

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Folgenabschätzung im Pflanzenschutz¹⁾
Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinessen-Nahe-Hunsrück, Abteilung Agrarwirtschaft²⁾

SIMONTO – ein neues Ontogenesemodell für Wintergetreide und Winterraps

SIMONTO – a new model for the simulation of the ontogenetic development of winter cereals und winter rape

Dietmar Roßberg¹⁾, Erich Jörg²⁾ und Kristina Falke²⁾

Zusammenfassung

Ziel eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes war es, bekannte und zum Teil bewährte Modellansätze zur Abbildung der Ontogenese einzelner Wintergetreidearten in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen weiterzuentwickeln, auf andere Fruchtarten auszudehnen und auf der Grundlage eines umfangreichen, in den Pflanzenschutzdiensten vorliegenden Datenfonds zur Ontogenese der einzelnen Getreidearten und von Raps verbesserte bzw. neue Ontogenesemodelle für diese Kulturarten zu erarbeiten.

So wurden ca. 8000 historische Datenreihen zu Ontogeneseverläufen mit Hilfe des Amtlichen Pflanzenschutzdienstes deutschlandweit zusammengestellt. Diese Daten stammen aus Pflanzenschutz-, Sorten- und Düngungsversuchen. Die durchschnittliche Anzahl der BBCH-Stadien pro Datenreihe reichte von ca. 8 Stadien bei Wintertriticale bis hin zu ca. 10 Stadien beim Winterraps. Zusätzlich erfolgten detaillierte Versuche und Erhebungen, um den Einfluss von Sorten auf die Getreideentwicklung abzuklären. Es zeigte sich, dass dieser marginal und damit im Modell vernachlässigbar war.

Um die Abbildungsgüte der vorhandenen und der zu erarbeitenden Modelle vergleichen zu können, war es nötig, dafür ein konkretes Maß zu definieren. In diese Definition ist die Überlegung eingeflossen, dass ein Ontogenesemodell, welches für praxisnahe Beratungsleistungen eingesetzt werden soll, bestimmte praxisrelevante Entwicklungsabschnitte einer landwirtschaftlichen Kultur sehr präzise, d. h. mit möglichst geringer zeitlicher Abweichung zwischen simulierten und tatsächlich festgestellten BBCH-Stadien, vorhersagen muss. Folgerichtig werden die zeitlichen Abweichungen zwischen Beobachtungstermin (Bonitur) und Modellergebnis bewertet, je nach Bedeutung des BBCH-Stadiums unterschiedlich gewichtet und die für die betrachteten Datensätze sich ergebenden Fehlerpunktsummen berechnet.

Für die Erarbeitung der neuen fruchtartspezifischen Ontogenesemodelle (SIMONTO) wurden zunächst die Ideen und Methodiken der Modelle ONTO und CERES-WHEAT erschlossen und auf deren Basis vier Arbeitsmodelle erstellt. Die Parameterschätzung für die Arbeitsmodelle (SIMONTO1 bis SIMONTO4) erfolgte mit Hilfe der MONTE-CARLO-Methode.

Die Auswertung (Vergleich der Abbildungsgüte) zeigte, dass für alle Fruchtarten der Modellansatz SIMONTO2 die besten Simulationsergebnisse lieferte. Dieses Modell wird (mit fruchtartspezifischen Parametersätzen) somit in Zukunft für die Abbildung der Ontogenese in Wintergetreide und Winterraps direkt genutzt und auch in schaderregerspezifische Entscheidungshilfen aus dem Programmpaket PASO eingebunden werden.

Stichwörter: Wintergetreide, Winterraps, Ontogenese, Simulation, Modelle, Entwicklungsstadien, Sorteneinfluss

Abstract

During a project funded by German Environmental Foundation (DBU) well established model approaches and models already used in practice for the simulation of ontogenetic development of crops were analysed thoroughly. The project aimed at the improvement of existing models or the elaboration of new simulation models and on their expansion from winter wheat resp. winter barley to other winter cereals and winter rape. The data base was provided by German governmental crop protection services and further governmental institutions. About 8000 data sets on ontogenetic development originating from crop protection, cultivar or fertilisation trials were allocated. In the average a data set consisted of a series of 8 BBCH-stages for winter triticale to about 10 BBCH-stages for winter rape. In addition detailed assessments were made in special trials to investigate the cultivar influence on ontogenetic development of the crops. It could be shown that differences in the development of different cultivars of the same cereal species or winter rape were marginal and thus could be neglected during model construction.

In order to facilitate the comparison of the precision of the simulations by the existing models and the models under construction a parameter has been defined. This parameter takes into account that some crucial developmental stages of the crops have to be forecasted with higher precision, i.e. very short time spans between simulated and observed occurrence, than other, less important stages. According to the importance of the stages the time differences (in days) between simulated and observed dates were weighed. "Sums of points" were calculated to judge the performance of the various ontogenetic models.

Scientific backgrounds and underlying functions of the ONTO- and CERES-WHEAT-models were analysed. Four work-models were constructed (SIMONTO1–SIMONTO4) which combined ONTO- and CERES-WHEAT-approaches. Parameter estimates for the SIMONTO-models were done by employing the MONTE-CARLO method. Analyses of the SIMONTO-simulations revealed that SIMONTO2 gave best results. SIMONTO2 reflects the influence of vernalisation on crop development during a period starting at BBCH-stage 10 and ending at BBCH-stage 30. The model combines the effect of some developmental rates in a multiplicative way.

In future SIMONTO2 (now named: SIMONTO) will be employed for the simulation of ontogenetic development of winter

cereals and winter rape crops. In addition SIMONTO will be included into decision support systems which aid the control of pests and fungal diseases of the crops under investigation. SIMONTO will be made available for governmental crop protection services via the comprehensive PASO-software package.

Key words: Winter cereals, winter rape, ontogenetic development, simulation, models, growth stage assessments, cultivar influence

1 Einleitung

In der gegenwärtigen Zeit werden bereits viele rechnergestützte Entscheidungshilfen für die Beratung der Landwirte genutzt. Insbesondere gilt dies für den Bereich Pflanzenschutz (KLEINHENZ und JÖRG, 1998). Hier wurde sogar eine Ländervereinbarung zur Gründung einer Einrichtung (ZEPP) geschlossen, die für die zentrale Verwaltung, Bereitstellung, Pflege und Weiterentwicklung solcher Schaderregersimulationsprogramme und Expertensysteme verantwortlich ist. Es zeigte sich aber schon in den Anfängen der Nutzung der Entscheidungshilfen, dass es sehr hilfreich ist, wenn daneben Modelle zur Verfügung stehen, die die Entwicklung (Ontogenese) der jeweiligen Kulturpflanzenart abbilden, da oftmals die Schaderregerentwicklung bzw. die Schaderregerbekämpfung auch wesentlich von der Bestandesentwicklung (BBCH-Stadium) abhängt.

In der Bundesrepublik Deutschland verfügen die amtlichen Pflanzenschutzdienste seit 1997 über das Programm ONTO (CLAUS et al., 1992; WERNECKE und CLAUS, 1992, 1996; ROSSBERG und WERNECKE, 1997), das die Ontogenese des Winterweizens und der Wintergerste mit akzeptabler Genauigkeit nachbildet. Daneben sind die Modelle AGROSIM (MIRSCHER et al., 1993 a, b; MIRSCHER et al., 1995; POMMERENING et al., 1993), WHEGROSIM (ROSSI et al., 1997) und CERES-WHEAT (RITCHIE, 1988; HOFFMANN, 1993) bekannt. Eine praktische Nutzung der letztgenannten Modelle erfolgte bisher nicht.

Die Zielstellung eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes bestand deshalb darin, die bekannten und z. T. bewährten Modellansätze weiterzuentwickeln, auf andere Fruchtarten auszudehnen und auf der Grundlage eines umfangreichen in den Pflanzenschutzdiensten vorliegenden Datenfonds zur Ontogenese der einzelnen Getreidearten und von Raps ein jeweils spezielles Ontogenesemodell für diese Kulturarten zu erarbeiten. Die neu zu erstellenden Modelle mussten im Wesentlichen drei Voraussetzungen erfüllen. Zum Ersten sollten sie eine bessere, mindestens jedoch dieselbe Abbildungsgüte der Onto-

genese besitzen wie die bisher genutzten ONTO-Modelle (ROSSBERG und WERNECKE, 1997). Zum Zweiten sollten die neuen Modelle nur wenige, einfach zu messende und auf breiter Basis verfügbare Wetterparameter als Eingangsgrößen nutzen. Schließlich sollten die Modelle einfach zu handhaben sein und weitgehend automatisiert betrieben werden können.

Der Nutzen der Modelle besteht hauptsächlich in der Reduktion des Aufwandes für Felderhebungen. Es können Beginn und Ende von Erhebungszeiträumen exakter festgelegt sowie auch optimale Entscheidungs- bzw. Bekämpfungstermine berechnet und empfohlen werden. Durch Ontogenesemodelle können auch Schaderregermodelle gesteuert werden. So kann zum Beispiel die Nutzung des Halmbrech-Prognose-Modells SIMCERC optimiert werden, indem das wichtige 2-Knoten-Stadium (BBCH 32) exakter bestimmt wird (KLEINHENZ und JÖRG, 1998). Unabhängig von den Schaderregermodellen kann auch der Einsatz von Pflanzenschutz- oder Düngemitteln besser terminiert und deren Wirkungsgrade optimal genutzt werden.

Die Arbeitsschwerpunkte des Projektes waren im Einzelnen:

- Akquirierung bzw. Nachprogrammierung verfügbarer Ontogenesemodelle und die Erstellung von „Arbeitsmodellen“
- Prüfung der Möglichkeiten einer Modellvereinfachung vor dem Hintergrund verfügbarer Eingangsgrößen und -parameter (in der Regel Wetterparameter)
- Aufbau einer umfassenden Datenbank mit Ontogeneseverläufen basierend auf historischen Daten aus Pflanzenschutz-, Sorten- und Düngungsversuchen der Offizialberatung
- Anlage von einfachen Versuchen zur detaillierten Erfassung der Entwicklungsverläufe verschiedener Sorten einer Kulturart beziehungsweise intensive und häufige Bonitur der Entwicklungsverläufe in Sortenversuchen und ggf. Aufnahme von Sortenparametern in die Ontogenesemodelle
- Übertragung von bewährten Modellansätzen auf weitere Kulturen (z. B. von Winterweizen auf andere Wintergetreidearten und Winterraps)
- Flächendeckende Validierung der verbesserten bzw. neu erstellten Ontogenesemodelle

Endziel ist die Integration der im Projekt entwickelten Ontogenesemodelle in das Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP). Mittels dieses internetbasierten Beratungsinstrumentes sollen die Ergebnisse der Ontogenesemodelle sowohl direkt als auch verarbeitet durch schaderregerbezogene Entscheidungshilfen der Praxis zur Verfügung gestellt werden.

Tab. 1. Struktur der Datenbank für die Ontogeneseverläufe zur Modellentwicklung und -validierung (Beispiel aus Rheinland-Pfalz; Triticale, 2000)

Kulturart	Erntejahr	Szenario	Satz_NR	Code	Inhalt1	Inhalt2
Triticale	2000	101	1	Versuchsort	Rhl.-Pfalz	Wittlich
Triticale	2000	101	2	Sorte		
Triticale	2000	101	3	Wetterstation	Wittlich	paso_wil.900
Triticale	2000	101	4	geogr. Koordinaten	49,97	
Triticale	2000	101	5	Bonitur	24.09.99	0
Triticale	2000	101	6	Bonitur	07.10.99	11
Triticale	2000	101	7	Bonitur	22.03.00	25
Triticale	2000	101	8	Bonitur	05.04.00	31
Triticale	2000	101	9	Bonitur	07.04.00	32
Triticale	2000	101	10	Bonitur	19.04.00	32
Triticale	2000	101	11	Bonitur	11.05.00	51
Triticale	2000	101	12	Bonitur	18.05.00	59
Triticale	2000	101	13	Bonitur	06.06.00	69
Triticale	2000	101	14	Bonitur	28.06.00	83
Triticale	2000	101	15			

2 Material und Methoden

Daten

Die ontogenetische Entwicklung des Getreides wird durch die BBCH-Skala charakterisiert (WITZENBERGER et al., 1989; LANCASHIRE et al. 1991; HACK et al., 1992), einer Weiterentwicklung des von ZADOKS et al. (1974) veröffentlichten Dezimalcodes. Für unsere Untersuchungen wurden historische Daten deutschlandweit zusammengestellt. Das Erfassen der Daten erwies sich als sehr zeitintensiv. Hilfreich waren die große Kooperationsbereitschaft und das Entgegenkommen der zuständigen Mitarbeiter der Pflanzenschutzdienste.

Zur Modellentwicklung und -validierung wurde eine feste Datenstruktur definiert, welche in Tabelle 1 dargestellt ist. Folgende Informationen wurden in den komplexen Dateien erfasst: Versuchsstandort, Aussaattermin, Sorte (falls verfügbar) und bonitierte BBCH-Stadien mit Datum. Außerdem wurden den erfassten Boniturdaten die benötigten Wetterdaten (stündliche Temperaturwerte; Quelle: DWD oder agrarmeteorologische Messnetze der Bundesländer) und die geografische Breite zur Berechnung von Tageslängen (Photoperiode) zugeordnet.

Die vorliegenden Daten stammen aus Pflanzenschutz-, Sorten- und Düngungsversuchen der Jahre 1992 bis 2002. Die Anzahl der in der Datenbank erfassten Datenreihen und die durchschnittliche Anzahl der BBCH-Stadien pro Datenreihe ist in Tabelle 2 dargestellt. Ergänzend sind die am häufigsten bonitierten BBCH-Stadien aufgeführt.

Die geografische Verteilung der Daten ist relativ gleichmäßig und aus den meisten Bundesländern ist eine umfangreiche Datenmenge vorhanden. Als generell unterrepräsentiert müssen allerdings die Bundesländer Hessen, Nordrhein-Westfalen und das Saarland gelten. Insgesamt wurden ca. 8000 Datenreihen im Rahmen des Projektes erfasst. Sie wurden mittels einiger Hilfsprogramme auf Plausibilität und Integrität geprüft und ggf. korrigiert bzw. verworfen. Außerdem erfolgte ein Test, ob die zugehörigen Wetterdaten vollständig bereitgestellt werden konnten.

Zusätzlich wurden ab Herbst 2001 intensive Bonituren in speziell angelegten Sortenversuchen durchgeführt. Ziel war es, den Einfluss der aktuellen Sorten auf die ontogenetische Entwicklung der verschiedenen Kulturarten zu untersuchen.

Modellbildung

Bevor die Arbeit mit den komplexen Simulationsmodellen aufgenommen wurde, galt es zunächst zu prüfen, ob nicht auch einfache Temperatursummenmodelle in der Lage sind, die Ontogenese (am Beispiel der Kultur Winterweizen) in gewünschter Genauigkeit nachzubilden. Hierzu wurden Temperatursummenmodelle mit Basistemperaturen von 2 bis 7 °C gebildet.

Weiterhin wurden die Ideen und Methodiken der Modelle von WERNECKE (ONTO) und RITCHIE (CERES-WHEAT) erschlossen und daraus vier neue Arbeitsmodelle (SIMONTO) synthetisiert. Alle abgebildeten Prozesse wurden so programmiert, dass die verwendeten Funktionen voll parametrisierbar gehalten wurden,

um so später eine optimale und fruchtartspezifische Anpassung an die vorhandenen Boniturdaten zu erreichen. Die entsprechende Parameterschätzung erfolgte mit dem MONTE-CARLO-Verfahren, d. h. für jede einzelne Simulation wurde jeder einzelne Modellparameter zwischen vorgegebenen Grenzen zufällig bestimmt, mit dieser Parameterkombination alle notwendigen Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse mit den für die Parametrisierung genutzten Boniturdaten verglichen und die für den Parametersatz gültige Fehlerpunktsumme (siehe unten) bestimmt. Für jedes SIMONTO-Modell wurde diese Prozedur pro Kulturart 1.000.000 Mal wiederholt (Ausnahme: für Winterweizen als Pilotprojekt wurden 2.000.000 Berechnungen durchgeführt).

Wie bei jeder Modellentwicklung wurde ein Teil der Boniturdaten zur Schätzung der Modellparameter genutzt; der andere Teil wird für die (von der Modellerstellung unabhängige) Modellvalidierung eingesetzt. Da im vorliegenden Fall die neu zu erstellenden Modelle mit den ONTO-Modellen von WERNECKE verglichen werden sollten, wurden für Winterweizen und Wintergerste dieselben Datensätze für die Parameterschätzung genutzt, die bereits WERNECKE (ROSSBERG und WERNECKE, 1997) für seine Parameterschätzung zur Verfügung gestanden haben. Alle übrigen Daten für diese beiden Kulturarten dienten der Modellvalidierung. Im Falle von Winterroggen, Wintertriticale und Winterraps erfolgte eine Zweiteilung der Datenmenge. Dabei wurde darauf geachtet, dass in beiden Datenmengen die zeitliche und regionale Verteilung der Daten sich so stark wie möglich ähnelten.

Modellbewertung

Um die Modelleleistungen vergleichen zu können, war es nötig ein Maß für die Abbildungsgüte zu definieren. Dies führte zu folgenden Überlegungen:

Es ist offensichtlich, dass ein Ontogenesemodell, welches für praxisnahe Beratungsleistungen eingesetzt werden soll, bestimmte praxisrelevante Entwicklungsabschnitte einer landwirtschaftlichen Kultur sehr präzise, d. h. mit möglichst geringer zeitlicher Abweichung zwischen simulierten und tatsächlich festgestellten BBCH-Stadien, vorhersagen muss. Für andere, in der Praxis kaum relevante BBCH-Stadien, können dagegen größere Abweichungen zwischen Modellergebnis und Bonitur toleriert werden. Aus diesem Grund wurde für die Bewertung der Abbildungsgenauigkeit der Simulationsmodelle ein gesonderter Gütekriterien-Katalog definiert. Dabei wurden für alle untersuchten Fruchtarten die Stadien in 3 Gruppen verschiedener Relevanz eingeteilt:

- Gruppe 3: besonders wichtig (Gruppenfaktor = 3)
- Gruppe 2: sehr wichtig (Gruppenfaktor = 2)
- Gruppe 1: wichtig (Gruppenfaktor = 1).

Die kulturspezifische Zuordnung der BBCH-Stadien zu den Gruppen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Als „besonders wichtig“ und „sehr wichtig“ wurden solche BBCH-Stadien bewertet, zu denen in den jeweiligen Kulturarten vorrangig Felderhebungen, Dünge- oder Pflanzenschutzmaß-

Tab. 2. Anzahl der in den Datenbanken erfassten Datenreihen

Kultur	Anzahl der Datenreihen	Ø Anzahl der BBCH-Stadien pro Datenreihe	Am häufigsten bonitierte BBCH-Stadien
Winterweizen	2653	9,4	37, 31, 32, 49 und 61
Winterroggen	835	8,5	25, 51, 29, 31, 32 und 37
Wintergerste	1674	8,7	30, 31 und 49
Wintertriticale	938	7,8	25, 13, 31, 32 und 49
Winterraps	1850	9,8	61, 30, 51 und 10

Tab. 3. Gruppierung der Entwicklungsstadien (siehe Text)

a) Winterweizen	
Gruppe 3:	BBCH-Stadien 10, 25, 31, 32, 39, 61 und 65
Gruppe 2:	BBCH-Stadien 21, 51 und 59
Gruppe 1:	BBCH-Stadien 13, 23, 30, 33, 37, 49, 55 und 69
b) Wintergerste	
Gruppe 3:	BBCH-Stadien 10, 13, 25, 31, 39 und 61
Gruppe 2:	BBCH-Stadien 37, 49 und 51
Gruppe 1:	BBCH-Stadien 21, 23, 30, 32 und 59
c) Winterroggen	
Gruppe 3:	BBCH-Stadien 10, 13, 25, 32, 39 und 59
Gruppe 2:	BBCH-Stadien 37, 49 und 51
Gruppe 1:	BBCH-Stadien 21, 23, 30, 32 und 59
d) Wintertriticale	
Gruppe 3:	BBCH-Stadien 10, 13, 25, 31, 32, 39 und 61
Gruppe 2:	BBCH-Stadien 37, 49 und 51
Gruppe 1:	BBCH-Stadien 11, 21, 30 und 59
e) Wintertraps	
Gruppe 3:	BBCH-Stadien 10, 14, 16, 30, 51, 61, 65 und 69
Gruppe 2:	BBCH-Stadien 18 und 19
Gruppe 1:	BBCH-Stadien 11, 12, 13, 31, 32, 33, 39, 53, 59, 63, 67 und 71

Tab. 4. Vergabe von Fehlerpunkten

Simulierter Termin für BBCH-Stadium im Zeitraum:	Bewertung	Fehlerpunkte
Boniturtermin \pm 2 Tage	sehr gut	0
(Boniturtermin + 3 Tage) bis Boniturtermin + 6 Tage	ausreichend, Simulation zu langsam	1
(Boniturtermin - 3 Tage) bis Boniturtermin - 6 Tage	ausreichend, Simulation zu schnell	1
Außerhalb (Boniturtermin \pm 6 Tage)	unbefriedigend	3

Tab. 5. Kombination der Abbildungsprinzipien

Modell	Ratenverknüpfung	Zeitraum für Vernalisationseinfluss
SIMONTO 1	multiplikativ	nach BBCH 30
SIMONTO 2	multiplikativ	BBCH 10–BBCH 30
SIMONTO 3	Minimum	nach BBCH 30
SIMONTO 4	Minimum	BBCH 10–BBCH 30

nahmen durchgeführt werden bzw. die für Schaderregermodelle essentiell sind. „Wichtig“ sind BBCH-Stadien, die in den verfügbaren Datensätzen häufiger auftraten.

Für diese Stadien wird ein Vergleich zwischen Beobachtungstermin (Bonitur) und Modellergebnis durchgeführt und Terminabweichungen werden durch Fehlerpunkte bewertet (Tab. 4). Eine Abweichung von bis zu \pm 2 Tagen zwischen Modellergebnis und Bonitur gilt als optimal. Abweichungen von 3 bis 6 Tagen sind tolerierbar. Größere Abweichungen sind unbefriedigend. Die sich ergebenden Fehlerpunkte werden jeweils mit dem Gruppenfaktor multipliziert. Die Summe der so berechneten Werte (**Fehlerpunktsumme**) dient unmittelbar zur Einschätzung der Abbildungsgüte des betrachteten Modells. Je geringer die Fehlerpunktsumme ist, desto genauer bildet das Modell den Ontogeneseverlauf ab.

Beim Vergleich von Fehlerpunktsummen ist Folgendes zu beachten. Die absolute Höhe der Fehlerpunktsumme ist abhängig

von der Anzahl der zu schätzenden BBCH-Stadien und der Bewertung ihrer Relevanz (= Gruppenfaktor). Daher kann ein Modellvergleich auf der Basis der Fehlerpunktsumme immer nur fruchtartbezogen erfolgen, und für die Modellbewertung muss für alle Modelle derselbe Datensatz zugrunde liegen. Ein Vergleich beispielsweise über die Kulturarten hinweg oder auf der Basis unterschiedlicher Datensätze in der gleichen Kultur (z. B. verschiedene Jahre oder Regionen) ist nicht zulässig.

3 Ergebnisse

Temperatursummenmodelle, AGROSIM, WHEGROSIM

Es zeigte sich, dass die sechs, sehr einfachen Temperatursummenmodelle bei weitem nicht die Abbildungsgüte der bestehenden ONTO-Modelle erreichten und somit nicht geeignet waren, die vorgegebenen Zielstellungen zu erfüllen (Abb. 1).

Im Falle von AGROSIM wäre eine detaillierte Nachprogrammierung (selbst unter Einbeziehung des ursprünglichen Entwicklers) nur mit einem nicht zu rechtfertigenden Zeit- und Arbeitsaufwand möglich gewesen. Deshalb wurde in Absprache mit MIRSCHEL auch hierauf verzichtet. Eine stark simplifizierte AGROSIM-Version erbrachte unzureichende Ergebnisse (siehe Abb. 1).

Das auch als Vergleichsmodell vorgesehene WHEGROSIM konnte nicht in die Modellentwicklung einbezogen werden, da sich nach detailliertem Modellstudium herausstellte, dass dieses Modell nicht in der Lage ist, die Eintrittstermine für alle einzelnen BBCH-Stadien zu berechnen. Es liefert als Ergebnis lediglich die Termine für die Stadien 10, 20, 30, 50 und 61.

SIMONTO-Modelle, Grundlagen

Eine umfassende Auswertung der zur Verfügung stehenden Literatur und anderer Quellen zu den Modellen von WERNECKE (ONTO) und RITCHIE (CERES-WHEAT) ergab, dass sich die beiden Modellansätze stark ähneln. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass diese Modelle drei auf den Ontogenese-Fortschritt wirkende Einflussraten berechnen:

- eine Rate, die den Einfluss des Grades der Erfüllung des Vernalisationsbedürfnisses (Verlangsamung der Ontogenese)
- eine Rate, die den Temperatureinfluss und
- eine Rate, die den photoperiodischen Einfluss auf die Entwicklungsrate abbildet.

Bei ONTO werden diese Einzelraten multiplikativ verknüpft.

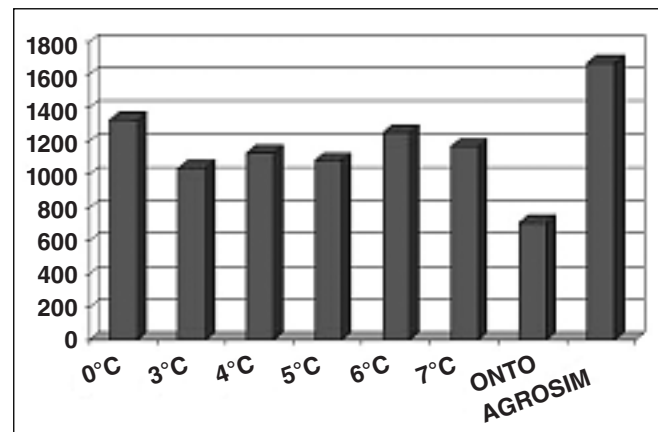


Abb. 1. Abbildungsgüte verschiedener einfacher Temperatursummenmodelle im Vergleich zu ONTO und AGROSIM-WW (Fehlerpunktsummen; Winterweizen-Datensätze aus Rheinland-Pfalz 1994 bis 1998).

Tab. 6a. Abbildungsgüte (Fehlerpunktsummen) der SIMONTO-Modelle (Basis: Boniturdatsatz für Parameterschätzung)

Modell	Winterweizen	Wintergerste	Winterroggen	Triticale	Raps
SIMONTO 1	1877	1842	3719	3711	16545
SIMONTO 2	1837	1431	3116	3428	12714
SIMONTO 3	2198	1949	3843	3967	16734
SIMONTO 4	2047	1544	3706	3778	14018
Anzahl Boniturreihen	213	195	374	401	832

Tab. 6b. Abbildungsgüte (Fehlerpunktsummen) der SIMONTO-Modelle (Basis: Boniturdatsatz für Modellvalidierung)

Modell	Winterweizen	Wintergerste	Winterroggen	Triticale	Raps
SIMONTO 1	22594	538	3920	4023	16377
SIMONTO 2	22391	302	3514	3776	12626
SIMONTO 3	27045	624	4152	4255	16661
SIMONTO 4	24498	373	3984	4174	13939
Anzahl Boniturreihen	2147	45	372	432	827

Bei CERES-WHEAT erfolgt die Verknüpfung nach dem Minimumprinzip. Außerdem unterscheiden sich die beiden Ansätze bzgl. des Zeitraumes, in dem die Erfüllung des Vernalisationsanspruches geprüft und bewertet wird. Bei ONTO werden diese Einflüsse erst nach BBCH 30 betrachtet; bei CERES-WHEAT dagegen bereits zwischen BBCH 10 und BBCH 30. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden vier Arbeitsmodelle („SIMONTO“; siehe Tab. 5) entwickelt, in denen diese unterschiedlichen Abbildungsprinzipien jeweils paarweise miteinander kombiniert wurden.

SIMONTO-Modelle, Struktur

Diese Modelle wurden anschließend für alle bearbeiteten Kulturarten umgesetzt. Die Entwicklung der Pflanzenbestände wird im Modell durch eine Zustandsvariable zwischen 0 (= AUSAAT = BBCH 0) und 1 (= BBCH 100) dargestellt. Da die BBCH-Stadien aber keineswegs linear definiert sind und sich in ihrer Ausprägung (z. B. Dauer; aber auch kulturartspezifisch) zum Teil extrem unterscheiden, erwies es sich zudem als notwendig eine „Übersetzungs-Funktion“ für die Beziehung zwischen dem berechneten Entwicklungszustand und dem erreichten BBCH-Stadium zu integrieren. Diese Funktion ist ein zentraler Bestandteil der Ontogenesemodelle, und ihre Parameter sind wechselseitig abhängig von denjenigen Parametern, welche zur Berechnung des modellinternen Entwicklungszustandes benutzt werden.

SIMONTO-Modelle, Abbildungsgüte

In den Tabellen 6a und 6b sind die erreichten Fehlerpunktsummen für alle SIMONTO-Varianten aufgelistet. Es zeigte sich, dass in allen Fällen mit dem Modell SIMONTO2 die beste Abbildungsgüte erzielt wurde. Deshalb wurde dieser Modellansatz

Tab. 7. Vergleich der Abbildungsgüte (Fehlerpunktsummen) von SIMONTO mit dem bisherigen Referenzmodell ONTO

	SIMONTO	ONTO
Winterweizen:		
Boniturdatsatz Parameterschätzung:	1837	2165
Boniturdatsatz Validierung:	22391	26718
Wintergerste:		
Boniturdatsatz Parameterschätzung:	1431	2770
Boniturdatsatz Validierung:	302	933

folgerichtig als das neue Modell SIMONTO für alle betrachteten Fruchtarten ausgewählt.

Beim Vergleich der Ergebnisse des neuen SIMONTO-Modells mit denen des bisherigen Referenzmodells ONTO für die Fruchtarten Winterweizen und Wintergerste ergab sich, dass die erreichten Fehlerpunktsummen auch unter denen von ONTO lagen (Tab. 7). Damit konnte das Ziel, für die genannten Fruchtarten ein Ontogenesemodell zu entwickeln, das eine Verbesserung gegenüber dem bisherigen Referenzmodell darstellt, erreicht werden.

Um die Abbildungsgüte von SIMONTO für die anderen Fruchtarten (Winterroggen, Wintertriticale, Winterraps) beurteilen zu können, kann wegen des Fehlens eines Referenzmodells nicht auf die Fehlerpunktsummen zurückgegriffen werden. Wir verwenden deshalb als (ein zweites) Maß den prozentualen Anteil von „unbefriedigenden“ Simulationsergebnissen (Tab. 8). Bei Winterroggen und Wintertriticale lässt sich im Vergleich zu Winterweizen und Wintergerste feststellen, dass der Anteil „unbefriedigender“ Ergebnisse etwa gleich groß ist und damit eine ähnlich gute Abbildungsgüte erzielt wird.

Zusammenfassend lässt sich daraus vergrößernd ableiten, dass SIMONTO bei allen Wintergetreidearten mindestens 70 % sehr gute bis akzeptable Simulationsergebnisse liefert. Das Winterrapsmodell bedarf allerdings noch stärkerer Verbesserungen, da der Anteil unbefriedigender Simulationsergebnisse ca. 40 % betrug.

Sortenfaktoren

Auf die Abbildung von Sorteneinflüssen, wie z. B. in CERES-WHEAT, wurde von vornherein verzichtet, weil die Ergebnisse der dazu angelegten Versuche eindeutig zeigten, dass die Entwicklung der verschiedenen Sorten im Wintergetreide bei gleichen Aussatterminen bis zum Ende der Schossphase gleich war. Ab dem Ährenschnellen waren teilweise Unterschiede von wenigen Tagen festzustellen (vgl. Abb. 2). Noch einheitlicher in ihrer Entwicklung zeigten sich die unterschiedlichen Winterrapsarten. Bis Blühbeginn waren keine bzw. extrem geringe Entwicklungsunterschiede festzustellen. Aus diesem Grund konnte auf eine Berücksichtigung von Sortenfaktoren verzichtet werden.

4 Diskussion

Die aufgezeigten Ergebnisse (Tab. 8) verdeutlichen, dass es gelungen ist, mit SIMONTO ein Simulationsmodell zu erarbeiten, das in der Lage ist, für alle Wintergetreidearten die ontogenetische Entwicklung der Pflanzen zufrieden stellend nachzubilden.

Tab. 8. Vergleich von simulierten und bonitierten Terminen (prozentuale Anteile in den Bewertungsgruppen)

Fruchtart	Parametersatz	zf	f	Bewertungsgruppen (zf bis zs)			unbefr.
				opt	s	zs	
Winterweizen	P	11,8	15,4	47,5	13,3	12,0	23,8
Winterweizen	V	6,7	7,6	46,2	19,4	20,1	26,8
Wintergerste	P	9,0	10,5	45,7	11,1	23,7	32,7
Wintergerste	V	4,7	8,5	53,8	22,6	10,4	15,1
Triticale	P	13,0	11,9	47,0	9,6	18,5	31,5
Triticale	V	15,2	11,1	45,4	11,8	16,5	31,7
Winterroggen	P	12,7	11,8	45,1	13,4	17,0	29,7
Winterroggen	V	13,0	12,1	41,1	14,5	19,3	32,3
Winterraps	P	19,9	14,7	34,8	6,8	23,8	43,7
Winterraps	V	20,2	14,9	34,7	7,0	23,2	43,4

P: Boniturdatsatz für Parameterschätzung
 V: Boniturdatsatz für Modellvalidierung
 zf: Simulation mehr als 6 Tage zu früh
 f: Simulation 3 bis 6 Tage zu früh

opt: Simulation und Bonitur übereinstimmend
 s: Simulation 3 bis 6 Tage zu spät
 zs: Simulation mehr als 6 Tage zu spät
 unbefr.: Simulation unbefriedigend (entweder zf oder zs)

Die geringen Unterschiede in der Abbildungsgüte beim Vergleich der für die Modellbildung (Parameterschätzung) genutzten und der davon unabhängigen, für die Modellvalidierung genutzten Datensätze zeigen, dass die Variabilität bei der Getreideentwicklung in Deutschland in ausreichender Weise durch das Modell dargestellt wird und in den Datensätzen in ähnlichem Maße vorhanden ist.

SIMONTO stellt eine Verbesserung gegenüber dem bisherigen Referenzmodell ONTO dar. Es benötigt nur wenige Inputwerte (Temperatur, geografische Breite), stellt somit auch eine Vereinfachung gegenüber CERES-WHEAT und ONTO dar und kann sofort praktisch genutzt werden. Damit sind die eingangs erwähnten Zielstellungen vollständig erfüllt.

Eine weitere Modellreduktion erscheint nicht möglich bzw. sinnvoll. Ein Beleg dafür lieferte die unbefriedigende Abbildungsgüte der Temperatursummenmodelle. Die Temperatur als einziger Einflussfaktor reicht offenbar nicht aus, um die ontogenetische Entwicklung des Getreides ausreichend zu beschreiben. Außerdem kann unter Bedingungen extremer Trockenheit wegen des Verzichts auf Bodenfeuchtwerte als Eingangsgröße sowohl die Auflaufphase als auch der Reifeprozess evtl. fehlerhaft simuliert werden. Schließlich ist die Abbildungsgüte für Winterraps noch nicht zufrieden stellend. In diesem Fall wird es sich even-

tuell als notwendig erweisen, das Modell mit zusätzlichen Einflussfaktoren bzw. internen Funktionen zu erweitern. Dafür sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

Generell liegen aber die Ursachen für die unter „unbefriedigend“ eingestuften Ergebnisse nicht allein im Modell selbst; sie sind auch ungenauen bzw. fehlerhaften Boniturdaten geschuldet. Unseren Einschätzungen nach dürften ca. 50% der unbefriedigenden Simulationen auf Ungenauigkeiten bei der Datenerhebung der Entwicklungsstadien zurückzuführen sein. Die sehr exakt durchgeführten Bonituren in den Versuchen zur Sortenabhängigkeit der Ontogenese haben ergeben, dass es oftmals nicht möglich ist, einen Anteil von 50% der Pflanzen einer Stichprobe dem gleichen Entwicklungsstadium zuzuordnen. Dies gilt aber als Kriterium für die Bestimmung des BBCH-Stadiums eines Bestandes (HACK et al., 1992). Diese Problematik wird in einer Folgeveröffentlichung noch sehr detailliert dargestellt und diskutiert werden. Andererseits erwarten wir, dass der Anteil „befriedigender“ Simulationsergebnisse bei der 2005/2006 vorgesehenen Erprobung des Modells aufgrund von mit höherer Sorgfalt durchgeführten Kontrollbonituren auf mindestens 80% anwächst.

Das neue SIMONTO-Modell wurde in das Programmpaket PASO integriert, das auch die bereits von der ZEPP bzw. den Pflanzenschutzdiensten erarbeiteten Schaderregermodelle beinhaltet.

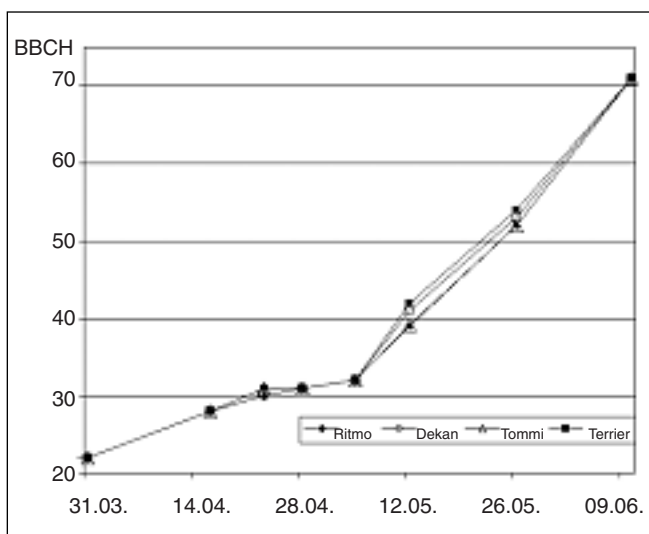


Abb. 2. Winterweizen-Sortenvergleich am Standort Bolanderhof 2002/2003 (Beispiel).

Danksagung

Wir möchten uns ausdrücklich bedanken bei

- folgenden Kolleginnen und Kollegen der Officialberatung:
 - Rheinland-Pfalz: Dr. ALBERT ANDERL, Dr. FRIEDHELM FRITSCH, WILHELM LÜKE, MICHAEL NEUMANN, STEFAN DEMAND, CHRISTOPH WIESNER, HORST HÄUSSLER
 - Mecklenburg-Vorpommern: Dr. THILO BUSCH, MARCUS HAHN, KARIN BERTEN
 - Niedersachsen: Dr. CAROLIN VON KRÖCHER, Dr. JOACHIM KAKAU
 - Brandenburg: MARGIT NAUJOK
 - Thüringen: KLAUS HELLER, OSWALD MALARSKI, RITA DEHNE, Dr. K. A. HAHN, Dr. UWE JENTZSCH
 - Sachsen: ANDELA THATE, Dr. MICHAEL KRAATZ
 - Sachsen-Anhalt: CHRISTIAN WOLFF, PETER MATTHES, MECHTHILD HÜBNER
 - Bayern: Dr. HELMUT TISCHNER, PETER EIBLMEIER
 - Nordrhein-Westfalen: FRITZ BRENDLER, Dr. JOACHIM HOLZ
 - Schleswig-Holstein: HENNING LINDENBERG

- Dr. UDO VON KRÖCHER, THOMAS DROBEK (BSA)
- CORNELIA BRAUN, BARBARA KEIL (ZEPP)
- RALF NEUKAMPF, KATHLEEN KRAMMER (BBA-FP)
- Dr. MANFRED RÖHRIG (ISIP e.V.)
- Prof. Dr. HENNING KAGE (Universität Kiel)
- LUDGER ALPMANN (DSV)
- MICHAEL RITZMANN, Kahlheckerhof, Winnweiler

Vor allem möchten wir uns jedoch bei den Herren Dr. WERNER WAHMHOF und Dr. HOLGER WURL (DBU) bedanken.

Literatur

- CLAUS, S., P. WERNECKE, H. MÜHLE, 1992: Ontogenese und Vernalisation von Winterweizen (Experimente und dynamisches Modell). In D. MÜLLER (Hrsg.): Fortschritte der Simulation in Medizin, Biologie und Ökologie (Informatik-Bericht 92/6), 153–161.
- HACK, H., H. BLEIHOLDER, L. BUHR, U. MEIER, U. SCHNOCK-FRICKE, E. WEBER, A. WITZENBERGER, 1992: Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. – Erweiterte BBCH – Skal, Allgemein-. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. **44** (12), 265–270.
- HOFFMANN, F., 1993: Die CERES-Modelle – Übersicht, Weiterentwicklungen, Erfahrungen. Agrarinformatik **24**, 139–150.
- KLEINHENZ, B., E. JÖRG, 1998: Integrierter Pflanzenschutz – Rechnergestützte Entscheidungshilfen. Reihe A: Angewandte Wissenschaft Heft 473, 168 S., Bonn.
- LANCASHIRE, P. D., H. BLEIHOLDER, T. VAN DEN BOOM, P. LANGELÜDDEKE, R. STAUSS, E. WEBER, A. WITZENBERGER, 1991: A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Ann. Appl. Biol. **119**, 561–601.
- MIRSCHHEL, W., A. SCHULTZ, J. POMMERENING, 1993a: Modellierung des Wachstums und der Ertragsbildung in komplexen Agroökosystemen, dargestellt am Beispiel Winterweizen und Winterroggen. Agrarinformatik **24**, 183–203.
- MIRSCHHEL, W., A. SCHULTZ, K.-O. WENKEL, 1993b: Vergleich der Winterweizenmodelle AGROSIM-Wheat und CERES-Wheat. Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft **5**, 29–34.
- MIRSCHHEL, W., K.-O. WENKEL, J. POMMERENING, 1995: Entwicklung einer Agroökosystem-Modellfamilie – ein Beitrag für betriebliche und regionale Entscheidungs- und Bewertungsmodelle. Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft **7**, 200–207.
- POMMERENING, J., W. MIRSCHHEL, K.-O. WENKEL, 1993: AGROSIM-WR – ein dynamisches Agroökosystemmodell für Winterroggen. Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft **5**, 139–143.
- RITCHIE, J. T., 1988: CERES Wheat. Book draft Michigan State University.
- ROSSBERG, D., P. WERNECKE, 1997: Weiterentwicklung des Simulationsmodells ONTO (Ontogenese Wintergetreide), bedingt durch seine Anwendung. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. **49** (9), 223–227.
- ROSSI, V., P. RACCA, S. GIOSUE, D. PANCALDI, I. ALBERTI, 1997: A simulation model for the development of brown rust epidemics on winter wheat. European Journal of Plant Pathology **103**, 453–465.
- WERNECKE, P., S. CLAUS, 1992: Extension and improvement of descriptive models for the ontogenesis of wheat plants. Modeling Geo-Biosphere Processes Vol. 1, 131–144; Cremlingen-Destedt, Catena Verlag.
- WERNECKE, P., S. CLAUS, 1996: Modelle der Ontogenese für die Kulturarten Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen. In: „Reaktionsverhalten von agrarischen Ökosystemen homogener Areale“, Hrsg.: H. MÜHLE und S. CLAUS, 105–120.
- WITZENBERGER, A., T. VAN DEN BOOM, H. HACK, 1989: Erläuterungen zum BBCH-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. Gesunde Pflanzen **41** (11), 384–388.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG, C. F. KONZAK, 1974: A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research **14**, 415–421.

Zur Veröffentlichung angenommen: 8. November 2004

Kontaktanschrift: Dr. Dietmar Rossberg, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Folgenabschätzung im Pflanzenschutz, Stahnsdorfer Damm 81, D-14532 Kleinmachnow