Phytophthora Infestans* und auch gegen Schorf sind gut bis sehr gut. Die Pflanzanzahl pro Hektar liegt bei 46.000 Knollen. Weiters wird die Sorte als sehr gut hitze- und trockentolerant eingestuft.

Tabelle 2: Sortenbeschreibung der Kartoffelsorten „Ditta“, „Jelly“, und „Innovator“ (vgl. EUROPLANT 2020, StMELF Bayern 2019).

Knollenmerkmale	DITTA	JELLY	INNOVATOR
Reife	mittelfrüh	mittelspät	mittelfrüh
Form	langoval	oval	oval/langoval
Fleischfarbe	gelbfleischig	gelb	hellgelb
Schale	genetzt	glatt bis genetzt	genetzt
Größe	mittel – großfallend	mittel – großfallend	großfallend
Augenanzahl und	mittel – hoch	-	-
Augenlage	mittel	mittel	gering
Knollenansatz			
Jungendentwicklung	zügig	zügig	normal
Krankheitsanfälligkeit:			
Blattrollvirus	mittel	mittel	hoch
Y-Virus	gering – mittel	gering	gering – mittel
Krautfäule	mittel	-	hoch
Knollenfäule	gering	-	gering
Schorf	gering – mittel	mittel	gering
Rhizoctonia	gering - mittel	gering	-
Schwarzfleckigkeit	gering	gering	-

4.4 Versuchsdurchführung

Wie bereits oben erwähnt wurden zwei unterschiedliche On-Farm-Versuche angelegt. Der Standort Oberhausen umfasste einen Versuch mit zwei Bewässerungsstufen und drei Wiederholungen bei gleichbleibender Stickstoffdüngung an zwei unterschiedlichen Kartoffelsorten „Jelly“ und „Innovator“. Am Standort Zwettl wurde ein Stickstoffversuch mit zwei Düngungsvarianten bei drei Wiederholungen in der Speisesorte „Ditta“ durchgeführt. Beide Versuche erfolgten im Jahr 2018. Aufgrund der Wetterabhängigkeit weichen die Termine der Probenziehungen der beiden Versuchsstandorte voneinander ab. Da es sich um On-Farm-Versuche, also Versuche auf landwirtschaftlichen Partnerbetrieben handelte, gibt es Unterschiede in der Produktion der Kartoffeln beginnend bei Anbau und Pflege bis hin zur Ernte, da jeder Landwirt nach seinem besten Wissen und Gewissen über die eigene Kulturführung während der Vegetationsperiode entscheidet.

4.4.1 Oberhausen

Tabelle 3 zeigt die Behandlungsschritte der Versuchspartzellen in Oberhausen. Diese waren in beiden Sorten exakt gleich angelegt.

Tabelle 3: Kulturführungsmaßnahmen am Standort Oberhausen.

Düngung Dino Selenum 100; 111,36kg/ha (84 % CaCO ₃ Calciumcarbonat, 5 % MgCo) Alle Schläge	26.03.2018
Düngung Alzon; 114,31kg/ha (46% N, 0%P, 0% K) Alle Schläge	26.03.2018
Düngung Alzon; 155,76kg/ha (46% N, 0%P, 0% K) Alle Schläge	06.04.2018
Anbau Sorte: Jelly und Innovator; Saatstärke: 3,03 Pflanzen/m ²	21.04.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	04.05.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	12.05.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	20.05.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	28.05.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	6.06.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	14.06.2018
Beregnung Parzellen 4,5,6 17mm mit N-Düngung 10mg Nitrat/l	22.06.2018
Ernte	20.09.2018

Alle Parzellen wurden in der Düngung und im Pflanzenschutz gleich behandelt (Tabelle 3). Der Mineraldünger wurde am 26.03.2018 ausgebracht. Das Legen der Kartoffeln wurde am 21.04.2018 bei trockenen Bedingungen durchgeführt. Es erfolgte danach keine Bodenbearbeitung mehr. Die Tropfschläuche wurden mit dem Legen der Kartoffeln fünf

Zentimeter unter der Dammkrone miteingebracht. Mit den Tropfschläuchen wurde im Versuchszeitraum eine Gesamtmenge von 119 Litern pro Hektar ausgebracht. Insgesamt wurden nach dem Anbau sechs Pflanzenschutzüberfahrten getätigt. Die Bodenprobenentnahmen für Bodenwasser und N_{\min} -Gehalt erfolgten am ersten sowie am letzten Probenziehungstermin.

4.4.2 Zwettl

Tabelle 4 zeigt die Behandlungsschritte am Standort Zwettl.

Tabelle 4: Kulturführungsmaßnahmen am Standort Zwettl.

Düngung Linzer TOP 12:12:17 (12% N, 12% P, 17% K); 884kg/ha, Parzelle 4,5,6	17.04.2018
Anbau (Sorte: Ditta; Saatstärke: 4,6 Pflanzen/m ²)	18.04.2018
Beregnung	-
Ernte	16.09.2018

Das Legen der Kartoffeln erfolgte am 18.04.2018. Einen Tag davor wurde die mineralische Grunddüngung von 106 kg Reinstickstoff am Hektar durchgeführt, die mit einem herkömmlichen Düngerstreuer ausgebracht und danach mit einem Kreiseleggenstrich eingearbeitet wurden. Es fand keine Bewässerung der Bestände statt. Als Vorfrucht im Jahr 2016/17 wurde auf dem Schlag Winterweizen angebaut. Nach der Ernte erfolgte kein Zwischenfruchtanbau.

4.5 Boden - Probennahme und Datensammlung

4.5.1 Oberhausen

In Oberhausen wurden an zwei Terminen Bodenproben gezogen. Am 25.04.2018 erfolgte nach dem Legen der Kartoffeln die erste Probenziehung und am 19.09.2018 vor dem Roden die zweite Probenziehung des Versuchs. Es wurde der Bodenstickstoff (kg N_{\min}) und der Wassergehalt im Boden zu Beginn und am Ende der Kartoffelsaison in unterschiedlichen Bodenhorizonten (Tabelle 5) bestimmt. Es wurden Proben aus allen Parzellen jeder Sorte entnommen, wobei in jeder Parzelle ein zufälliger Punkt ausgewählt wurde, der im mittleren Bereich der Parzelle lag. Folgende Utensilien wurden zur Probenziehung herangezogen:

- Bohrstock (Durchmesser: 20 mm; Länge: 1200 mm)
- Schlagbohrer (Hilti)
- Stromaggregat
- Hebeisen und Standfuß zur Bohrstockentnahme aus dem Boden
- Kübel
- Zollstab
- Schraubenzieher, Schreibutensilien, Probensäcke, Transportkühlbox.

Aus Kostengründen und unter der Annahme einer Homogenität des Bodens wurde bei der Probenziehung zu Saisonbeginn aus allen zwölf Parzellen jeweils eine Mischprobe pro Bodenhorizont erstellt. Somit ergaben sich für die erste Bodenanalyse vier unterschiedliche Mischproben. Es wurde mit dem Bohrstock 1,20 m tief gestochen und die Bodenprobe für Bodenwasser und Bodenstickstoff, wie in Tabelle 5 dargestellt, in unterschiedliche Bodenhorizonte aufgeteilt.

Tabelle 5: Ermittelte Bodenwerte und Unterteilung in Bodenhorizonte während der Bodenprobenahme

Bodenwasser- & Bodenstickstoffanalyse			
Bodenhorizont	TOC [%]	N_{\min} [kg ha^{-1}]	grav_w_c [%]
0-30	1,21	17*	8,28
30-60	0,78	43	12,28
60-90	0,33	22	10,68
90-120	0,22	12	8,85

(* nachgereichter Wert aus privater Bodenuntersuchung des Landwirts).

Nach der Bodenprobenziehung wurden die Probensäckchen in die Transportkühlbox gelegt und für die Bodenanalysen schnellstmöglich zur AGES (Agentur für Ernährungssicherheit) überstellt. Danach wurde im Labor der minimale Stickstoffgehalt (N_{\min}) in mg pro 100g Boden sowie der gravimetrische Wassergehalt in Prozent in den jeweiligen Bodenschichten bestimmt.

Der N_{\min} -Gehalt im Boden wird von der AGES nach der ÖNORM L1091 bestimmt. „Austrian Standards“ (früher: Österreichisches Normungsinstitut) stellt seit 1920 als unabhängige und neutrale Plattform einen transparenten Normungsprozess in Österreich sicher (Austrian Standards, 2019). Nach dieser ÖNORM wurde der mineralische Stickstoff kolorimetrisch aus

feldfrischem, naturfeuchtem Boden als die Summe aus Ammoniumstickstoff (NH_4^+) und Nitratstickstoff (NO_3^-) bestimmt. Ammonium wurde mit einer Lösung aus Calciumchlorid-Dihydrat aus dem Boden extrahiert und kolorimetrisch bestimmt. Nitrat wird mit derselben Methode extrahiert und im weiteren Schritt durch aktiviertes Cadmium zu Nitrit reduziert. Beide Werte wurden in Milligramm pro Gramm Boden ausgegeben und danach als im Boden enthaltener Gesamtstickstoff in kg N ha^{-1} umgerechnet.

Der Wassergehalt im Boden wird durch die Umrechnung des naturfeuchten Bodens auf die Trockenbodenmasse berechnet. Hierbei wird der naturfeuchte Boden bei 105 Grad Celsius circa acht Stunden bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und der Wassergehalt errechnet. Diese beiden Vorgänge wurden bei jeder Bodenschicht einzeln durchgeführt und analysiert. Die Ergebnisse des Bodenstickstoffs wurden von der AGES sowohl in mg pro 100mg Boden als auch in kg N ha^{-1} übermittelt. Der gravimetrische Wassergehalt des Bodens wurde in Prozent angegeben.

4.5.2 Zwettl

Am Standort Zwettl wurde der Wassergehalt des Bodens mittels Wetterdaten in APSIM modelliert, da keine Bodenproben gezogen wurden. Für die Modellierung des Bodenwassers wurden die Wetterdaten der ZAMG-Wetterstation in Zwettl herangezogen. Zu Beginn wurden die N_{min} -Werte und die Werte für Bodenwasser aus Oberhausen herangezogen, da keine Bodenstickstoffdaten am Versuchsstandort vorhanden waren und Standard-Werte nicht zuverlässig wären, da die Kartierungsfläche dieser Bodenart mehr als 5000 ha beträgt (vgl. Bodenkarte, s.a.).

4.5.3 Bodenprofil am Standort Oberhausen

Die Lage des Bodens befindet sich im südlichsten Teil des Kartierungsgebietes, im Landschaftsraum der Donauniederung. Unser Versuchsstandort befindet sich auf kalkhaltigem, grauem Auboden aus jungem, feinem Schwemmmaterial. Die Wasserverhältnisse werden als mäßig trocken mit hoher Durchlässigkeit und geringer Speicherkraft beschrieben. Der hohe Anteil an lehmigen Schluff und lehmigen Sand erschwert die Bodenbearbeitung in sehr trockenen Perioden, obwohl dieser grundsätzlich als „sehr gut zu bearbeiten“ eingestuft wird. Im Gegensatz zum Standort Zwettl findet man in Oberhausen einen stark kalkhaltigen Boden vor, wodurch der pH-Wert deutlich über 7 sein dürfte und die Bodenreaktion als alkalisch bewertet wird. Die Humusverhältnisse werden als mittelhumos beschrieben. Interessant sind hierbei die stellenweise begrabenen Humushorizonte in einer Tiefe von 70 bis 100 cm, die aufgrund von zugeführtem Schwemmmaterial in die unteren Schichten gelangten. Die Erosionsgefahr kommt in Form von einer mäßigen Gefährdung einer Überschwemmung vor, daher werden Flächen mit hohem Überschwemmungsrisiko vornehmend als Grünland genutzt. Der Bodenwert wird als mittelwertiges Ackerland geschätzt.

Die Größe der Bodenform beträgt etwa 949 ha, das circa 3,7% der kartierten Fläche in der Umgebung ausmacht (Bodenkarte, s.a.).

Aufbau des Bodenprofils:

A:	0-50 cm	lehmiger Sand oder lehmiger Schluff
(AC),	50-120 cm	sandiger Schluff oder lehmiger Schluff,
C:		ab 70cm schluffiger Sand möglich

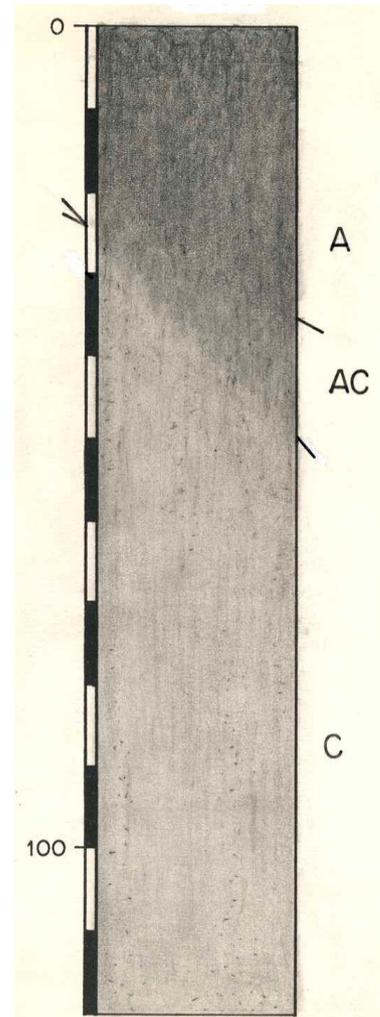


Abbildung 6: Bodenprofil am Versuchsstandort Oberhausen (Bodenkarte, s.a.).

4.5.3.1 Bodenprofil am Standort Zwettl

Auf der Versuchsfläche in Zwettl findet man laut Bodenkartierung eine kalkfreie Felsbraunerde vor, eine sehr verbreitete Form auf Ober- und Mittelhängen in dieser Granitzone. Die Eigenschaft des Bodens in Bezug auf Wasser wird als mäßig trocken mit einer geringen Speicherkraft und hoher Durchlässigkeit des Wassers beschrieben. Aufgrund der Kalkfreiheit des Bodens ist demnach die Bodenreaktion sauer bis stark sauer, was sich grundsätzlich in einem niedrigen pH-Wert niederschlägt. Der lehmige Sandanteil im A-Boden führt zu einer erhöhten Erosionsgefahr, bietet aber gleichzeitig die Möglichkeit einer guten Bodenbearbeitung mit dem Nachteil eines erhöhten Maschinenverschleißes aufgrund der Grobanteile. Der Humusgehalt wird als mittelhumos eingestuft und der natürliche Bodenwert ist als mittelwertiges Ackerland ausgewiesen.

Die Bodenform im Kartierungsbereich weist eine Größe von circa 5200 ha auf. Das entspricht in etwa 23% der kartierten Fläche rund um Zwettl (Bodenkarte, s.a.).

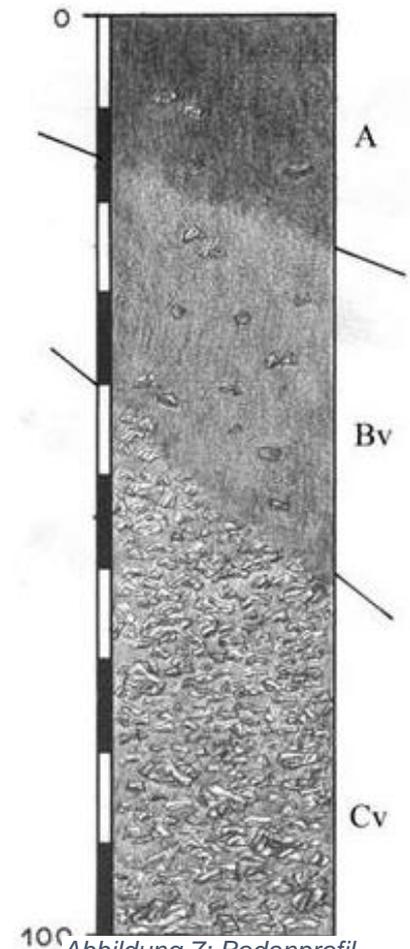


Abbildung 7: Bodenprofil am Versuchsstandort Zwettl (Bodenkarte, s.a.).

Aufbau des Bodenprofils:

A:	0-20 cm	Lehmiger Sand mit geringem Grobanteil (Grus)
Bv:	20-60 cm	Lehmige Sand oder Sand mit mäßigem bis hohem Grobanteil (Grus)
Cv:	60-100 cm	vorherrschend Grobanteil (Grus)

4.6 Pflanze - Probennahme und Datensammlung

An beiden Versuchsstandorten wurde jede Parzelle in einen destruktiven und einen nicht destruktiven Bereich getrennt. Im destruktiven Bereich wurden Pflanzen für die Biomassenbestimmung ausgewählt. Auf einer Länge von vier Metern pro Parzelle wurden alle Pflanzen in ihrer Höhe gemessen, die Stängelanzahl bestimmt, die Knollen vorsichtig händisch ausgegraben, von der Mutterpflanze gelöst und jene, die bereits eine Größe über 5 mm Durchmesser erreicht hatten, eingesammelt und danach mit den oberirdischen Pflanzenteilen für weitere Analysen über die Kühlkette in das Labor nach Tulln mitgenommen. Die Pflanzenhöhe wurde von der Dammoberkante bis zum Ende der obersten Blätter/Stängel gemessen.

Der nicht destruktive Bereich diente zur phänologischen Erueierung. Am Tag der ersten Probenziehung wurden fünf zufällig ausgewählte Pflanzen mit Bändern markiert, die in der kompletten Vegetationsperiode zur Ermittlung der Blattanzahl am Hauptstängel und zur Einteilung der Pflanzen in die jeweilige BBCH-Stufe dienten. Als Hauptstängel wurde jener Augenaustrieb bestimmt, der den stärksten Stängeldurchmesser und den längsten Stängel aufwies. Bei jeder Probenziehung wurden die gleichen Pflanzen zur Bestimmung herangezogen. Bei der letzten Probenziehung wurden im nicht destruktiven Bereich die Knollen für die letzte Ertragsschätzung und zur Analyse im Labor ausgegraben.

4.6.1 Phänologie im nicht destruktiven Bereich

Die phänologischen Erhebungen der Kartoffelpflanzen fanden in Oberhausen an vier Terminen und in Zwettl (aufgrund von zeitlichen Kapazitäten) an drei Terminen statt. Zeitgleich wurden zu diesen genannten Terminen die Biomasseproben für die weitere Aufarbeitung und Analyse im Labor gezogen. Die weitere Vorgehensweise auf den Parzellen erfolgte an beiden Versuchsstandorten gleich. Am jeweils ersten Termin wurden in jeder Parzelle fünf Pflanzen zufällig ausgewählt, die den Bestand am besten repräsentierten. Diese wurden mit Bändern gekennzeichnet und mit individuellen Nummern versehen, um an denselben Pflanzen an den darauffolgenden Terminen die phänologischen Veränderungen ermitteln zu können. Folgende Erhebungen wurden durchgeführt und schriftlich festgehalten:

- Einteilung jeder ausgewählten Pflanze nach der BBCH-Skala zum Erhebungszeitpunkt
- Ermittlung der Blattanzahl am Hauptstängel ausgewählter Pflanzen.

Die seit Jahren bewährte BBCH-Skala beschreibt die Pflanzen nach dem bekannten einheitlichen System, wobei jedes Wachstumsstadium mit einem Code versehen ist. Zur Beschreibung werden eindeutige, gut erkennbare, morphologische Merkmale herangezogen, die makroskopisch schnell erfasst werden können. Die erforderlichen Maßnahmen der Bestandsführung, wie Düngung, mechanische und chemische Unkrautbekämpfung und der Zeitpunkt von Pflanzenschutzmaßnahmen können so dem jeweiligen Entwicklungsstadium der Pflanze zugeordnet werden. Darüber hinaus lassen sich Wachstumsverzögerungen und schädigende Einflüsse rechtzeitig erkennen (Bleiholder und Meier, 2016).

4.6.2 Biomasseproben im destruktiven Bereich

Für die Biomasseerhebung wurden zwei nebeneinanderliegende Reihen auf einer Länge von vier Metern zufällig ausgewählt und die Pflanzen mitsamt den Knollen komplett entnommen. Hierbei wurden die äußersten Reihen aufgrund einer möglichen Datenverzerrung nicht berücksichtigt. Bei der Entnahme wurde darauf geachtet, dass die oberirdischen Teile mitsamt dem Wurzelkörper nicht beschädigt werden. Knollen, die bereits einen größeren Durchmesser als 5mm aufwiesen, wurden statistisch erfasst, mit den oberirdischen Pflanzenorganen in Plastiksäcken eingepackt und schnellstmöglich nach Tulln gebracht, wo die Proben bis zur Aufarbeitung in der Kühlkammer bei rund vier Grad Celsius gelagert wurden, um ein Austrocknen der Blätter zu verhindern. Folgende phänologische Aufzeichnungen wurden am Feld an jeder entnommenen Pflanze im destruktiven Bereich zuvor beobachtet und statistisch festgehalten:

- Anzahl der gesamten Stängel jeder Pflanze
- Bestimmung der Pflanzenhöhe
- Anzahl der Knollenbildungen, die größer als 5 mm im Querschnitt waren.

Tabelle 6: Auflistung der Phänologie und der Biomasseerhebung in Oberhausen.

Phänologie- und Biomasseerhebung in Oberhausen			
Datum	Phänologie nichtdestruktiver Bereich	Phänologie destruktiver Bereich	Pflanzenorgane destruktiver Bereich
22.05.2018	Blattanzahl am Hauptstängel, BBCH	Stängelanzahl	Stängel, grüne Blätter
18.06.2018	Blattanzahl am Hauptstängel, BBCH	Stängelanzahl Pflanzenhöhe Knollenanzahl	Stängel, grüne Blätter, tote Blätter, Knollen
25.07.2018	Blattanzahl am Hauptstängel, BBCH	Stängelanzahl Pflanzenhöhe Knollenanzahl	Stängel, grüne Blätter, tote Blätter, Knollen
19.09.2018	BBCH, Knollen	Knollenanzahl	Knollen

Tabelle 7: Auflistung der Phänologie und der Biomasseerhebung in Zwettl. (* zu diesem Zeitpunkt wurde bereits das Krautabtötungs-Mittel „Reglone“ angewendet.)

Phänologie- und Biomasseerhebung in Zwettl			
Datum	Phänologie nichtdestruktiver Bereich	Phänologie destruktiver Bereich	Pflanzenorgane destruktiver Bereich
09.06.2018	Blattanzahl am Hauptstängel, BBCH	Stängelanzahl Pflanzenhöhe	Stängel, grüne Blätter, tote Blätter, Knollen
09.07.2018	Blattanzahl am Hauptstängel, BBCH	Stängelanzahl Pflanzenhöhe Knollenanzahl	Stängel, grüne Blätter, tote Blätter, Knollen
13.08.2018*	BBCH Knollen	Stängelanzahl Pflanzenhöhe Knollenanzahl	Stängel, tote Blätter, Knollen

Die entnommenen Proben wurden danach im Labor auf die verschiedenen Organe der Kartoffelpflanze eingeteilt und analysiert.

4.6.3 Blatt- und Knollenanalyse

Das entnommene Probematerial aus den Parzellen der On-Farm-Versuche wurde für die weitere Blatt- und Knollenanalyse in das Labor zur Forschungsstation nach Tulln gebracht. Mit der Blatt- und Knollenanalyse sollen folgende Daten gewonnen werden:

- die Ermittlung des Stickstoffgehaltes über die C/N-Analyse,
- die jeweiligen Gewichtsanteile der einzelnen Pflanzenorgane,
- die Anzahl an Knollen pro Pflanze und
- die Gesamtbiomasse über und unter der Erdoberfläche.

Im ersten Schritt wurden die Kartoffelproben aus der Kühlkammer geholt. Danach wurde eine Handvoll der durchmischten Pflanzenteile aus der Gesamtbiomasse jeder einzelnen Probe entnommen und die jeweiligen Anteile an intakten grünen Blättern, an toten Blättern, der Anteil an Stängeln und die Knollen voneinander getrennt. Diese Menge sollte ein Sub-Sample aus der gesamten Biomasse bilden, die wiederum für weitere Analysen dienen und die gesamte Biomasse der Parzelle gut repräsentieren sollte. Dieses zufällig gezogene Sub-

Sample der einzelnen Probe wurde in zwei Bereiche unterteilt, nämlich in ein Sub-Sample der unterirdischen Pflanzenteile (Knollen) und in ein Sub-Sample der gesamten oberirdischen Pflanzenteile inklusive abgestorbenem Material. Danach erfolgte eine Unterteilung der Pflanzenorgane, die in folgende Kategorien gegliedert wurden:

Tabelle 8: Unterteilung der Pflanzenorgane im Labor.

Sub-GREEN LEAFS	Grüne Blätter des Pflanzenapparates, die danach zur Blattflächenindexberechnung dienen
Sub-DEAD LEAFS	Gelbe Blätter und deren bereits abgestorbene Anteile
Sub-STEMS	Pflanzenstängel
Sub-TUBERS	Knollen der Kartoffelpflanze

Ab dem zweiten Probestermin in Oberhausen wurden auch die Knollenanzahl und das Frischgewicht der Knollen ermittelt, da hier am ersten Termin im Mai noch keine relevante Knollenbildung zu sehen war. Für die Trocknung wurden die Frischknollen nach der Wiegung in kleine Scheiben geschnitten. Danach wurde das Sample „Sub-Tubers“ ebenso wie die restlichen Sub-Samples sorgfältig mit der jeweiligen Parzellennummer und dem jeweiligen Datum beschriftet und mit der restlichen Biomasse zusammen im Universal Trockenschrank (Memmert bzw. Heraeus, Deutschland) für 72 Stunden bei 60°C getrocknet. Nach dem Trockenvorgang wurden mit einer Waage (Denver Instruments, USA) alle Samples verwogen. Um eine Vergleichbarkeit der Werte schaffen zu können, wurden alle Anteile des Sub-Samples [g] auf die Gesamtbioasse der einzelnen Probe hochgerechnet. Danach wurde das Gewicht des Sub-Samples [g] auf die Fläche [m²] bezogen, die jener der entnommenen Pflanzenfläche pro Probe entsprach. Alle ermittelten Pflanzenorgane wurden dann auf die Grundeinheit [g m⁻²] hochgerechnet.

4.6.4 Berechnung des Blattflächenindex

Der Blattflächenindex wurde mittels LAI-Meter (LI 3100 Area Meter, LI-COR Inc., USA) über das Sub-Sample „Sub-GREEN LEAFS“ bestimmt. In diesem Vorgang wurden die grünen Blätter des Samples nacheinander über die Bandfolie des LAI-Meters gelegt, welcher die summierten Werte der Blattfläche in Quadratzentimeter ausgab. Dieser Wert wurde jener Flächengröße [m²] gegenübergestellt, die der Fläche der entnommenen Pflanzen entsprach. Danach wurde der Blattflächenindex (LAI) – gemessen in Quadratmeter – statistisch nach folgender Formel festgehalten:

$$LAI [m^2 m^{-2}] = \frac{\text{Blattfläche [m}^2\text{]}}{\text{Standraum [m}^2\text{]}} \quad (4.1)$$

Der Blattflächenindex (LAI) ist ein wichtiger Kennwert in der Forschung, da er das Verhältnis von Blattfläche zu Bodenoberfläche angibt und somit auch im weiteren Sinne die Photosyntheseleistung einer Pflanze beschreiben kann. Die Quantifizierung des Blattflächenindex ist ein wichtiger Aspekt in Modellen für klimatische, ökologische und biogeochemische Zyklen sowie zur Schätzung des Pflanzenvegetationsstatus und zur

Abschätzung der Lichtnutzungseffizienz von Pflanzen. Der LAI ist nicht nur der wichtigste morphologische Parameter für die Bestimmung des Pflanzenwachstums, sondern er ist auch für die moderne Landwirtschaft von großem Interesse, da es LandwirtInnen ein gutes Instrument bietet, um den Entwicklungsstatus und den Gesundheitszustand der Kulturpflanze zu ermitteln (vgl. Pasqualotto et al., 2019). Darauf aufbauend kann der LandwirtIn seine landwirtschaftliche Kulturführung, wie beispielsweise in der Ausbringung von Düngemittel oder im Wassermanagement, schnell und effektiv anpassen.

Die spezifische Blattfläche -auch als SLA bezeichnet – wurde nach der Hochrechnung des Blattflächenindex ebenso berechnet. Der SLA-Wert einer Pflanze gibt das Verhältnis der Blattfläche zur Trockenmasse an. Somit kann durch diesen Wert auch die durchschnittliche Blattdicke beschrieben werden und wird berechnet nach:

$$SLA [cm^2 g^{-1}] = \frac{Blattfläche [cm^2]}{Blattmasse [g]} \quad (4.2)$$

4.6.5 C/N-Analyse zur Ermittlung des N-Gehaltes in den Pflanzenteilen

Nach der Trocknung wurden alle Proben mit zwei speziellen Mühlen (Reitsch, IKA-Werke, Deutschland) fein vermahlen. Hierbei war darauf zu achten, dass Pflanzenteile mit geringeren Stickstoffgehalten - wie beispielsweise der Stängel- zu Beginn vermahlen werden und Pflanzenteile mit hohen Stickstoffgehalten zuletzt. Da es trotz sorgfältiger Reinigung der Gefäße nach jeder Probenvermahlung zu kleinen Rückständen kommen kann, hätte eine umgekehrte Reihenfolge zu einer Verzerrung der Daten führen können, da sich höhere Stickstoffgehalte in den erhobenen Daten niederschlagen könnten als die Pflanzenteile mit niedrigerem Stickstoffgehalt tatsächlich beinhalten. Danach wurden die Proben wieder in den Universal Trockenschrank gegeben, damit die frisch vermahlene Proben keine Luftfeuchtigkeit aufnehmen konnten. Im nächsten Schritt wurden die Proben zwischen 40 und 100 mg in einer Zinnschale eingewogen, mit einem Stampfer pilliert und das Gewicht nach der Einwiegung (Mettler Toledo XS 105 Dual Range) notiert.

Die Stickstoffgehalte jeder Probe wurden dann über einen Gas-Chromatografen (Vario MACRO Cube, Elementar, Deutschland) bestimmt. Der Feststoff wird über eine Probenaufgabeneinheit in eine Trennsäule überführt. Dort werden die Substanzen mit Hilfe eines Trägergases (Helium, Stickstoff oder Wasserstoff) durch die thermostatisierte Trennsäule transportiert. Die getrennten Substanzen passieren nach dem Verlassen der Säule in der Gasphase nacheinander einen Detektor, der jeden einzelnen Bestandteil über einen Computer anzeigt (Schwedt und Vogt, 2010). Die gaschromatografische Analyse errechnete die Stickstoffkonzentration (N_{conc}) in Gramm [$g g^{-1}$] der pillierten, eingewogenen Proben. Um die tatsächlichen Stickstoffgehalte der Pflanzenorgane erhalten zu können, mussten die Stickstoffkonzentration mit der Biomasse pro Fläche multipliziert werden. Anhand der Formel 4.3 wird ein Umrechnungsbeispiel anhand des Blattstängels [*stem*] gezeigt:

$$stem [\%] = \frac{\sum (sub\ stem[g], sub\ green\ leaf[g], sub\ sen\ leaf[g])}{sub\ stem[g]} * 100 \quad (4.3)$$

$$stem [g m^{-2}] = \frac{total\ biomass [g m^{-2}] * stem [\%]}{100} \quad (4.4)$$

$$N_content_stem [g m^{-2}] = \frac{stem [g m^{-2}] * N_conc_stem [g g^{-1}]}{100} \quad (4.5)$$

Alle berechneten Ergebnisse [$g m^{-2}$] der Erhebungen sind Mittelwerte der einzelnen Parzellen. Sie setzen sich aus den Replikationen (drei Wiederholungen) mit der gleichen Behandlung (Treatment) des gleichen Probenentnahmezeitpunktes zusammen.

4.6.6 Statistische Analyse und Datenverarbeitung

Die Datenzusammenfassung und die weiteren Berechnungen erfolgten mit dem Programm Excel XP von Microsoft. Die statistische Analyse wurde mit dem Statistikprogramm R durchgeführt. Hier wurde die Varianzanalyse in R-Studio (2018) über die Funktion „ANOVA“ (*Analysis Of Variance*) verwendet. Es wurde für die Daten in Oberhausen eine zweifaktorielle Varianzanalyse durchgeführt und für die Daten in Zwettl eine einfaktorielle Varianzanalyse. ANOVA gehört in die Klasse der linearen Statistikmodelle, die in einer linearen Algebra-Form geschrieben sind, das erweiterbar ist und spezielle Tests mit multiplen Variablen und deren Interaktionen erlaubt. Der Vorteil der ANOVA ist, dass alle, aus den Experimenten eingebundenen, experimentelle Faktoren den Phänotyp beeinflussen können und dies eine bessere Schätzung der randomisierten Streuung erlaubt. Somit ergibt sich ein genauere F-Wert (Brady et al., 2015). Für die Daten aus Zwettl wurde ein t-Test in R verwendet. Ein t-Test beurteilt, ob die Mittelwerte zweier Gruppen sich unterscheiden (Brady et al., 2015).

Für die Modellierung wurde das Pflanzenwachstumsmodell APSIM 7.10. herangezogen.

5 Ergebnisse

Dieses Kapitel unterteilt sich in vier Abschnitte: in Abschnitt 5.1 wird die Auswertung der Wetterbedingungen gezeigt, in Abschnitt 5.2 werden die Ergebnisse der Feldversuche präsentiert, in Abschnitt 5.3 wird gezeigt, wie das Pflanzenwachstumsmodell initialisiert und parametrisiert wurde und zuletzt werden in Abschnitt 5.4. die Simulationsergebnisse präsentiert.

5.1 Wetterbedingungen

Das Wetter als wesentlicher Umweltfaktor hat einen großen Einfluss auf die Bildung der Trockenmasse und auf den Gehalt an Inhaltsstoffen in den Knollen. Wettereinflüsse können also über Niederschläge, Temperaturen und Sonneneinstrahlung die Entwicklung der Pflanzen entscheidend verändern.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Witterungsverläufe der beiden Versuchsstandorte Zwettl und Oberhausen. Die Datenerhebungen während des Versuchs sowie die 30-jährigen Mittelwerte des Temperaturverlaufes und der Niederschlagsverteilung stammen aus den Messstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) „Stift Zwettl“ und für den Standort Oberhausen aus der Messstation „Großenzersdorf“.

Die täglich gewonnenen Daten der Messstationen wurden gesammelt und mit Klimamittelwerten der genannten Standorte verglichen. Klimamittelwerte, auch Klimanormalwerte genannt, beschreiben den Klimazustand eines Ortes während eines ausreichend langen Zeitraumes von 30 Jahren. Es handelt sich um gemessene Stationsdaten, die nach der *Outlier-Korrektur* und einer Homogenisierung auf Monatsbasis zu 30-jährigen Mittel- und Extremwerten zusammengefasst wurden. Sie beziehen sich auf den aktuellen Zeitraum von 1981 bis 2010 (ZAMG, 2019).

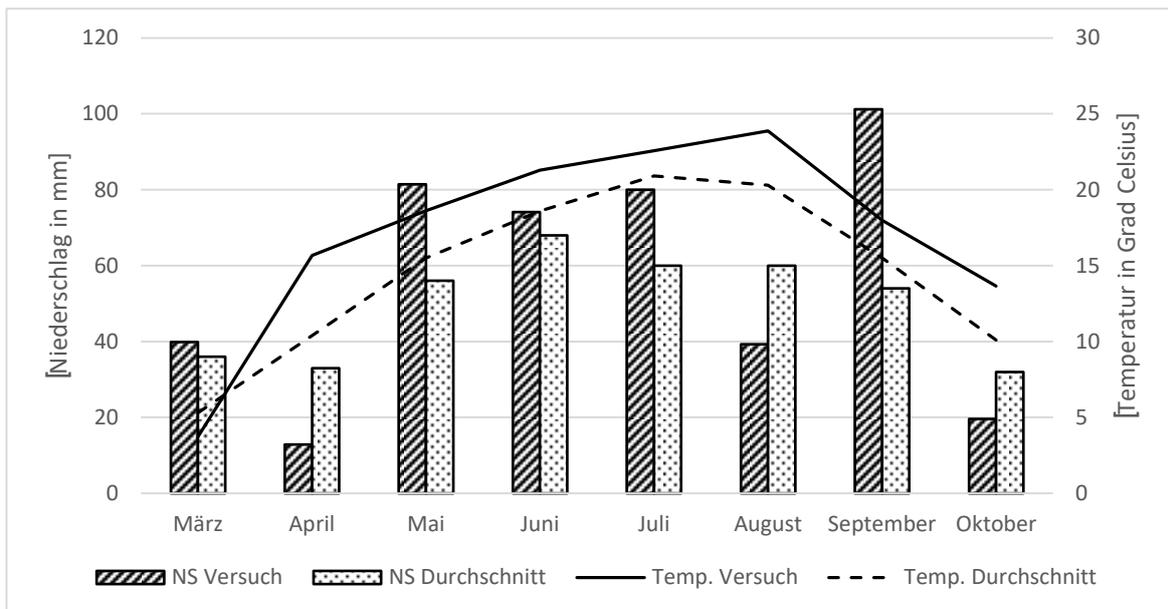


Abbildung 8: Mittlere monatliche Temperatur (°C) und Niederschlagsverteilung (Mittelwerte der Monate in mm) von März bis Oktober 2018 im Vergleich zu 30-jährigen Mittelwerten des Standortes Oberhausen (ZAMG, 2019).

In Abbildung 8 sind die Mittelwerte des Temperaturverlaufes und die Niederschlagsverteilung am Standort Oberhausen während der Vegetationsperiode dargestellt. Der Jahresniederschlag lag bei 602mm. Im Zeitraum März bis Oktober beliefen sich die kumulierten Niederschläge auf 449mm, davon regnete es zwischen der Saat und der Ernte 375mm. Bis auf die Monate April und August lagen die monatlichen Regenmengen während der Kulturentwicklung über den 30-jährigen Monatsdurchschnitten. Der Monat September hob die Niederschlagssumme des Versuchszeitraumes erheblich an, da es hier die doppelte Menge an Niederschlag im Vergleich zum 30-jährigen Mittel gab. Hier spielte die Niederschlagsmenge kaum mehr eine Rolle für das Pflanzenwachstum, da bereits mit der Ernte begonnen wurde.

Die Temperaturen lagen während der Vegetationsperiode kontinuierlich über dem langjährigen Schnitt. Die maximale Temperatur im Zeitraum von Mai bis Oktober lag bei 34,8 Grad Celsius, die minimale Temperatur wurde mit 1,4 Grad Celsius gemessen. Während des Versuchszeitraums lag die mittlere Temperatur bei 21,2 Grad Celsius. Im Vergleich zum langjährigen Schnitt lag die mittlere Temperatur für denselben Zeitraum bei 10,3 Grad Celsius.

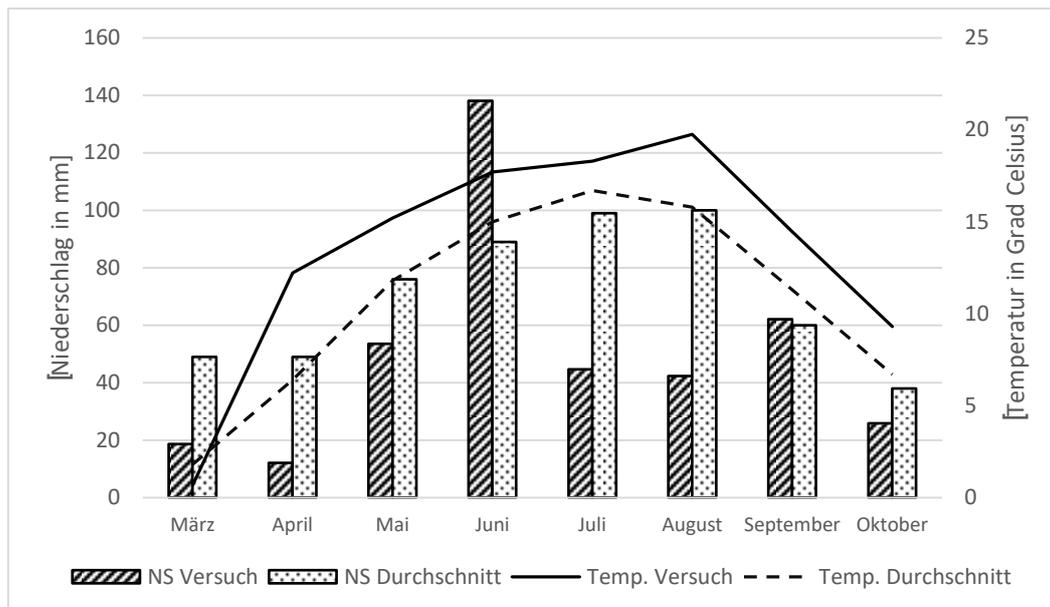


Abbildung 9: Temperaturverlauf (Mittelwerte der Monate in Grad Celsius) und Niederschlagsverteilung (Mittelwerte der Monate in mm) von März bis Oktober 2018 im Vergleich zu 30-jährigen Mittelwerten des Standortes Zwettl (ZAMG, 2019).

In Abbildung 9 sind die Mittelwerte des Temperaturverlaufes und die Niederschlagsverteilung am Standort Zwettl während der Vegetationsperiode dargestellt. Im Zeitraum zwischen März und Oktober blieb die Niederschlagsmenge mit 397mm deutlich unter der 30-jährigen Niederschlagsmenge von 560mm mit einer Differenz von 163mm pro Quadratmeter. Die Ausnahme bildete der Juni, wo mehr als die 1,3-fache der durchschnittlichen Niederschlagsmenge fiel. Während der Zeit von 153 Tagen zwischen dem Legen der Kartoffel und der Ernte regnete es 336mm, davon allein 46mm am 3.Juni. Im Zeitraum März bis Oktober beliefen sich die kumulierten Niederschläge auf 397mm, davon regnete es zwischen der Saat und der Ernte 336 mm. Bis auf die Monate Juni und September lagen die monatlichen Regenmengen während der Kulturentwicklung unter den 30-jährigen Monatsdurchschnitten. Der Monat September hob die Niederschlagssumme des Versuchszeitraumes erheblich an, da es hier die doppelte Menge an Niederschlag im Vergleich zum 30-jährigen Mittel gab. Hier spielte die Niederschlagsmenge kaum mehr eine Rolle für das Pflanzenwachstum, da bereits mit der Ernte begonnen wurde.

Die Durchschnittstemperaturen lagen durchgehend während der Versuchszeit deutlich über dem 30-jährigen Mittel mit 2,7 Grad Celsius. Die maximale Temperatur im Zeitraum von Mai bis Oktober lag bei 33,8 Grad Celsius, die minimale Temperatur wurde mit 0,3 Grad Celsius gemessen. Während es Versuchszeitraums lag die mittlere Temperatur bei 17,3 Grad Celsius. Im Vergleich zum langjährigen Schnitt lag die mittlere Temperatur für denselben Zeitraum bei 6,8 Grad Celsius.

5.2 Ergebnisse der *On-Farm* - Versuche

Um für eine bessere Übersicht der Ergebnisse zu sorgen, werden ab diesem Unterkapitel die Versuchsergebnisse auf die beiden Standorte „Oberhausen“ und „Zwettl“ aufgeteilt.

Zuvor sei erwähnt, dass bei der zweiten Probenentnahme in Oberhausen eine Infektion des Kartoffelbestandes in beiden Sorten mit der Krankheit „*Candidatus Phytoplasma solani*“ erkannt wurde, das eine Einschränkung des Pflanzenwachstums und einen massiven Ertragsausfall zur Folge hatte. Es wurde während der Probenentnahmen ein vermindertes Pflanzenwachstum (kein Reihenschluss in beiden Sorten, verfrühte Abreife) und gummiartige, teils verfaulte Knollen bei den letzten beiden Probenentnahmen festgestellt. Daher konnten die erhobenen Daten in Oberhausen für die Parametrisierung in APSIM nur sehr eingeschränkt bis gar nicht verwendet werden.

5.2.1 Boden

Für die Einbeziehung der Bodenparameter in die Modellierung wurden, wie bereits im Kapitel „Boden – Probenahme und Datensammlung“ erwähnt, Bodenproben zu Beginn (15.04) und am Ende (19.09.) der Vegetationsperiode gezogen.

In Tabelle 9 sind alle zusammengetragenen Werte aus der Bodenprobenziehung zusammengefasst, bestehend aus den Inputparametern des gesamten, organischen Kohlenstoffs (TOC), des mineralischen Bodenstickstoffs (N_{min}) und des Bodenwassers (grav_w_c). Die Bodendaten, die zu Saisonbeginn gesammelt wurden (siehe Spalte „Beginn“), dienen dem Modell als Ausgangswerte, damit das Modell Kenntnis erlangt, wie hoch die Werte zu Simulationsbeginn sind. Wie bereits in Abschnitt 4.5.1 erwähnt, sind die Bodenwerte der Probenziehung zu Beginn der Vegetation einheitlich für alle Parzellen übernommen, da beide Sorten und Bewässerungsvarianten gleichermaßen gedüngt wurden und von einer Homogenität des Bodens im Versuchsbereich ausgegangen wurde (siehe Tab. Kulturführungsmaßnahmen).

Die Auswertung des mineralischen Bodenstickstoffs wird in der Analyse der AGES in Nitrat und Ammonium aufgeteilt. Für die Simulation in APSIM werden ebenfalls beide Werte getrennt benötigt. Aufgrund der Übersichtlichkeit und des sehr geringen Ammoniumanteils (von 0,03 bis 0,58 mg/100g) wurde hier nur die Summe beider Stickstoffarten aufgelistet. Zu Vegetationsbeginn wurden über vier Horizonte verteilt 94kg an Stickstoffvorrat im Boden gemessen.

Für die Simulation des organisch gebundenen Kohlenstoffs benötigt APSIM die Bodenparameter des gesamten, organischen Kohlenstoffs (TOC), der über die Bodenanalyse der AGES mituntersucht wurde. Die Wasserversorgung zu Beginn der Vegetation wurde für beide Bewässerungsstufen als gleich betrachtet.

Alle anderen Bodenwerte, die von APSIM vorgegeben werden, wurden nicht verändert.

Tabelle 9: Auflistung der Bodeninputparameter der beiden Sorten Jelly (KJ) und Innovator (KI) am Standort Oberhausen zu Vegetationsbeginn (25.04.) und Vegetationsende (19.09.): Gesamter, organischer Kohlenstoff (TOC) [%], Bodenstickstoff (N_{min}) [kg ha⁻¹].

Bodenkohlenstoff-, Bodenstickstoff- & Bodenwasseranalyse zu Vegetationsende					
Bodenhorizont	TOC [%]				
	Beginn	KJ_not_irrigated	KJ_irrigated	KI_not_irrigated	KI_irrigated
0-30	1,21	1,27	1,44	1,32	1,31
30-60	0,78	0,77	0,72	1,02	0,98
60-90	0,33	0,27	0,27	0,6	0,62
90-120	0,22	0,17	0,12	0,39	0,59
N_{min} [kg ha⁻¹]					
	Beginn	KJ_not_irrigated	KJ_irrigated	KI_not_irrigated	KI_irrigated
0-30	17*	88	78	230	68
30-60	43	82	57	83	46
60-90	22	12	17	18	11
90-120	12	8	4	13	6
grav_w_c [%]					
	Beginn	KJ_not_irrigated	KJ_irrigated	KI_not_irrigated	KI_irrigated
0-30	8,28	11,56	14,42	13,55	12,44
30-60	12,28	10,59	11,28	15,37	13,74
60-90	10,68	6,44	7,88	13,28	13,71
90-120	8,85	6,31	5,95	10,03	14,35

5.2.2 Phänologie

In Tabelle 10 wurde die phänologische Entwicklung beider Düngungsvarianten zu den jeweiligen Probeentnahmen betrachtet. Dabei konnten zwischen den Düngungsstufen keine Unterschiede festgestellt werden. Am zweiten Probenentnahmetermin konnte zwischen den Düngungsstufen nur ein geringfügiger, jedoch kein relevanter Unterschied in der Phänologie festgestellt werden.

Tabelle 10: Vergleich der Phänologie zum Zeitpunkt der Probenentnahmen in Tagen nach dem Legen (DAP) zwischen der ungedüngten (N0) und gedüngten (N) Variante.

Datum	DAP	BBCH_Ditta_N0_observed	BBCH_Ditta_N106_observed
09.06.	53	51 (Beginn Knospenbildung)	51
09.07.	83	69 (Blütenende)	70 (erste Beeren sichtbar)
13.08.	118	97 (Blätter/Stängel abgestorben)	97

5.2.3 Blattanzahl am Hauptstängel

Aufgrund der Übersichtlichkeit werden in den nachfolgenden Punkten alle Werte als Mittelwerte dargestellt, die zusätzlich mit dem Standardfehler in Balkenform gezeigt werden.

Wie in Abbildung 10 ersichtlich, stellte sich in Oberhausen heraus, dass die Unterschiede in der Behandlung bei allen Probezuhängen signifikant waren. Somit hatte die Bewässerung einen Einfluss auf die Anzahl an ausgebildeten Blättern bei beiden Sorten. Am Standort Zwettl wurde kein signifikanter Unterschied festgesellt.

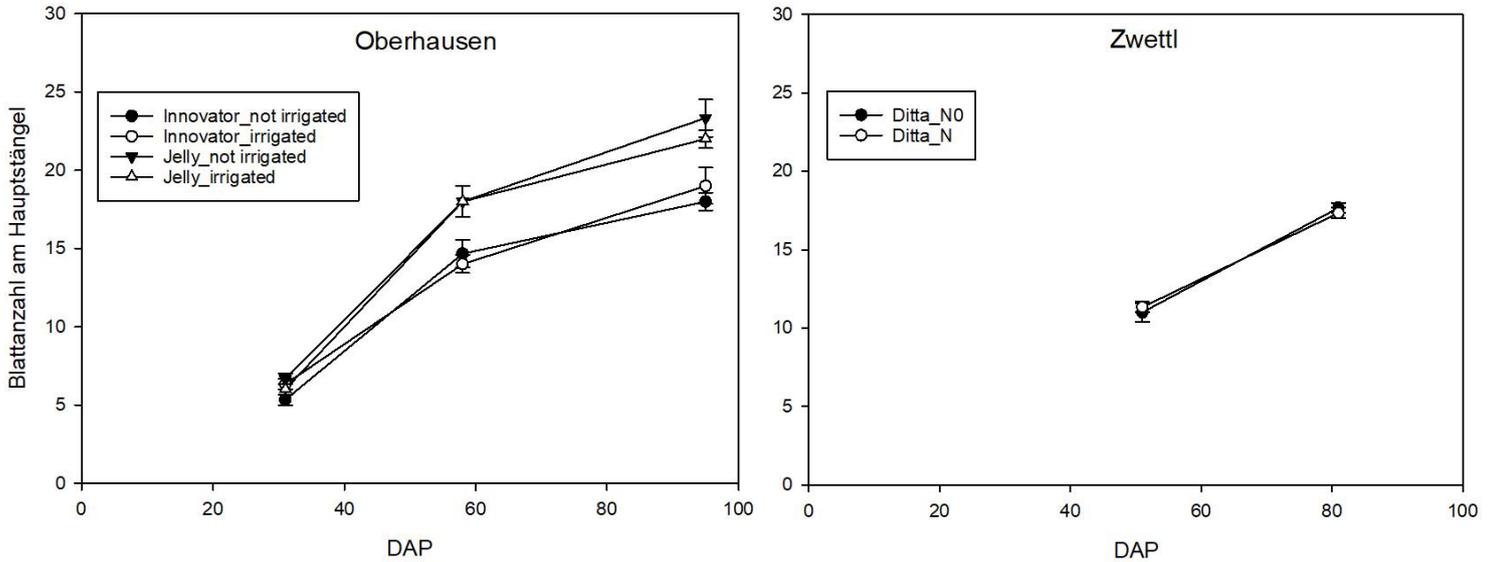


Abbildung 10: Blattanzahl am Hauptstängel im Zeitverlauf an den Standorten Oberhausen (links) und Zwettl (rechts).

5.2.4 Blattflächenindex

Beim Blattflächenindex in Oberhausen konnten bei der vorletzten Probenziehung (25.07.) laut Abbildung 11 signifikante Unterschiede, sowohl zwischen den beiden Sorten, als auch zwischen den nicht bewässerten und den bewässerten Parzellen festgestellt werden. Um den Zeitpunkt der ersten Blattaufhellungen (BBCH 91) lag der minimale Blattflächenindex bei 1,11 (*Innovator*, unbewässert) und der maximale Blattflächenindex bei 3,45 (*Jelly*, bewässert). Der optimale Blattflächenindex erreicht einen Wert von 3. Alle Werte darüber sind ertragsphysiologisch nicht sinnvoll, weil die Photosynthese im Bestand nicht mehr nennenswert ansteigt (der LAI steigt linear mit dem Bodenbedeckungsgrad des Laubes an) (vgl. Haverkort et al. 1991).

In Zwettl konnten ab der zweiten Probenentnahme (9.07.) der Blattflächenindex nicht mehr bestimmt werden, da sich der Landwirt zu diesem Zeitraum bereits für eine chemische Krautabtötung entschieden hat und somit keine grünen Blätter mehr bestimmt werden konnten.

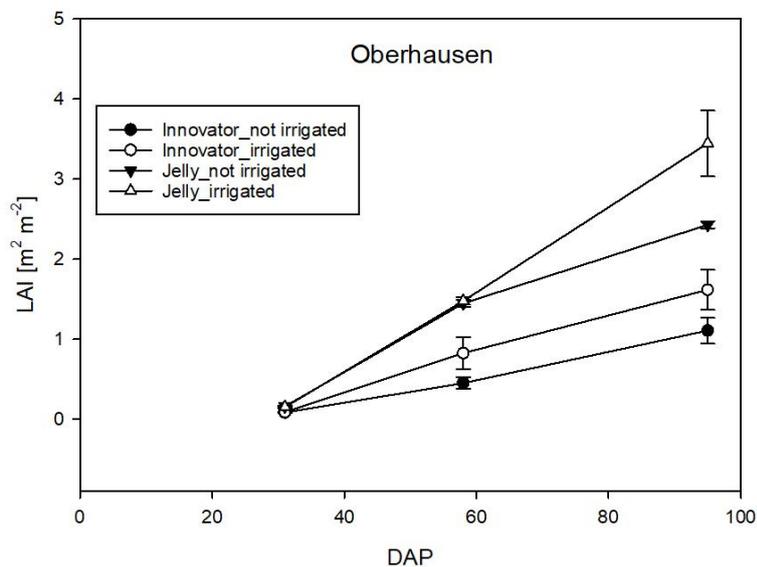


Abbildung 11: Unterschiede des Blattflächenindex (LAI) in den beiden Sorten Jelly und Innovator und in ihren Behandlungen (bewässert, unbewässert) am Standort Oberhausen.

5.2.5 Oberirdische Biomasse

Am Standort Oberhausen konnte bei der getrockneten oberirdischen Biomasse, wie in Abbildung 12 zu sehen ist, zum Zeitpunkt der ersten Blattaufhellungen (BBCH91) signifikante Unterschiede zwischen den unbewässerten und den bewässerten Parzellen gemessen werden sowie auch zwischen den beiden Sorten. Während der Versuchsdurchführungen wies die Sorte *Jelly* im Vergleich zur Sorte *Innovator* generell eine stärkere Krautmasse auf, was sich in den Versuchen widerspiegelt, jedoch kam es in beiden Sorten nicht zum Reihenschluss. Den höchsten oberirdischen Biomasseertrag konnte die bewässerte Variante der Sorte *Jelly* mit $438,18 \text{ g m}^{-2}$ erreichen. Die unbewässerten Parzellen der Sorte *Innovator* lagen im Durchschnitt bei nur $142,63 \text{ g m}^{-2}$.

Am Standort Zwettl konnten an allen Probestermiinen keine signifikanten Unterschiede zwischen der gedüngten und der ungedüngten Variante in der oberirdischen Biomasse festgestellt werden.

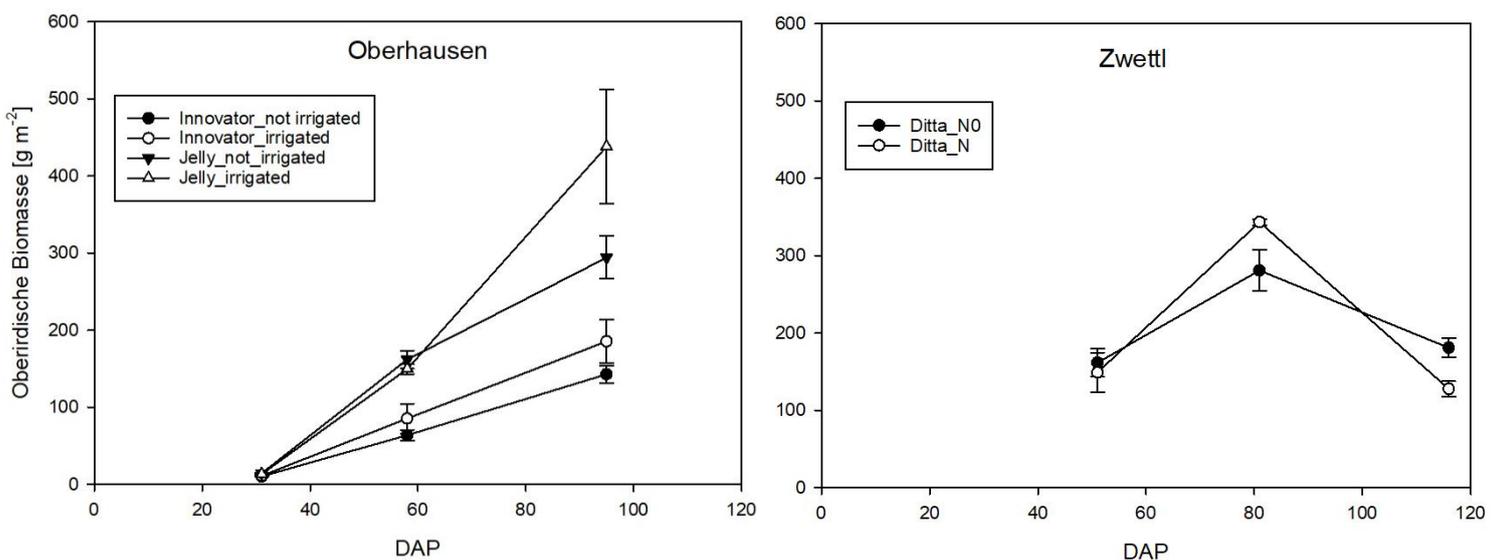


Abbildung 12: Unterschiede der getrockneten, oberirdischen Biomasse in den beiden Sorten *Jelly* und *Innovator* und in ihren Behandlungen (bewässert, unbewässert) am Standort Oberhausen und am Standort Zwettl.

5.2.6 Knollenerträge

Wie in Abbildung 13 ersichtlich, wiesen die Knollenfrischmassen am Standort Oberhausen signifikante Unterschiede zwischen den beiden verschiedenen Behandlungsstufen auf. Die Erträge waren aufgrund der im Bestand aufgetretenen „*Candidatus Phytoplasma solani*“ sehr stark reduziert und lagen im Durchschnitt beider Sorten und Behandlungen bei 754.7 g m^{-2} . Der höchste Ertragswert lag bei der bewässerten Variante der Sorte Jelly mit $970,80 \text{ g m}^{-2}$, der niedrigste in der unbewässerten Variante derselben Sorte mit $614,91 \text{ g m}^{-2}$.

In Zwettl waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den gedüngten und ungedüngten Stickstoffvarianten zu erkennen. Die Knollenerträge lagen bei 4955.6 g m^{-2} Knollenfrischmasse in der ungedüngten Variante und $5066,67 \text{ g m}^{-2}$ in der gedüngten Variante.

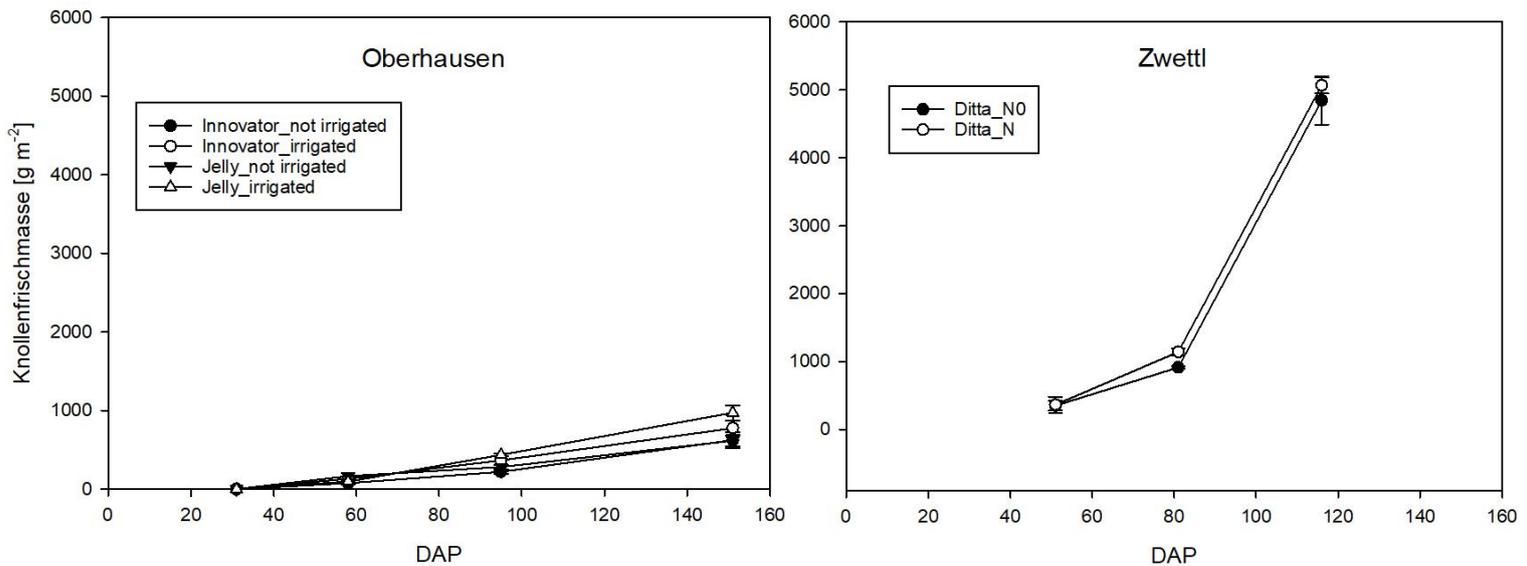


Abbildung 13: Vergleich des Verlaufes der Knollenfrischmasse an den Standorten Oberhausen (links) und Zwettl (rechts) in g m^{-2} .

5.2.7 Gesamtstickstoffaufnahme der Kartoffelpflanze

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse der gesamten Stickstoffaufnahme der Kartoffelknollen und des Blattapparates der Kartoffelpflanze.

Am Standort Oberhausen konnten an allen vier Probeterminen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Sorten festgestellt werden, wobei die Signifikanz (zu Beginn sehr hoch) mit der fortschreitenden Entwicklung der Pflanzen abnahm. Zwischen den Bewässerungsstufen konnte lediglich am ersten Probetermin Mitte Mai eine Signifikanz festgestellt werden. Die höchsten, festgestellten Stickstoffaufnahmen wurden am 18.06. mit $4,18 \text{ g N/m}^2$ bei beiden Bewässerungsvarianten der Sorte Jelly festgestellt, der niedrigste Wert lag zu diesem Zeitpunkt bei der bewässerten Variante der Sorte Innovator mit $3,48 \text{ g N}$. Die erhobenen Stickstoffwerte am letzten Termin beziehen sich nur auf den Stickstoffgehalt in den Knollen, da zu diesem Zeitpunkt das Kartoffelkraut bereits komplett abgestorben war. Die geringen Aufnahmewerte sind auf die im Bestand aufgetretenen „*Candidatus Phytoplasma solani*“ zurückzuführen.

In Zwettl konnten an keinem Termin signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die höchsten Stickstoffwerte konnten in der gedüngten Variante am zweiten Termin am 09.07. mit $12,86 \text{ g N/m}^2$ festgestellt werden, wobei die Differenz zwischen den Parzellen um rund $2,27 \text{ g N}$ schwankten. Die ungedüngte Variante lag zu diesem Zeitpunkt zwischen $7,57 \text{ g N}$ bis hin zu $11,60 \text{ g N}$ und erreichte erst kurz vor der Ernte ihren Höchstwert von $11,70 \text{ g N}$.

Die Stickstoffwerte der gedüngten Variante nahmen zwischen zweitem und drittem Termin um durchschnittlich $1,59 \text{ g N/m}^2$ ab, wobei die ungedüngte Variante um durchschnittlich $1,51 \text{ g N/m}^2$ zunahm.

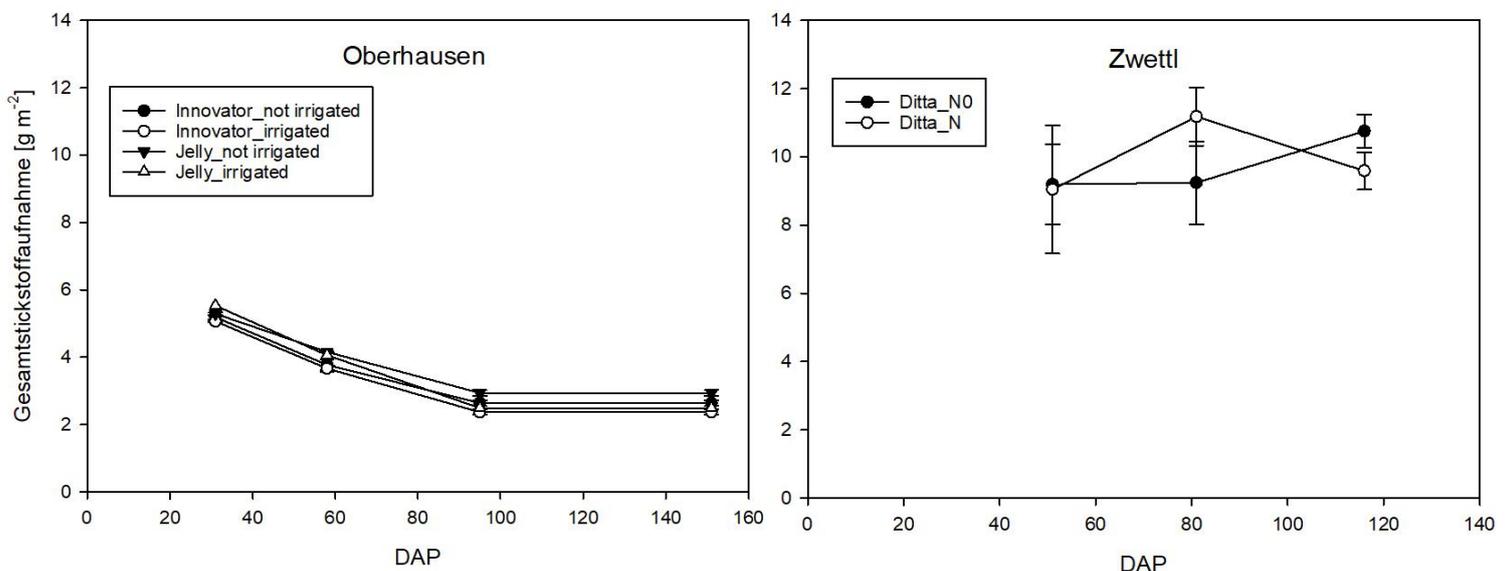


Abbildung 14: Vergleich des Verlaufes der Gesamtstickstoffaufnahme an den Standorten Oberhausen (links) und Zwettl (rechts) in g m^{-2} .

5.2.8 Stickstoffgehalte der Knollen

In diesem Abschnitt werden die Stickstoffgehalte der Knollen zum Erntezeitpunkt betrachtet. Es konnten bei der letzten Probeziehung an beiden Standorten keine signifikanten Unterschiede in der Behandlung und zwischen den Sorten festgestellt werden.

In Abbildung 15: In Oberhausen war am vorletzten Termin (25.7.) ein signifikanter Unterschied zwischen den unbewässerten und den bewässerten Parzellen in beiden Sorten zu erkennen. Ein großer, jedoch nicht signifikanter Unterschied zeigte sich in der Sorte *Jelly*, die sowohl den niedrigsten Stickstoffgehalt in der unbewässerten Variante mit $1,62 \text{ g m}^{-2}$ als auch den höchsten Wert in der bewässerten Variante mit $2,28 \text{ g m}^{-2}$ zeigte.

Ebenso wurde dieser signifikante Unterschied in der vorletzten Probeziehung in Zwettl (09.07.) festgestellt. Die N-Gehalte beliefen sich auf $8,18 \text{ g m}^{-2}$ in der ungedüngten und auf $7,90 \text{ g m}^{-2}$ in der gedüngten Variante.

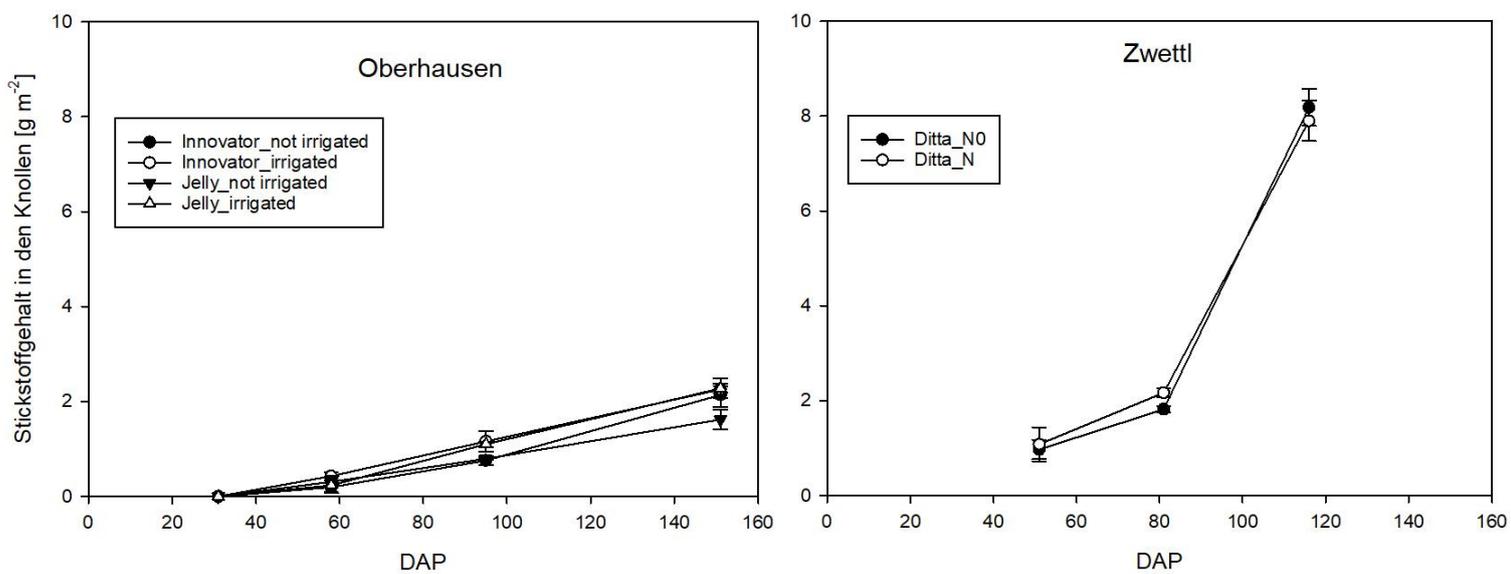


Abbildung 15: Stickstoffgehalte der Knollen zum Erntezeitpunkt in Oberhausen (19.09.) und in Zwettl (13.08.).

5.3 Initialisierung und Parametrisierung der Pflanzenwachstumsmodelle

In diesem Kapitel werden jene Parameter aufgelistet, die die Standardwerte im *APSIM Potato Model* durch die Anpassung über die erhobenen Werte in den *On-Farm*-Versuchen ersetzt haben. Es erfolgten Anpassungen in den Modellbereichen Boden, Management und bei den genetischen Parametern.

5.3.1 Boden

Im *APSIM Potato Model* wurden zu Beginn jene Bodenprobenwerte eingespielt, die vor dem Kartoffelanbau am 25.04. in Oberhausen gezogen und danach von der *AGES* ausgewertet wurden und nun als Ausgangsparameter für die Simulation dienen. In Tabelle 11 sind die ermittelten Bodenwerte und die Unterteilung in Bodenhorizonte ersichtlich.

Tabelle 11: Ermittelte Bodenwerte und Unterteilung in Bodenhorizonte während der Bodenprobenahme (* nachgereichter Wert aus privater Bodenuntersuchung des Landwirts).

Bodenwasser- & Bodenstickstoffanalyse			
Bodenhorizont	TOC [%]	N_{min} [kg ha⁻¹]	grav_w_c [%]
0-30	1,21	17*	8,28
30-60	0,78	43	12,28
60-90	0,33	22	10,68
90-120	0,22	12	8,85

In diesem Kapitel wird hier nochmals die Tabelle 5 herangezogen, die bereits im vorigen Kapitel 4.5 „Boden – Probennahme und Datensammlung“ präsentiert wurde. Wie auch in Kapitel 5.2 „Boden“ detailliert erläutert wurde, handelt es sich bei den ermittelten Werten um den gesamten, sich im Boden befindlichen, organischen Kohlenstoff (TOC), den Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn (N_{min}) sowie der Gehalt an Bodenwasser. Wie auch im Kapitel „Boden“ erwähnt, erfordert das Modell eine Aufteilung des Stickstoffs in Ammonium und Nitrat, die aber aufgrund der Übersichtlichkeit als Gesamtstickstoff angegeben wurde. Die TOC-Werte, die *APSIM* ebenso benötigt, wurden im Zuge der N_{min}-Analyse mituntersucht. Alle anderen Bodeninputparameter sind von den voreingestellten Werten nicht verändert worden.

5.3.2 Management

Informationen über die Kulturführung können aus dem vorigen Kapitel 4.4 „Versuchsdurchführung“ entnommen werden. Management-Maßnahmen, wie etwa die Düngung, der Pflanzenschutz oder Kartoffeldammbearbeitungen fanden in der Parametrisierung keine Berücksichtigung, da das *APSIM-Potato Model* diese Vorgänge nicht simulieren kann.

5.3.3 Genetische Parameter

Im APSIM-Potato findet man bereits einige Kartoffelsorten, deren Eigenschaften über die Phänologie, Morphologie und Physiologie bereits sortenspezifisch vorgegeben sind und auch als genetische Parameter bezeichnet werden.

5.3.4 Phänologie

In diesem Abschnitt wird die Simulation der phänologischen Entwicklung der Kartoffelpflanzen mit den Felddatenerhebungen über die BBCH-Bestimmung verglichen. Wie in Tabelle 10 ersichtlich, hatte die Stickstoffdüngung keinen Einfluss auf die Phänologie der Kartoffelpflanzen. Die Simulationsergebnisse der gedüngten und ungedüngten Variante sind ebenso ident.

In Tabelle 12 ist die Abweichung der Simulation von APSIM von den gemessenen Ergebnissen der Knollengewichte nach Tagen nach dem Legen (DAP) dargestellt. Es wurden, wie auch bei den Feldergebnissen, nur geringe Unterschiede in der Simulation zwischen den beiden Düngungsvarianten festgestellt. Im Durchschnitt aller Probestermine betrug die zeitliche Differenz der gemessenen und der von APSIM simulierten Knollengewichte rund 10 Tage. APSIM simulierte die Gewichtszunahme grundsätzlich früher, als es in den Versuchsergebnissen der Fall war.

Tabelle 12: Simulierte und gemessene Ergebnisse der Knollengewichte aller Düngungsvarianten in Tagen nach dem Legen (DAP).

BBCH	Knollengewicht in g/m²	DAP gemessen	DAP APSIM
51	364	53	50
69 bzw. 70	1142	82	64
97	4844	117	109

5.3.5 Oberirdische Biomasse

5.3.5.1 Zwettl

In Abbildung 18 ist der Simulationsverlauf der oberirdischen Biomasse veranschaulicht. APSIM unterschätzte größtenteils die Ergebnisse des *On-Farm*-Versuchs. Die Simulationsergebnisse, die in beiden Düngungsvarianten beinahe deckungsgleich waren, näherten sich in der Phase der Knospenbildung (BBCH 51) gut an die gemessenen Ergebnisse an. Anhand der gedüngten Variante $115,82 \text{ g m}^{-2}$ gemessen, betrug der simulierte Wert $148,83 \text{ g m}^{-2}$. Der Mittelwert der ungedüngten Parzellen lag bei $161,41 \text{ g m}^{-2}$.

Die größten Differenzen wurden gegen Ende der Blüte am zweiten Probesternin festgestellt. In der gedüngten Variante betrug der Unterschied zwischen der gemessenen und der simulierten Biomasse $165,40 \text{ g m}^{-2}$. Der Wert der oberirdischen Biomasse in der gedüngten Variante lag bei $343,33 \text{ g m}^{-2}$, jener Wert der ungedüngten Variante bei $280,84 \text{ g m}^{-2}$.

Bei der letzten Probenziehung, wo Blätter und Stängel bereits vertrocknet waren (BBCH 97), unterschätzte APSIM die übrig gebliebene, bereits abgestorbene oberirdische Biomasse der ungedüngten Variante ($180,71 \text{ g m}^{-2}$) mit $142,43 \text{ g m}^{-2}$. Umgekehrt überschätzte APSIM die gedüngte Variante ($127,65 \text{ g m}^{-2}$) mit $142,15 \text{ g m}^{-2}$ leicht.

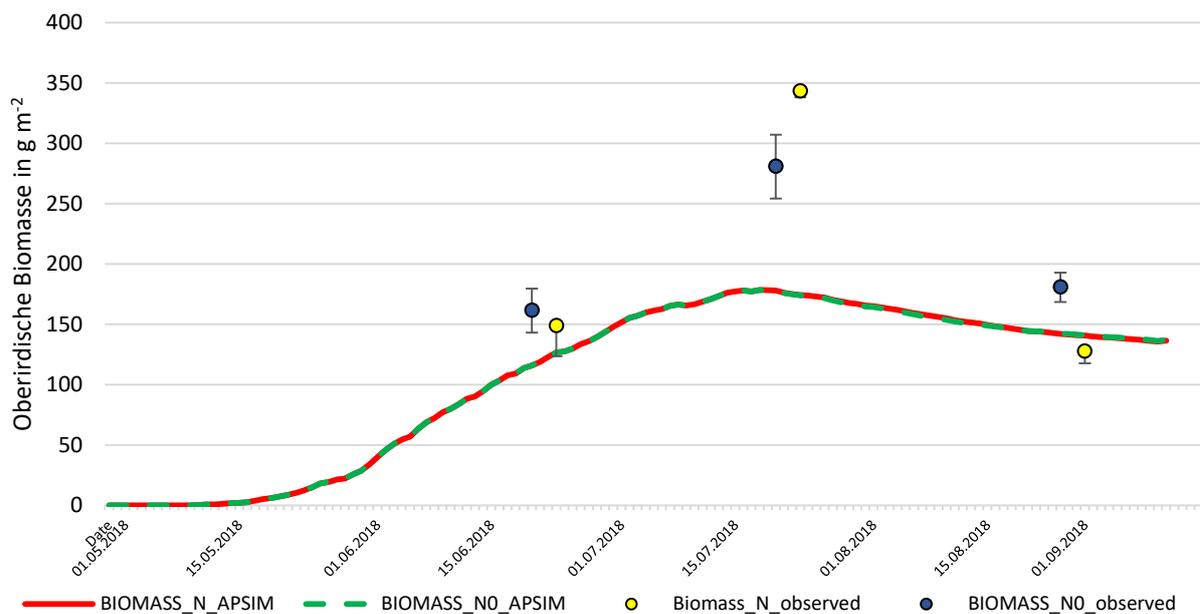


Abbildung 16: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der oberirdischen Biomasse in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante.

5.3.5.2 Oberhausen

Abbildung 18 zeigt den Vergleich zwischen den simulierten Ergebnissen von APSIM und den erhobenen Felddaten in der oberirdischen Biomasse. Die in Kapitel 5.2.4 erwähnte, starke Krautmasse der Sorte Jelly mit einem Durchschnittswert von $438,18 \text{ g m}^{-2}$ konnte APSIM nicht simulieren. Die Differenz zwischen Simulation und erhobenen Werten betrug bei der letzten Probennahme bei Beginn der ersten Blattvergilbungen in der bewässerten Variante $233,77 \text{ g m}^{-2}$ und in der unbewässerten Variante $126,02 \text{ g m}^{-2}$ und wurde von APSIM in beiden Varianten stark unterschätzt.

Während der Phase der Knollenentwicklung zur Zeit der zweiten Probenentnahme konnte APSIM die oberirdische Biomasse der bewässerten Variante bei Jelly sehr gut simulieren, das Modell kam auf einen Wert von $150,06 \text{ g m}^{-2}$, welcher nur $0,64 \text{ g m}^{-2}$ von den erhobenen Daten abwich. In der unbewässerten Variante unterschätzte APSIM mit einer Differenz von $25,17 \text{ g m}^{-2}$ nur gering. In der Sorte Innovator überschätzte das Modell in der unbewässerten Variante mit $32,93 \text{ g m}^{-2}$ und in der bewässerten Variante mit $47,69 \text{ g m}^{-2}$.

APSIM konnte aber trotz teils hoher Differenzen zu den Felddaten den Biomasseunterschied zwischen den Sorten darstellen. Innovator war am Feld die krautschwächere Sorte mit einem erhobenen Durchschnittswert von $185,3 \text{ g m}^{-2}$ in der bewässerten Variante. Diesen Wert unterschätzte APSIM mit einem Simulationsergebnis von $114,12 \text{ g m}^{-2}$. Bei der unbewässerten Variante wurde ebenso eine Unterschätzung von APSIM festgestellt. Der gemessene Durchschnittswert betrug $142,63 \text{ g m}^{-2}$, der simulierte Wert $79,24 \text{ g m}^{-2}$. Grundsätzlich unterschätzte das Modell am letzten Probenstermin während des Auftretens der ersten Blattvergilbungen die oberirdische Biomasse in beiden Bewässerungsvarianten und in beiden Sorten.

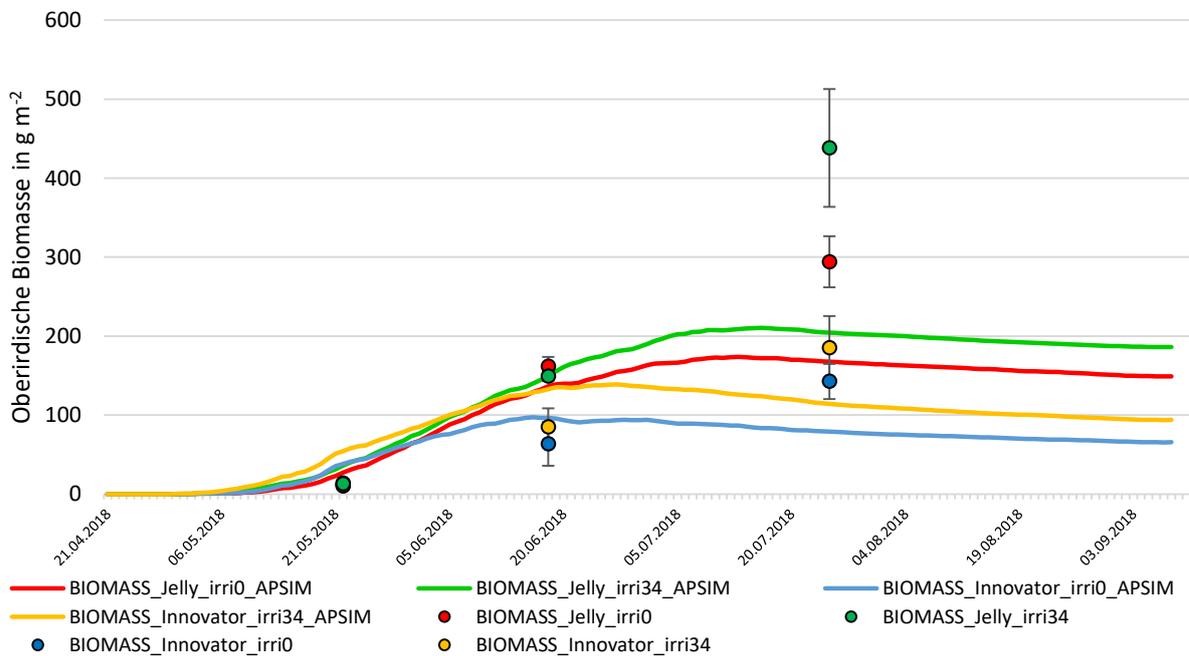


Abbildung 17: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der oberirdischen Biomasse zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten in den Sorten Jelly und Innovator.

5.3.6 Blatt- und Stängelbiomasse

Zunächst sei festgehalten, dass die am letzten Probenstermin eingesammelte, oberirdische Biomasse am Feld bereits abgestorben war. Trotz Verwitterung und Verwehungen konnte der Großteil der Pflanzenteile eingesammelt und identifiziert werden.

Die Datenerhebung des abgestorbenen Pflanzenmaterials ist deshalb von Bedeutung, da APSIM die Retranslokationen von Stickstoff und Kohlenstoff über den Gewichtsverlust der absterbenden, vegetativen Organe in die Knollen simulieren kann.

Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse der Blattbiomasse erkennt man, dass sich hier die Unterschätzung der oberirdischen Biomasse (Abbildung 18) widerspiegelt. Auch hier zeigt sich die große Differenz am Ende der Blühphase. Beide Simulationsergebnisse waren vor allem am zweiten Probenstermin realitätsfern und konnten den tatsächlichen Werten nicht entsprechen.

Der Verlauf der simulierten Stängelbiomasse nähert sich teilweise den tatsächlich gemessenen Werten. Zu Entwicklungsbeginn der Blütenanlagen wird in der ersten Probenziehung um lediglich $25,77 \text{ g m}^{-2}$ in der gedüngten und um $15,14 \text{ g m}^{-2}$ in der ungedüngten Variante unterschätzt. Am zweiten Probenstermin konnte die Stängelbiomasse in der ungedüngten Variante realitätsnah simulieren. Interessant ist hier anzumerken, dass danach kein Gewichtsverlust in der Stängelbiomasse simuliert wurde, obwohl die Differenz zwischen den letzten beiden Probensterminen $25,42 \text{ g m}^{-2}$ in der ungedüngten und $79,43 \text{ g m}^{-2}$ in der gedüngten Variante betrug.

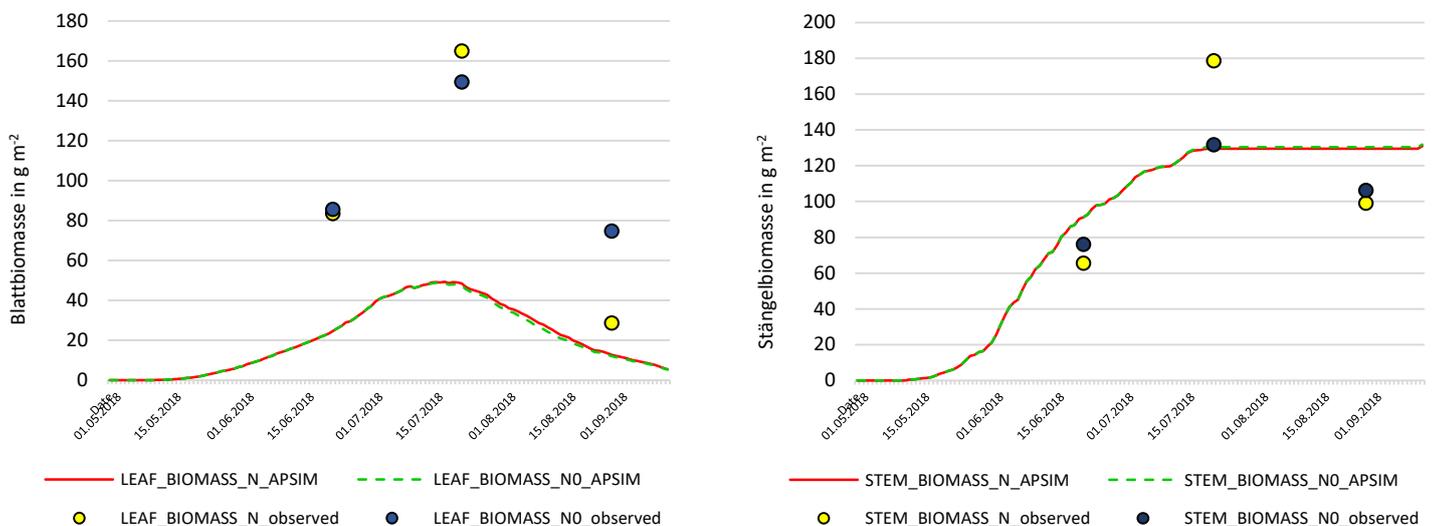


Abbildung 18: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Blatt- und Stängelbiomassen in der gedüngten (106kg) und in der ungedüngten Variante.

5.3.7 Knollenertrag

5.3.7.1 Zwettl

Der Knollenertrag in der Kartoffelproduktion ist agronomisch gesehen das wichtigste Ergebnis. Zu Erntebeginn wurde in der gedüngten Variante eine gemessene Knollenfrischmasse von $4844,44 \text{ g m}^{-2}$ erreicht, die von APSIM sehr gut mit $5033,844 \text{ g m}^{-2}$ simuliert und nur leicht überschätzt wurde. In der ungedüngten Variante wurde eine Knollenfrischmasse von $5066,67 \text{ g m}^{-2}$ erreicht, die APSIM ebenso sehr gut, aber nur leicht mit $4995,14 \text{ g m}^{-2}$ unterschätzt hat.

Ebenso konnte APSIM im Zeitraum der ersten Blütenknospenbildung bei der ersten Probenahme realitätsnah simulieren. Hier lag der Unterschied zu den gemessenen Ergebnissen in der ungedüngten Variante bei lediglich $113,75 \text{ g m}^{-2}$ und in der gedüngten Variante bei $99,81 \text{ g m}^{-2}$.

Im Gegensatz zur oberirdischen Biomasse im Zeitraum gegen Ende der Blüte, die APSIM im Vergleich zur Realität weit unterschätzte, wurde die Knollenfrischmasse in APSIM überschätzt. Das Mittel der beiden Simulationen lag bei $2890,92 \text{ g m}^{-2}$, die mit $1738,48 \text{ g m}^{-2}$ von der gedüngten und mit $1975,91 \text{ g m}^{-2}$ von der ungedüngten Version abwich.

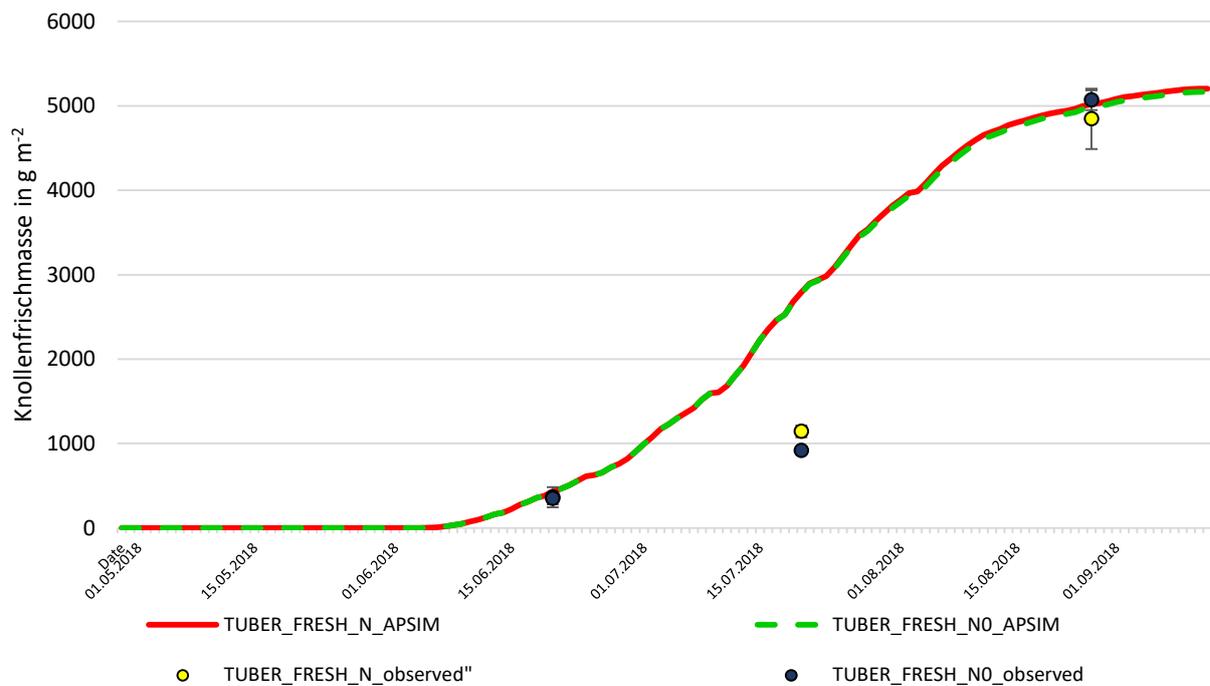


Abbildung 19: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der Knollenfrischmasse in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante.

5.3.7.2 Oberhausen

Wie bereits in Kapitel 5.2.5 erwähnt, wiesen die Knollenfrischmassen im Feldversuch signifikante Unterschiede zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten auf. Die schwache Ertragslage war der auftretenden „*Candidatus Phytoplasma solani*“ geschuldet. Daher wurde von einer Überschätzung des Ertrages in den Simulationsergebnissen ausgegangen.

Wie in Abbildung 21 ersichtlich, überschätzte APSIM wie erwartet die Knollenfrischmasse kurz vor Erntebeginn in beiden Sorten und beiden Varianten, in der bewässerten Variante der Sorte Innovator betrug die Differenz $670,68 \text{ g m}^{-2}$. Die unbewässerte Variante wurde ebenso mit einer Differenz von $241,50 \text{ g m}^{-2}$ vom erhobenen Wert von $622,44 \text{ g m}^{-2}$ überschätzt. Auch bei der Sorte Jelly überschätzte APSIM erneut, jedoch waren die Differenzen im Vergleich zur Sorte Innovator geringer. Die Simulationsergebnisse in der bewässerten Variante der Sorte Jelly lagen bei $1044,51 \text{ g m}^{-2}$ und unterschieden sich nur mit $73,71 \text{ g m}^{-2}$ von den Feldergebnissen. In der unbewässerten Variante betrug die Differenz zwischen Simulations- und Feldergebnissen $106,56 \text{ g m}^{-2}$. Am vorletzten Probetermin (Beginn der ersten Blattvergilbungen) überschätzte APSIM alle Versuchsergebnisse. Die größte Differenz lag in der bewässerten Variante der Sorte Innovator mit $728,23 \text{ g m}^{-2}$. Die Simulationsergebnisse zeigten höhere Erträge in bewässerten Varianten der beiden Sorten als in den unbewässerten Varianten, das Feldversuch ebenfalls widerspiegelte, jedoch mit teils geringeren Differenzen und Unterschieden zwischen den Sorten.

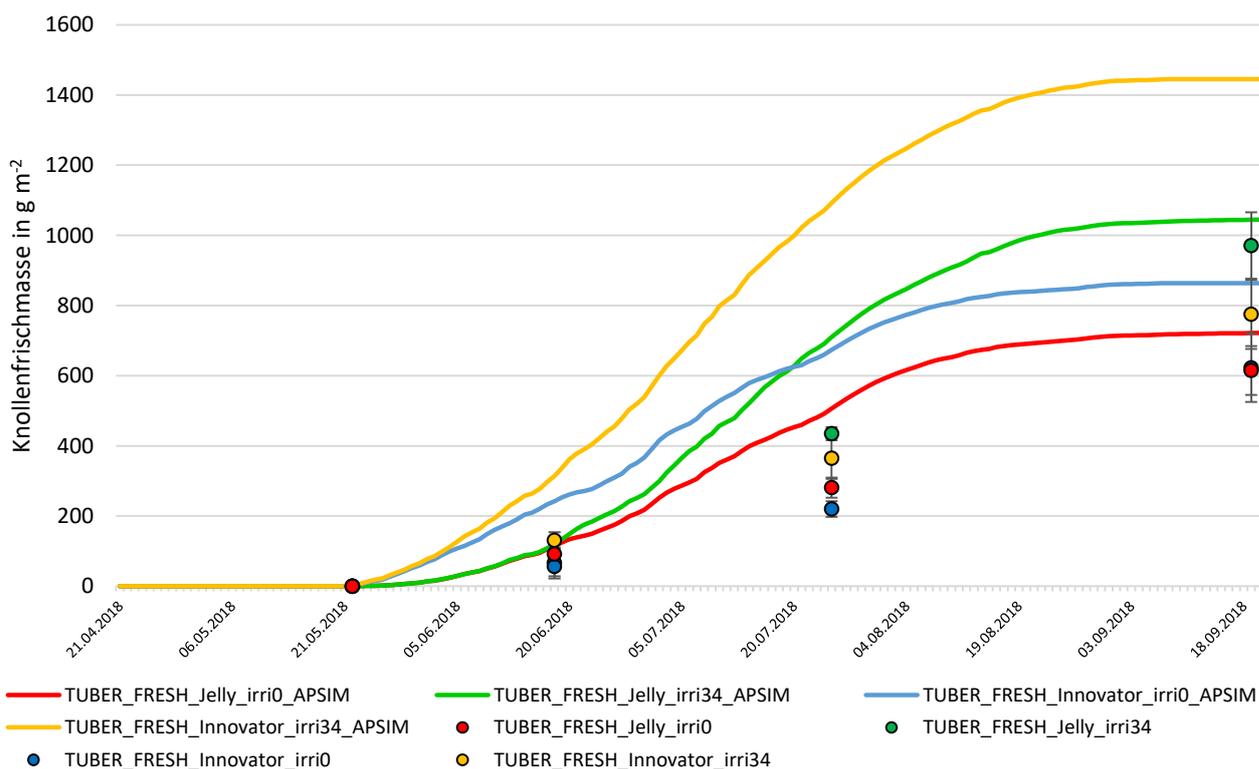


Abbildung 20: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der Knollenfrischmasse zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten in den Sorten Jelly und Innovator.

5.3.8 Gesamte Stickstoffaufnahme

In diesem Abschnitt wird die gesamte Stickstoffaufnahme der Kartoffelpflanze betrachtet und darauf geachtet, wie APSIM die Aufnahme simulierte.

Anhand der Abbildung 21 sieht man, dass die tatsächliche Stickstoffaufnahme früher beginnt und steiler ansteigt, als APSIM simulierte. Der gemessene Wert von $9,19\text{g m}^{-2}$ in der ungedüngten Variante wurde von APSIM erst 51 Tage später, in der gedüngten Variante nach 25 Tagen erreicht. Man erkennt, dass APSIM zu Beginn der Probenziehung die N-Aufnahme in der ungedüngten Variante stark unterschätzte. Danach wurden in beiden Behandlungsvarianten nach der zweiten Probenahme gegen Ende der Blüte leicht überschätzt, wobei anzumerken ist, dass die Differenz in der gedüngten Variante lediglich $0,93\text{g m}^{-2}$ und in der ungedüngten Variante $1,51\text{g m}^{-2}$ betrug. Somit konnte APSIM sehr realitätsnah simulieren. Im letzten Termin stimmte das Mittel der erhobenen Daten mit $9,59\text{g m}^{-2}$ mit den simulierten Daten der ungedüngten Variante von $10,28\text{g m}^{-2}$ gut überein. Die Phase der Seneszenz ist in APSIM anscheinend von längerer Dauer, da das Programm die Simulation 14 Tage nach dieser Probenentnahme fortführte, bis die letzte Phase der „Knollenreife“ im Pflanzenwachstumsmodell erreicht wurde. Hier wurde ein Endwert der Gesamtstickstoffaufnahme von $10,25\text{g m}^{-2}$ ausgegeben. Die Stickstoffaufnahme in der gedüngten Variante beim letzten Probenentnahmetermin lag wie erwähnt bei $10,75\text{g m}^{-2}$, APSIM simulierte die aufgenommenen Stickstoffmenge bis zum Ende der Knollenreife, also demnach 14 Tage nach der letzten Probenentnahme ($10,75\text{g m}^{-2}$), mit $14,51\text{g m}^{-2}$. Zum Zeitpunkt der Knollenreifephase wurde zwischen den simulierten Düngungsstufen lediglich eine Differenz von $3,49\text{g m}^{-2}$ festgestellt. Um die Unterschiede zwischen gemessenen und simulierten Daten besser verstehen zu können, wurde in den folgenden Abschnitten die N-Aufnahme auf die oberirdische Biomasse und auf die Knollenfrischmasse aufgeteilt.

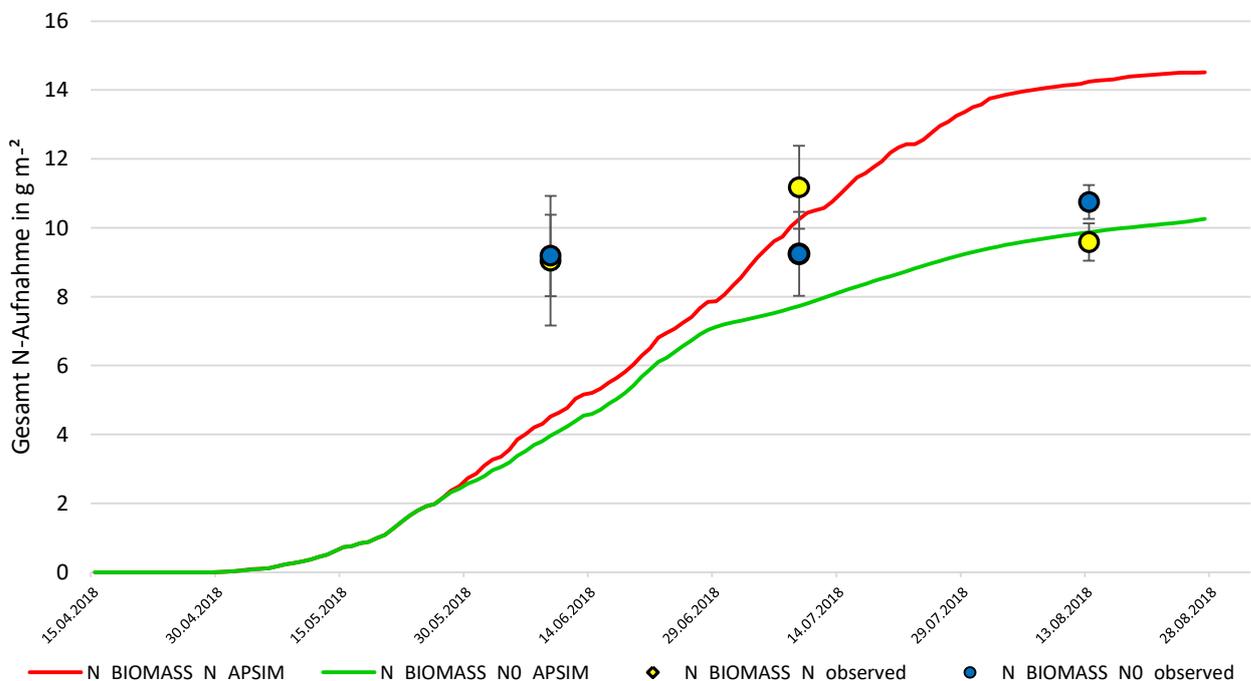


Abbildung 21: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der gesamten Stickstoffaufnahme in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante.

5.3.9 Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse

Wie in Abbildung 22 ersichtlich, spiegelt sich hier die Unterschätzung der Gesamtstickstoffaufnahme zu Beginn der Probenziehung aus dem vorigen Abschnitt wieder. Die Stickstoffaufnahme in den Blättern und Stängeln machte beispielsweise in der ungedüngten Variante mehr als das Doppelte aus ($7,89 \text{ g m}^{-2}$) als die simulierte N-Aufnahme ($3,89 \text{ g m}^{-2}$). Danach wird die Retranslokation von Stickstoff in andere Pflanzenorgane nach dem Vergilben und Absterben der oberirdischen Pflanzenteile in andere Organe der Kartoffelpflanze in der Simulation außer Acht gelassen. Die N-Simulation der gedüngten Variante hält sich ab Beginn der Fruchtentwicklung über 6 g m^{-2} , obwohl der tatsächliche Wert in diesem Zeitraum mit $9,01 \text{ g m}^{-2}$ unterschätzt wurde, der bis zum vollständigen Absterben in den Blättern und Stängeln auf rund $1,69 \text{ g m}^{-2}$ sank.

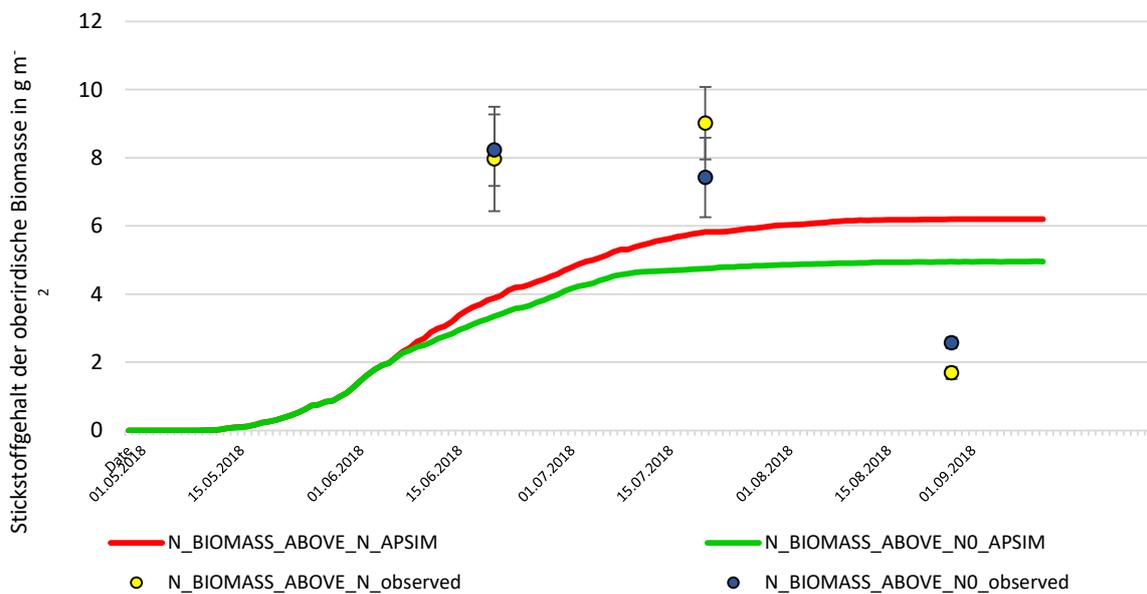


Abbildung 22: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse des Stickstoffgehaltes in der oberirdischen Biomasse in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante.

5.3.10 Stickstoffgehalt in den Knollen

Im Gegensatz zur oberirdischen Biomasse wurde der N-Gehalt in den Knollen sehr gut und realitätsnah simuliert. Vor allem zu Beginn der Entwicklung der Blütenanlagen während der ersten Probenziehung und am Ende der Probenziehungen war APSIM in der gedüngten Behandlungsvariante sehr treffsicher. Lediglich am letzten Termin wurden in der ungedüngten Variante die N-Aufnahme um $3,23 \text{ g m}^{-2}$ von APSIM unterschätzt. Die Simulation am zweiten Probentermin konnten jedoch den signifikanten Unterschieden der Feldergebnisse nicht genau entsprechen. Die Differenz in der ungedüngten Variante betrug zum gemessenen N-Gehalt $2,45 \text{ g m}^{-2}$.

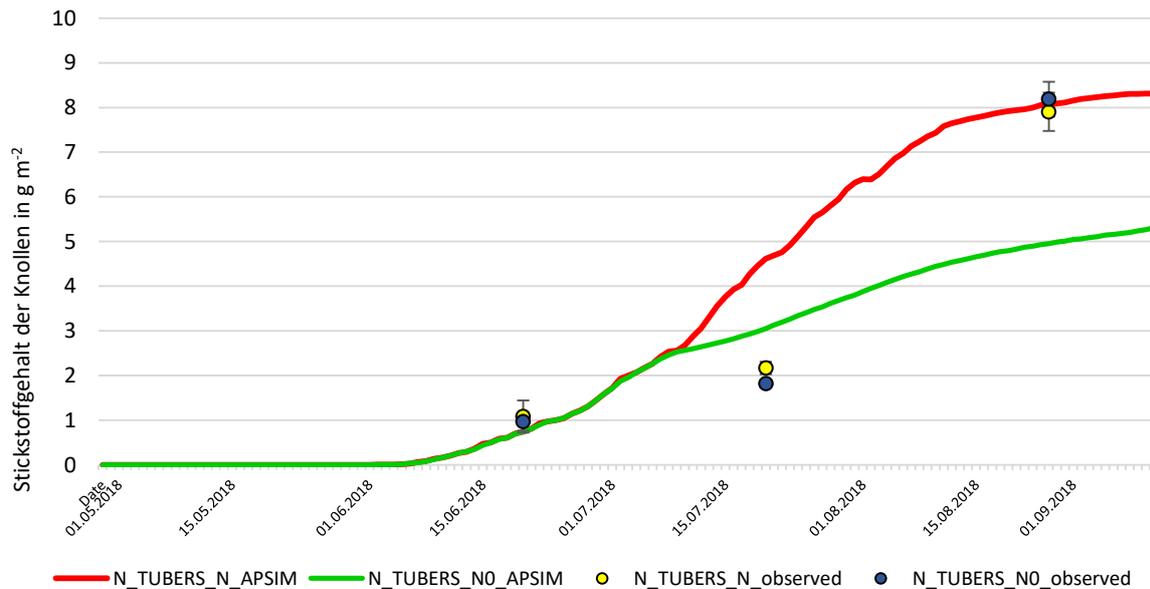


Abbildung 23: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse des Stickstoffgehaltes der Kartoffelknollen in der gedüngten (106kg) und in der ungedüngten Variante.

6 Diskussion

6.1 Wetter

Wird der Niederschlag im Zeitraum März bis Oktober des Versuchsjahres mit den langjährigen, mittleren Niederschlägen betrachtet, so lag der Jahresniederschlag in Oberhausen mit 602 mm für diese Region unter dem langjährigen Schnitt von 624 mm. Bis auf die Monate April und August lagen die monatlichen Regenmengen während der Kulturentwicklung über den 30-jährigen Monatsdurchschnitten. Aufgrund der hohen Temperaturen kann davon ausgegangen werden, dass die vermehrten Niederschläge über Transpiration und Evaporation auch teilweise wieder verloren gingen. Die ständig über dem langjährigen Schnitt gelegenen Temperaturen und länger andauernde Trockentage förderten womöglich auch die Ausbreitung der „*Candidatus Phytoplasma solani*“ im Kartoffelbestand.

Anhand der Abbildung 10 kann man am Standort Zwettl, 150 km nordwestlich des Standortes Oberhausen, erkennen, dass die Trockenheit in den Sommermonaten in Niederösterreich im Versuchsjahr bestätigt wurden. Im Zeitraum zwischen März und Oktober blieb die Niederschlagsmenge mit 397mm deutlich unter der 30-jährigen Niederschlagsmenge von 560mm. Trotz der sehr geringen Niederschlagsmengen und der überdurchschnittlich hohen Temperaturen rund um die Legephase dürften die Niederschläge im Mai und Juni bei anhaltend höheren Temperaturen für eine ausreichende Wasserversorgung für die Sicherung der Erträge im September ausgereicht haben.

6.2 Phänologie

Zwischen den Düngungsstufen konnten bei der Felddatenerhebung keine Unterschiede festgestellt werden. Das bedeutet, dass die Düngung keinen Einfluss auf die Pflanzenphänologie hatte. Die Autoren Jianyang und Shiqiang (2013) testeten den Einfluss der Stickstoffdüngung auf die Phänologie in acht unterschiedlichen Pflanzenarten und bestätigten, dass keine Stickstoffeffekte, beispielsweise in der Blühphase, auf die Phänologie der Pflanzen beobachtet wurde und dass die Pflanzenphänologie in den unterschiedlichen Regionen von der Bodenstickstoffverfügbarkeit unterschiedlich beeinflusst wird. Es wurde seitens der Autoren aber auch angemerkt, dass das Wissen zwischen Stickstoffreaktionen in Pflanze und Boden und der Pflanzenphänologie derzeit noch begrenzt ist.

Wie in Tabelle 10 ersichtlich, wurden die Simulationsergebnissen in APSIM bestätigt. Trotz der unterschiedlichen Düngung der Parzellen von 106kg wurde kein Unterschied in der Simulation zwischen den beiden Düngungsvarianten festgestellt.

Laut Brown et al. (2019) hängt die Phänologie grundsätzlich vom Aufgang der Kartoffelpflanzen ab, das ausschließlich über die Legetiefe und den Legezeitpunkt in der Simulation beeinflusst werden kann. Nach diesem Zeitpunkt arbeitet das Kartoffelmodell mit Temperatursummen. Diese werden solange akkumuliert, bis das vorgegebene Summenziel (Target) erreicht ist. Dadurch wird eine neue phänologische Phase eingeleitet. Am Beispiel der Knollenreife zeigte sich, dass APSIM eine realitätsnahe Simulation zusammenbrachte: Ditta ist eine mittelfrühe Kartoffelsorte, deren Reifedauer laut Nitsch (2020) zwischen 135-150 Tage vom Anbau bis zur Ernte beträgt. APSIM legte die Knollenreife und damit das

Simulationsende der Kartoffelkultur mit 131 Tage nach dem Legen fest. Somit zeigt sich, dass die Simulation auch gut mit der Sorteneigenschaft zusammenpasste.

6.3 Oberirdische Biomasse

6.3.1 Zwettl

Wie in Abschnitt 4.5.2 erwähnt, wurden für die Modellierung die Bodenstickstoffdaten aus Oberhausen herangezogen. Aufgrund des hohen Stickstoffvorrats im Boden wurden in der oberirdischen Biomasse keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten festgestellt. Stickstoff war kein limitierender Faktor, aber grundsätzlich zeigen die Versuchsergebnisse in Abbildung 18, dass die Stickstoffdüngung maßgebend das Blattwachstum beeinflusst und die Bildung von mehr Blattmasse zu einer weiteren Erhöhung des täglichen Knollenzuwachses führt. (vgl. Möller, 2002). Nimmt man die Felddaten mit $343,33\text{g m}^{-2}$ (gedüngt) und $280,84\text{g m}^{-2}$ (ungedüngt) und die Daten den kumulierten Krautertrag der Sorte *Ditta* mit rund 350g m^{-2} von Haase et al. (2014) zur Hand, kann von einer guten Vergleichbarkeit ausgegangen werden.

APSIM unterschätzte die oberirdische Biomasse vor allem am zweiten Probesternin gegen Ende der Blütenentwicklung. Im Makrostadium des Absterbens der Kartoffelpflanze am Ende der Vegetation konnte APSIM die Versuchsergebnisse sehr gut wiedergeben: in der gedüngten Variante betrug die Differenz lediglich $14,51\text{g m}^{-2}$, in der ungedüngten Variante $38,27\text{g m}^{-2}$.

6.3.2 Oberhausen

Grundsätzlich zeigen die Abbildungen 12 und 18 die Ergebnisse, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Bewässerungsstufen in beiden Sorten gemessen werden konnte. Kupke et al. (2016) zeigten im Zuge eines Agro-Klima-Forschungsprojektes in Bayern, dass vor allem in Trockenperioden die Versorgung der Kartoffelpflanzen mit zusätzlichem Wasser ein schnelleres Wachstum der oberirdischen Biomasse mit sich bringt, die Dichte des Blattapparates schneller zunimmt und dadurch ein zügigerer Bestandsschluss zur Folge hat und somit sich positiv auf den Ertrag auswirken kann. Unterschiedliche Quellen langjähriger Berechnungsversuche, darunter auch die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, belegen, dass im 14-jährigen Mittel die Kartoffelerträge durch Bewässerungsmaßnahmen um 175 dt/ha höher liegen als unbewässerte Kartoffelbestände (Pfleger und Rößler, 2009).

Die Eigenschaft der zügigen Krautentwicklung der Sorte Jelly, die im direkten Vergleich zur Sorte Innovator im Feldversuch gut erkennbar war und die auch in der Sortenbeschreibung erwähnt wird, konnte APSIM nicht simulieren. Das Julius Kühn-Institut bestätigte 2008 in seiner Mitteilung zum neuesten Stand der Forschung in der quantitativen Phytophthora-Resistenz die starke Krautmassebildung von Jelly mit der Notenvergabe sechs von neun möglichen (je höher, umso mehr Krautmassebildung). APSIM konnte zwar Biomasseunterschiede zwischen den Sorten feststellen, jedoch nicht in jener signifikanten Höhe, wie es der Feldversuch gezeigt hatte. Das Auftreten der bereits genannten „*Candidatus Phytoplasma solani*“ im Versuchsjahr, das zu erheblichen Ertragseinbußen führte, verwässerte zusätzlich die Werte für die oberirdische Biomasse, die in normalen Jahren bei einer durchschnittlichen Kartoffelpflanze 60 Tage nach dem Auflauf bei rund 418

g m^{-2} liegen (Kolbe, 1995). Der durchschnittliche Wert beider Sorten lag in der Simulation im Vergleich bei $129,02 \text{ g m}^{-2}$, jener des Feldversuches bei $114,99 \text{ g m}^{-2}$.

6.4 Blattbiomasse und Stängelbiomasse

Um die Unterschätzung in der Simulation der oberirdischen Biomasse näher betrachten zu können, wurden die erhobenen Daten auf Blattbiomasse und Stängelbiomasse unterteilt, die in Abbildung 19 zu sehen sind. Wie in Abschnitt 5.4.3 bereits erwähnt, wurden bei der letzten Probenentnahme nur mehr die abgestorbenen Pflanzenreste der oberirdischen Biomasse eingesammelt. Einige Pflanzenteile waren bereits stark verwittert oder verweht, dadurch kann der Gewichtsverlust im Vergleich zur vorangegangenen Feldprobe begründet werden.

Anhand der Grafiken ist schnell zu erkennen, dass vor allem die Blattbiomasse von APSIM unterschätzt wurde. Die große Differenz zu Beginn der Blühphase in der oberirdischen Blattbiomasse spiegelt sich in der erhobenen Blattbiomasse wieder, hier betrug die Differenz in der gedüngten Variante $116,42 \text{ g m}^{-2}$ – APSIM simulierte mit $48,49 \text{ g m}^{-2}$ lediglich ein Drittel der tatsächlichen Blattbiomasse. APSIM konnte keinen Unterschied zwischen den beiden Düngungsvarianten simulieren.

Die Stängelbiomasse konnte vergleichsweise gut simuliert werden und wurde anfangs von APSIM gering überschätzt. Ab dem zweiten Probenentnommen zu Beginn der Blühphase blieb die Stängelmasse in APSIM konstant bei $129,44 \text{ g m}^{-2}$. APSIM simulierte mit zunehmender Reife der Knollen keine Gewichtsverluste im Stängelbereich über die Retranslokation von Kohlenstoff und Stickstoff.

6.5 Blattanzahl am Hauptstängel

Der Feldversuch zeigte, dass die ungedüngte Variante zu Beginn der Blütenentwicklung eine Blattanzahl von 17 und die gedüngte Variante eine Blattanzahl von 18 aufwies.

Die Blattanzahl ist laut Brown et al. (2011) wichtig für die Beschreibung von Wachstum und Entwicklung von Pflanzen. Die Anzahl der Stängel ist laut Autor abhängig von der Knollengröße und dem Legeabstand und die Blattanzahl ist wiederum von der Stängelanzahl abhängig. Aufgrund der derzeitigen Entwicklungen des Modells wird für die Stängelanzahl eine Konstante vorgegeben und die Blattanzahl mit einem Maximum von 34 begrenzt. Anhand der Sorte RUSSET BURBANK, die der Autor als Beispiel nannte, endet die Blattanzahl am Hauptstängel um den Blütenbeginn bei 16 Blättern. Die Feldversuche zeigten ein sehr ähnliches Bild mit 17 bzw. 18 Blättern, wogegen beide APSIM-Simulationen auf eine Blattanzahl von 24 zu diesem Zeitpunkt kamen. Es können jedoch bei der Kartoffel auch nach der Blüte Blätter produziert werden, jedoch ist dies noch nicht statistisch bestimmt. Zukünftige Entwicklungen werden es ermöglichen, diese als eine Funktion der Knollengröße und der Behandlung zu modellieren. Letztendlich zeigte die Simulation eine leichte Überschätzung der Blattanzahl im Vergleich zur Realität.

6.6 Knollenertrag

6.6.1 Zwettl

Der Knollenertrag lag in der gedüngten Variante bei 4844,44g m⁻² und in der ungedüngten Variante bei 5066,67g m⁻². Aufgrund des vorhin erwähnten hohen Stickstoffvorrats im Boden wurden keine Unterschiede zwischen den Düngungsstufen festgestellt. Es kann angenommen werden, dass der hohe Stickstoffanteil im Boden die hohen Knollenerträge begünstigte. Tilman und Wedin (1991) (in Jianyang und Shiqiang, 2013) kamen zum Schluss, dass Pflanzenarten bei stickstoffreichen Böden den reproduzierenden Organen, in diesem Fall den Kartoffelknollen, mehr Ressourcen zuführen.

Vergleicht man die erhobenen Werte mit dem Deckungsbeitragsrechner der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen (www.idb.awi.bmlfuw.gv.at), so lag der ermittelte Wert deutlich über dem Jahresdurchschnittswert in Niederösterreich mit 2934g m⁻². Laut Auskunft des Landwirts, auf dessen Flächen dieser On-Farm-Versuch stattfand, wurden auf diesem Schlag rund 35 Tonnen (3500g m⁻²) geerntet, 1566 g m⁻² weniger als die Ergebnisse der gedüngten Variante. Die Krautabtötung wurde vom Landwirt um den 9. Juli bereits durchgeführt. Hier betrug die Knollenfrischmasse 1142 g m⁻². 35 Tage danach, bis zum letzten Probetermin, wurden über die Verschiebung der Assimilate aus Blättern und Stängeln in die Knollen 3702g m⁻². Das bedeutet einen täglichen Zuwachs der Knollenfrischmasse von 105,77g m⁻². Der Knollenzuwachs in der Hauptwachstumsphase unter optimalen Wachstumsbedingungen beträgt im ökologischen Landbau bereits 9 dt pro Hektar (vgl. Möller, 2002). Somit sind auch diese gemessenen Werte nachvollziehbar.

APSIM konnte die Knollenerträge bei der ersten und letzten Probenentnahme sehr realitätsgetreu nach den gemessenen Felddaten simulieren. APSIM simulierte die Bildung der Knollenfrischmasse nach der datengenauen Simulation zu Probenbeginn rund 18 Tage zu früh und überschätzte die Erträge in der Zeit der zweiten Probenentnahme gegen Ende der Blüte um durchschnittlich 1738,48 g m⁻², als es am Feld der Fall war.

6.6.2 Oberhausen

Wie bereits in den Kapiteln 5.2.5 und 5.4.4.2 erwähnt, wurden die Ertragspotentiale in Oberhausen durch die auftretende Krankheit „*Candidatus Phytoplasma solani*“ erheblich eingeschränkt. Der höchste Ertrag lag in der bewässerten Variante der Sorte Jelly bei 970,80 g m⁻² und die niedrigste Ertragsstufe in der unbewässerten Variante derselben Sorte bei 614,91 g m⁻². Die Landwirtschaftskammer Niederösterreich erwähnte noch im selben Jahr der Versuchsdurchführung, dass dieser Krankheitsverlauf bereits zwei Jahre hintereinander in trockenen Gebieten des Weinviertels massiv auftrat. „Die extreme Trockenheit und Hitze haben die Ausprägungen der Symptome in diesem Jahr auf jeden Fall verstärkt“ (Landwirtschaftskammer Niederösterreich, 2018). Aufgrund dieser Problematik im eigenen Versuchsbestand konnten keine nennenswerten Ergebnisse erzielt werden.

Auch APSIM konnte diese Erträge nicht simulieren, da im Modell aufgrund der noch fehlenden Datenlage noch keine biotischen Faktoren inbegriffen sind. Auftretende Krankheiten, wie es am Standort Oberhausen der Fall war, gehen derzeit über die Möglichkeiten der Pflanzenwachstumssimulation des jetzigen APSIM-Modells hinaus.

6.7 Gesamte Stickstoffaufnahme

Die unterschiedlichen Düngungsvarianten der Kartoffelbestände im Versuch lieferten in der Gesamtstickstoffaufnahme ähnliche Ergebnisse. Am letzten Probenentnahmetermin (Absterben der Blätter und Stängel) wurden in der gedüngten Variante $10,75\text{ g m}^{-2}$ und in der ungedüngten Variante $9,58\text{ g m}^{-2}$ gemessen. In den erhobenen Daten konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngungsstufen festgestellt werden. Wie bereits in Abschnitt 6.3 erwähnt, wird der Vorrat an Bodenstickstoff als Begründung möglich sein. Aus den Versuchen von Nitsch (2020) geht hervor, dass die volle Ertragsbildung bei einer optimalen Menge von 160 kg N/ha , bei einem Ertragspotential von 535 dt/ha und bei optimaler Wasserversorgung erreicht werden kann. Im On-Farm-Versuch lagen die Gesamtstickstoffaufnahmen – wie oben erwähnt – bei 108 kg bzw. 96 kg/ha und es konnten Erträge von 484 dt bzw. 507 dt/ha erreicht werden.

APSIM konnte die gesamte Stickstoffaufnahme sehr gut simulieren, vor allem konnte APSIM die Simulation der ungedüngten Variante am letzten Probenentnahmetermin sehr realitätsnah mit $9,87\text{ g m}^{-2}$ eine Abweichung zu den gemessenen Daten von nur $0,29\text{ g m}^{-2}$ darstellen. Die Phase der Seneszenz ist in APSIM anscheinend von längerer Dauer, da das Programm die Simulation 14 Tage nach dieser Probenentnahme fortführte, bis die letzte Phase der „Knollenreife“ im Pflanzenwachstumsmodell erreicht wurde. Hier wurde ein Endwert der Gesamtstickstoffaufnahme von $10,25\text{ g m}^{-2}$ ausgegeben. Die Stickstoffaufnahme in der gedüngten Variante beim letzten Probenentnahmetermin lag wie erwähnt bei $10,75\text{ g m}^{-2}$, APSIM simulierte die aufgenommene Stickstoffmenge bis zum Ende der Knollenreife, also demnach 14 Tage nach der letzten Probenentnahme ($10,75\text{ g m}^{-2}$), mit $14,51\text{ g m}^{-2}$. Zum Zeitpunkt der Knollenreifephase wurde zwischen den simulierten Düngungsstufen lediglich eine Differenz von $3,49\text{ g m}^{-2}$ festgestellt.

Laut Brown et al. (2019) bestimmt der Vermittler die Stickstoffaufnahme über die Verteilung des Stickstoffs an die jeweiligen Pflanzenorgane. Wenn die Nachfrage nach Stickstoff geringer ist als die nötige Aufnahme über Boden, kommt es zum Stickstoffüberschuss im Boden. Diese These würde auch den hohen Stickstoffvorrat im Boden bestätigen. Durch eine gute Versorgung der Pflanze mit genügend Stickstoff wurde (wahrscheinlich) von der Retranslokation und eine Aktualisierung einer neuerlichen Trockenmassezuordnung für eine Ertragsmaximierung in Stresssituationen nicht Gebrauch gemacht.

6.8 Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse

Wie in Abbildung 22 ersichtlich, wurden am Ende der Blühphase in der gedüngten Variante $9,01\text{ g N m}^{-2}$ von Blättern und Stängeln aufgenommen, deren Stickstoffgehalt über das Absterben in der Knollenreifephase und über Retranslokationen in die Knollen selbst auf $1,69\text{ g N m}^{-2}$ sank. In den ungedüngten Parzellen kam der gemessene Höchstwert auf $7,42\text{ g N m}^{-2}$ und am Ende der Knollenreifephase auf $2,57\text{ g N m}^{-2}$. Laut Nitsch (2020) liegen die optimalen Stickstoffgehalte des Krautes im BBCH-Stadium 35 bei vier bis fünf Prozent der Trockenmasse und fallen kontinuierlich auf $1,2\%$ im BBCH-Stadium 85 ab. Die Daten des On-Farm-Versuchs zeigen, dass die Stickstoffversorgung bei der ersten Probenentnahme (BBCH 51) bei $5,1\%$ in der ungedüngten und bei $5,4\%$ der gedüngten Variante lagen, die zur Erntezeit der Knollen auf $1,4\%$ bzw. $1,3\%$ abnahmen. Man kann daher behaupten, dass die Versuchswerte den Werten von Nitsch (2020) sehr nahe kommen, da auch erwähnt wurde,

dass die Spannweite der Nährstoffgehalte im jeweiligen BBCH-Stadium sehr stark von den Niederschlagsverhältnissen abhängig sind (Nitsch, 2020). Zumindest wird damit bestätigt, dass ausreichend Stickstoff sowohl im Boden als auch durch die Düngung vorhanden war.

In APSIM sind deutliche Unterschätzungen der Gesamtstickstoffaufnahme zu Beginn der Probenziehung aus dem vorigen Abschnitt zu erkennen, die in den Blättern und Stängeln in der ungedüngten Variante mehr als das Doppelte ($7,89 \text{ g m}^{-2}$) als die simulierte N-Aufnahme ($3,89 \text{ g m}^{-2}$) ausmachte. Ähnlich wie in der oberirdischen Stängelbiomasse, blieben die simulierten Stickstoffwerte nach der zweiten Probenentnahme bis zum Ende der Simulation auf ihrem Niveau erhalten. Auch hier ist ersichtlich, dass, wie Brown et al. (2019) beschreibt, die Stickstoffumverteilung von alten, seneszierten Organen und die Stickstoffaufnahme aus dem Boden anscheinend ausreichten, um die nötige Versorgung der Knollen aufrecht zu erhalten. Somit war eine Retranslokation von Stickstoff aus den Blättern und Stängel nicht notwendig.

6.9 Stickstoffgehalt in den Knollen

Der Stickstoffgehalt in den Knollen zeigte in der letzten Probennahme kurz vor Erntebeginn keinen Unterschied in den beiden Düngungsstufen, was wiederum bestätigt, dass Stickstoff in ausreichender Form vorhanden und es dadurch kein limitierender Faktor war. Ein hoher Stickstoffgehalt in den Knollen weist zumeist auf eine hohe Stickstoffdüngung hin, die als Folge eine Reduktion der Kochqualität und der Lagereigenschaft haben können (Nitsch, 2003). Laut Haase et al., 2014) leistet die Sorte *Ditta* einen durchschnittlichen Stickstoffentzug über die Knollen von $93,6 \text{ kg/ha}$ auf. Der Stickstoffgehalt der Knollen in den Messungen lag bei umgerechnet $80,69 \text{ kg/ha}$. Laut NITSCH, 2020 sollen die Stickstoffgehalte bei ausgereiften Knollen die 1% der Trockenmasse nicht wesentlich überschreiten. Unser Versuch zeigte, dass die Stickstoffgehalte bei 1,1% in beiden Varianten lagen und die sich somit die Versuchsergebnisse mit der Literatur decken. Mit zunehmender Düngung steigen die Stickstoffgehalte in den Knollen und diese gelten als Indikatoren für die Knollenqualität (hohe Düngungsintensität führen zu Rohbreiverfärbungen, Kochdunkelung, Fäulnisempfindlichkeit etc.) (Nitsch, 2020).

Die von APSIM simulierte Stickstoffaufnahme in der gedüngten Variante ($8,06 \text{ g m}^{-2}$) deckte sich sehr gut mit den Ergebnissen aus den Versuchen ($7,90 \text{ g m}^{-2}$). In der ungedüngten Variante unterschätzte APSIM die gemessenen Ergebnisse ($8,18 \text{ g m}^{-2}$) um $3,23 \text{ g m}^{-2}$.

7 Conclusio

Ziel dieser Arbeit war die Sammlung von Daten aus On-Farm-Versuchen in Kartoffelkulturen für die Parametrisierung des Pflanzenwachstumsmodells APSIM für österreichische Verhältnisse.

APSIM war in der Lage, die Verläufe der Ertragsbildung am Anfang so wie am Ende des Vegetationsverlaufes gut zu simulieren. Die Stickstoffaufnahme unterschätzte und überschätzte APSIM. Die geringen Abweichungen der beiden Simulationskurven in der Stickstoffaufnahme bestätigten aber die Messergebnisse, dass Stickstoff keinen limitierenden Faktor am Standort Zwettl darstellte. Leider konnten aufgrund der aufgetretenen „*Candidatus Phytoplasma solani*“ wenig brauchbare Ergebnisse am Standort Oberhausen erzielt werden, was wiederum das Risiko von On-Farm-Versuchen auf Praxisschlägen widerspiegelt. Zusätzlich sei erwähnt, dass es sich um die erste österreichische Datenerhebung aus Praxisversuchen für das APSIM-Potato Model handelte. Für eine genaue Parametrisierung des Modells sind für diese Art der Versuchsdurchführung noch weitere Forschungsarbeiten und Feldversuche zur Erlangung zusätzlicher Daten nötig. Umfangreiche Bodenanalysen, exakte Wetterdaten und eine gute, der Kultur entsprechenden Planung für die Probenentnahme, wie es bei der Kartoffel der Beginn des Knollenwachstums der Fall ist, würden den Parametrisierungsprozess zusätzlich unterstützen.

Wie auch Nitsch (2020) erwähnte, sind die grundsätzlichen Probleme sowie fehlende Erkenntnisse mit der Kartoffelknolle nach wie vor vorhanden. Die Kartoffel als Kulturpflanze ist für ein Pflanzenwachstumsmodell sehr herausfordernd, da sie sich vegetativ vermehrt, die Knolle ein lebender Organismus ist und der physiologische Status im Vergleich zu Samenpflanzen variiert. Es gibt bei der Kartoffel neben der großen Vielfalt an Sorten und deren unterschiedlichen Eigenschaften noch keine guten quantitativen Erklärungen, wie Umweltfaktoren oder das Lagerungsmanagement das Pflanzgut generell beeinflussen. Bislang ist es in unterschiedlichsten Modellen nicht gelungen, die Effekte der Knollenphysiologie darzustellen. Daher ist es aufgrund fehlender Erkenntnisse auch in APSIM noch nicht möglich, eine genaue Simulation über die Lagerung von Kartoffeln und damit einhergehenden Umweltbedingungen bereitzustellen, und wenn, dann nur über vereinfachte Wege (Brown et al., 2011).

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in Zukunft durch weitere Forschungsarbeiten und Feldversuche zur genaueren Parametrisierung das APSIM-Potato Model eine breite Anwendung finden kann. Beispielsweise kann es nicht nur als pflanzenbauliche Entscheidungsgrundlage bei der Sortenwahl, bei der Menge und Zeitpunkt der Düngung oder der Beregnungsmenge auf landwirtschaftlicher Betriebsebene nützlich sein, sondern es könnte auch in weiterverarbeitenden Sektoren, wie beispielsweise in der Stärkeindustrie, als Informationsquelle für die Einschätzung von Erträgen im Vertragsanbau oder bei der Mengenschätzung in der industriellen Verarbeitung hilfreich sein.

Es bleibt abschließend festzuhalten, dass Pflanzenwachstumsmodelle einen wesentlichen Beitrag für eine zukünftige Bewirtschaftung unserer Kulturlandschaft in Zeiten des Klimawandels und damit einhergehenden, zunehmenden Wetterkapriolen, leisten können und daher der Prozess der Weiterentwicklung, Parametrisierung und Anwendung solcher Modelle weiterhin gegeben sein muss.

8 Literaturverzeichnis

- Aggarwal, P., Shirsath, P., Vyas, S., Arumugam P., Goroshi, S., Aravind, S., Nagpal, M., Chanana M. (2020): Application note: Crop-loss assessment monitor – A multi-model and multi-stage decision support system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, Artikel 105594.
- Austria-Forum (s.a.): *Austria-Forum - das Wissensnetz aus Österreich: Das Waldviertel*. Von <https://austria-forum.org/af/AEIOU/Waldviertel> (02. Oktober 2019).
- Austrian Standards (s.a.): Normungsprozesse. <https://www.austrian-standards.at/%C3%BCber-uns/> (11. September 2019).
- Bleiholder, H., Meier, U. (2016): BBCH-Skala : Phänologische Entwicklungsstadien wichtiger landwirtschaftlicher Kulturen, einschließlich Unkräuter. Clenze: Erlingen Verlag.
- BMNT - Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2009). Marchfeld Gemüse. https://www.bmnt.gv.at/land/lebensmittel/trad-lebensmittel/feldfruechte/marchfeld_gemuese.html (02. Oktober 2019).
- Bodenkarte (s.a.): Beschreibung der Bodenform. <https://bodenkarte.at/#/center/15.1643,48.6027/zoom/13.4>. (14. Oktober 2019).
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B. (1996): Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88, 704-716.
- Brady, S.M., Burow, M., Busch, W., Carlborg, Ö., Denby, K.J., Glazebrook, J., Hamilton, E.S., Harmer, S.L., Haswell, E.S., Maloof, J.N., Springer, N.M., Kliebenstein, D.J. (2015): Reassess the t Test: Interact with All Your Data via ANOVA. *The Plant Cell* 27(8), 2088-2094.
- Brown, H.E., Huth, N., Holzworth, D. (2011): A potato model built using the APSIM Plant.NET Framework. Perth, Australien: 19. Internationaler Kongress der Modellierung und Simulation, 961-967.
- Brown, H.E., Huth, N.I., Holzworth, D.P. (2019): The APSIM Potato Model. <http://apsimdev.apsim.info/ApsimxFiles/Potato4403.pdf> (4. Jänner 2020).
- Eck, C., Garcke, H., Knabner, P. (2011): *Mathematische Modellierung*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Eberhard, J. (2000): *Konzepte zur umweltschonenden Steuerung der N-Düngung über Tropfbewässerung am Beispiel der Tomate (Lycopersicon esculentum M.)*. München: Herbert Utz Verlag.
- Europlant (2012): *Sortenblatt Jelly*. <https://www.europlant.biz/sortiment/jelly/> (14. Oktober 2019).
- Europlant (2020): *Ditta Sortenbeschreibung*. <https://www.europlant.biz/sortensuche-ergebnis/pdf/ditta/> (11. November 2020).
- Fink, J. (1955): *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt: Beiträge zur Pleistozänforschung in Österreich. Exkursionen zwischen Salzach und March Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt. Abschnitt-Marchfeld-March. Sonderheft D, 88-116*. Geologische Bundesanstalt Wien: Selbstverlag.

- Goyal, M. R. (2015): Management, Performance, and Applications of Micro Irrigation Systems. Research Advances in Sustainable Micro Irrigation 4. Oakville: Apple Academic Press Inc.
- Haase, T., Schulz, H., Kölsch, E., Hess, J. (2014): Prüfung von Kartoffelsorten auf deren besondere Eignung für den Ökologischen Landbau. Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft. Bonn: Selbstverlag.
- Harlfinger, O. (1999): Die klimatischen Eigenschaften Niederösterreichs mit besonderer Berücksichtigung des Pannonikums. Arbeitstagung Geologische Bundesanstalt 1999,106-110. Retz: Selbstverlag.
- Haverkort, A.J., Franke, A.C., Steyn, J.M., Pronk, A.A., Caldiz, D.O., Kooman, P.L. (2015): A Robust Potato Model: LINTUL-POTATO-DSS. Potato Research 58, 313-327.
- Haverkort, A., Uenk, D., Veroude, H., van de Waart, M. (1991): Relationship between ground cover, intercepted solar radiation, leaf area index and infrared reflectance of potato crops. Potato Research 34, 113-121.
- Jamieson, P.D., Zyskowski, R.F., Sinton, S.M., Brown, H.E., Butler, R.C. (2006): The potato calculator: a tool for scheduling nitrogen fertilizer applications. Agronomy New Zealand 36, 39-53.
- Jiayang, 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. (2017): Brief history of agricultural systems modeling. Agricultural Systems 155, 240–254.
- Julius Kühn-Institut (2008): Voraufzucht der Kartoffel auf quantitative Phytophthora-Resistenz im ILK Groß Lüsewitz in der Ressortforschung des BMELV - Stand der Forschung und Züchtung. Quedlingburg: Selbstverlag.
- Kolbe, H. (1995): Einflussfaktoren auf Ertrag und Inhaltsstoffe der Kartoffel. Leipzig: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Kooman, P.L., Haverkort, A.J., (1995): Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: Haverkort, A.J., MacKerron, D.K.L. (Eds.), Potato Ecology and Modelling Crops Under Conditions Limiting Growth. Kluwer Academic Publisher 3, 41–59.
- Kupke, S., Demmel, M., Blumental, B., Marx, M., Brandhuber, R., Müller, M. (2016). Tropfbewässerung im Kartoffelbau. Freising-Tüntenhausen: LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Landwirtschaftskammer Niederösterreich (2018): Stolbur in Erdäpfel erneut großes Thema. <https://noe.lko.at/stolbur-in-erd%C3%A4pfel-ist-heuer-erneut-gro%C3%9Fes-thema+2500+2786472> (11. September 2019).
- Leibundgut, C., Vonderstrass, I. (2016). Traditionelle Bewässerung - ein Kulturerbe Europas. 1. Auflage. Langenthal: Merkur Druck AG.

- MackKerron, D.K.L. (2008): Advances in modelling the potato crop: sufficiency and accuracy considering uses and users, data, and errors. *Potato Research* 51 (3), 411–427.
- Mechtler, K. (2002): Einflussnahme auf die Sortierung der Ernteware bei Kartoffel, 281-284. Klosterneuburg: ALVA - Arbeitsgemeinschaft landwirtschaftlicher Versuchsanstalten, Jahrestagung 2002 in Klosterneuburg.
- Möller, K. (2002): Wie können Erträge im ökologischen Landbau gesichert werden? *Ökologie & Landbau* 123, 34-38.
- Nitsch, A. (2020): *Praxishandbuch Kartoffelbau*. Clenze: Erling Verlag.
- 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.
- Pasqualotto, N., Delegido, J., Van Wittenberghe, S., Rinaldi, M., Moreno, J. (2019): Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). *Sensors* 2019, 19, 904.
- Pfleger, I., Rößler, U. (2009): Langjährige Ergebnisse bei der Bewässerung von Kartoffeln. <https://docplayer.org/39550250-Langjaehrige-ergebnisse-bei-der-bewaesserung-von-kartoffeln.html> (19. Oktober 2020).
- Region Marchfeld (s.a.): Region Marchfeld. <https://www.regionmarchfeld.at/region-marchfeld/> (16. September 2019).
- Schwedt, G., Vogt, C. (2010): *Analytische Trennmethode*. 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Soltani, A. u. (2007): Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research* 103, 198-207.
- Soltani, A., Sinclair, T.R. (2015): A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency - Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research* 175, 37-46.
- ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie (s.a.): Klimamonitoring. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/?station=1920¶m=t&period=period-ynd-2019-10-22&ref=3> (18. Oktober 2019).

9 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Vereinfachte Darstellung eines APSIM-Pflanzenwachstumsmodells (<https://www.apsim.info/apsim-model/>). S.14
- Abbildung 2:** Lage des Versuchsstandortes in Oberhausen. S.23
- Abbildung 3:** Lage des Versuchsstandortes in Zwettl. S.24
- Abbildung 4:** Versuchsdesign am Beispiel der Kartoffelsorte „Jelly“ des Standortes Oberhausen mit zwei Bewässerungsstufen; gelb: nicht bewässerte Parzellen; blau: bewässerte Parzellen. S.26
- Abbildung 5:** Versuchsdesign des Standortes Zwettl mit einer ungedüngten Variante (braun) und einer gedüngten Variante (grün) zu je drei Wiederholungen. S.28
- Abbildung 6:** Bodenprofil am Versuchsstandort Oberhausen (Bodenkarte, s.a.). S.36
- Abbildung 7:** Bodenprofil am Versuchsstandort Zwettl (Bodenkarte, s.a.). S.37
- Abbildung 8:** Mittlere monatliche Temperatur (°C) und Niederschlagsverteilung (Mittelwerte der Monate in mm) von März bis Oktober 2018 im Vergleich zu 30-jährigen Mittelwerten des Standortes Oberhausen (ZAMG, 2019). S.46
- Abbildung 9:** Temperaturverlauf (Mittelwerte der Monate in Grad Celsius) und Niederschlagsverteilung (Mittelwerte der Monate in mm) von März bis Oktober 2018 im Vergleich zu 30-jährigen Mittelwerten des Standortes Zwettl (ZAMG, 2019). S.47
- Abbildung 10:** Blattanzahl am Hauptstängel im Zeitverlauf an den Standorten Oberhausen (links) und Zwettl (rechts). S.51
- Abbildung 11:** Unterschiede des Blattflächenindex (LAI) in den beiden Sorten Jelly und Innovator und in ihren Behandlungen (bewässert, unbewässert) am Standort Oberhausen. S.52
- Abbildung 12:** Unterschiede der getrockneten, oberirdischen Biomasse in den beiden Sorten Jelly und Innovator und in ihren Behandlungen (bewässert, unbewässert) am Standort Oberhausen und am Standort Zwettl. S.53
- Abbildung 13:** Vergleich der Knollenerträge an den Standorten Oberhausen (links) und Zwettl (rechts) und anhand ihrer Behandlung. S.55
- Abbildung 14:** Vergleich des Verlaufes der Gesamtstickstoffaufnahme an den Standorten Oberhausen (links) und Zwettl (rechts) in g m^{-2} . S.55
- Abbildung 15:** Stickstoffgehalte der Knollen zum Erntezeitpunkt in Oberhausen (19.09.) und in Zwettl (13.08.). S.56
- Abbildung 17:** Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der oberirdischen Biomasse in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante. S.59
- Abbildung 18:** Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der oberirdischen Biomasse zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten in den Sorten Jelly und Innovator. S.60
- Abbildung 19:** Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Blatt- und Stängelbiomassen in der gedüngten (106kg) und in der ungedüngten Variante. S.61

Abbildung 20: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der Knollenfrischmasse in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante. S.62

Abbildung 21: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der Knollenfrischmasse zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten in den Sorten Jelly und Innovator. S.63

Abbildung 22: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse der gesamten Stickstoffaufnahme in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante. S.64

Abbildung 23: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse des Stickstoffgehaltes in der oberirdischen Biomasse in der gedüngten (106kg) und ungedüngten Variante. S.65

Abbildung 24: Simulierte (Kurven) und gemessene (Punkte) Ergebnisse des Stickstoffgehaltes der Kartoffelknollen in der gedüngten (106kg) und in der ungedüngten Variante. S.66

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklungsphasen und Entwicklungsstadien für die Simulation der Kartoffelpflanzen im APSIM Potato-Model.	S.17
Tabelle 2: Sortenbeschreibung der Kartoffelsorten „Ditta“, „Jelly“, und „Innovator“ (vgl. Europlant 2020, StMELF Bayern 2019).	S.31
Tabelle 3: Kulturführungsmaßnahmen am Standort Oberhausen.	S.32
Tabelle 4: Kulturführungsmaßnahmen am Standort Zwettl.	S.33
Tabelle 5: Ermittelte Bodenwerte und Unterteilung in Bodenhorizonte während der Bodenprobenahme (* nachgereichter Wert aus privater Bodenuntersuchung des Landwirts).	S.34
Tabelle 6: Auflistung der Phänologie und der Biomasseerhebung in Oberhausen.	S.40
Tabelle 7: Auflistung der Phänologie und der Biomasseerhebung in Zwettl. (* zu diesem Zeitpunkt wurde bereits das Krautabtötungs-Mittel „Reglone“ angewendet.)	S.40
Tabelle 8: Unterteilung der Pflanzenorgane im Labor.	S.41
Tabelle 9: Auflistung der Bodeninputparameter der beiden Sorten Jelly (KJ) und Innovator (KI) am Standort Oberhausen zu Vegetationsbeginn (25.04.) und Vegetationsende (19.09.): Gesamter, organischer Kohlenstoff (TOC) [%], Bodenstickstoff (Nmin) [kg ha ⁻¹].	S.49
Tabelle 10: Vergleich der Phänologie zum Zeitpunkt der Probenentnahmen in Tagen nach dem Legen (DAP) zwischen der ungedüngten (N0) und gedüngten (N) Variante.	S.50
Tabelle 11: Ermittelte Bodenwerte und Unterteilung in Bodenhorizonte während der Bodenprobenahme (* nachgereichter Wert aus privater Bodenuntersuchung des Landwirts).	S.57
Tabelle 12: Simulierte und gemessene Ergebnisse der Phänologie aller Düngungsvarianten in Tagen nach dem Legen (DAP).	S.58