

Modellierung der Unkrautpopulationsdynamik (*Apera spica-venti*) als Entscheidungshilfe für die Herbizidapplikation bei teilschlagspezifischer Bewirtschaftung unter Berücksichtigung von Bodenparametern

Modelling of the population dynamics (*Apera spica-venti*) as a decision aid for the herbicide application within precision farming with respect to soil parameters

von Peter Vorpahl und Ronald Möws

Kurzfassung

*Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit der räumlichen Variabilität des Unkrautvorkommens und der Modellierung der Populationsdynamik des Gemeinen Windhalms (*Apera spica-venti*) beispielhaft für eine annuelle Unkrautart. Ziel war es, einen Bekämpfungsschwellenwert nach ökonomischen und ökologischen Kriterien zu ermitteln, ab dem ein Herbizid appliziert werden sollte. Der Lebenszyklus von *Apera spica-venti* wurde mit einem zellulären Automaten gekoppelt, um eine flächenhafte Simulation der Populationsentwicklung durchzuführen. Es wurden verschiedene Szenarien der teilschlagspezifischen Bewirtschaftung bei gleich bleibenden Kulturpflanzen aber unterschiedlichsten Bekämpfungsschwellenwerten über viele Jahre simuliert. Es stellte sich heraus, dass die im langjährigen Mittel zu applizierende Menge nur sehr gering vom gewählten Schwellenwert abhing. Dennoch ergaben sich mittlere Einsparpotentiale von bis zu 70 %. Es konnte allerdings ein Schwellenwert von ~45 Pflanzen pro Quadratmeter ermittelt werden, bei dem eine verringerte ökologische Belastung der Nutzfläche durch im Mittel weniger Jahre mit hoher Applikationsrate zu erwarten ist.*

Keywords: *Populationsdynamik, *Apera spica-venti*, Modellierung, Zellulärer Automat, Teilschlagspezifische Bewirtschaftung, Schwellenwert, Herbizidapplikation.*

Abstract

*The present article deals with the spatial abundance variability and the modelling of the population dynamics of *Apera spica-venti* representatively for an annual weed. The aim was to determine a threshold value for the number of seedlings at which herbicides should be applied. For the modelling of the spatial population dynamics the life cycle of *Apera spica-venti* has been combined with a cellular automat. Different scenarios with different threshold values for the herbicide application have been calculated over 300 years. The 100 years mean amount of herbicides that was applied has been compared against the mean abundance of mature herb plants. It became evident that the mean amount of herbicides did not vary very much with the change of the threshold value. Nevertheless a 100 years mean reduction potential of up to 70% could be estimated and a threshold value with a probably reduced ecological impact could be found at 45 plants per square meter.*

Keywords: *population dynamics, *Apera spica-venti*, modelling, cellular automat, precision farming, threshold value, herbicide application.*

Die moderne, konventionelle Landwirtschaft ist geprägt durch einen hohen Mechanisierungsgrad und den Einsatz von Düngern und Pflanzenschutzmitteln. Dies kann zu gesellschaftlichen Konflikten führen, in denen insbesondere ökologische, ökonomische und soziale Belange thematisiert werden. Hieraus entstand in der Vergangenheit die Forderung nach einer Agrarwende. Gefordert wurden Konzepte hin zu einer nachhaltigen Landwirtschaft (FLAKE, 2003). Daher wurde auch das 'Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz' entwickelt (BMVEL, 2004). Eine teilschlagspezifische Bewirtschaftung von Ackerflächen bietet die Möglichkeit der verstärkten Nutzung landwirtschaftlicher Flächen nach ökonomischen und ökologischen Kriterien.

1. Problemstellung

Das Bestreben, gegebene Ressourcen möglichst kostengünstig und nachhaltig zu nutzen, hat in der Landwirtschaft zunehmend Einzug gehalten, woraus zum Beispiel die an die Bodenvariabilität oder den Pflanzenbestand angepasste Düngung oder die an das Unkrautaufkommen angepasste Applikation von Herbiziden resultiert (NORDMEYER, 2006b und OEBEL, 2006). Sowohl aus ökologischen als auch ökonomischen Gesichtspunkten wird ein möglichst geringer Betriebsmittelaufwand angestrebt.

Um dieses Ziel zu erreichen bietet die teilflächenspezifische Bewirtschaftung von Ackerflächen verschiedene Möglichkeiten. Sie ermöglicht die Anpassung der Landwirtschaftsmaßnahmen an die kleinräumige Variabilität der Bestandes- und Standortparameter, indem diese z.B. mittels Sensoren erfasst, über ein Global Positioning System (GPS) ortskodiert werden (OEBEL, 2006) und bei der Durchführung ackerbaulicher Maßnahmen berücksichtigt werden.

Besonders die teilschlagspezifische Anwendung von Herbiziden bietet ein Einsparpotential (OEBEL, 2006). Für die Herbizidapplikation wurde ein schwellenwertbasierter Ansatz der Unkrautdichte verwendet. Dabei wird nur ab einer bestimmten Unkrautdichte auf einer Teilfläche ein Herbizid appliziert.

Aktuelle Ansätze zur Findung ökonomischer Schadensschwellenwerte in Abhängigkeit vom betrachteten Ackerunkraut, der angebauten Kulturpflanze und der Betriebsführung berücksichtigen sowohl den Lebenszyklus als auch die räumliche Populationsdynamik der Ackerunkräuter. Eine Zusammenfassung dieser Ansätze findet sich bei DICKE (2005).

2. Methode

Zur Optimierung eines Schadensschwellenwertes auch unter ökologischen Gesichtspunkten wird hier ein Modell eingesetzt, mit dessen Hilfe sich die Auswirkungen und Aufwendungen

verschiedener Herbizid-Applikations-Strategien auch unter Berücksichtigung von Bodenparametern vergleichen lassen.

Durch die Kopplung des populationsdynamischen Modells mit einem zellulären Automaten ist es möglich, sowohl eine heterogene Verteilung der Unkräuter als auch die Verteilung der Bodeneigenschaften in das Modell einzubeziehen (DUNKER et al., 2002).

Das hier vorgestellte Projekt basiert auf einem Langzeitversuch zur teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung, der von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) seit 1999 auf einer Fläche von insgesamt 70 ha auf der Domäne St. Ludgeri im Landkreis Helmstedt durchgeführt wird (NORDMEYER, 2006b). Ziel dieses Versuchs ist eine reduzierte Anwendung von Herbiziden im Rahmen einer GPS gestützten, teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung (NORDMEYER, 2006a) und die Erfassung möglicher Langzeitwirkungen (NORDMEYER, 2005).

Als Teil dieses Versuchs wurde im Rahmen eines Projektseminars des Instituts für Geoökologie der TU Braunschweig 2005 ein Modell zur Simulation der zeitlichen und räumlichen Variation des Unkrautauftommens des Gemeinen Windhalms (*Apera spica-venti*) erstellt, welches in der vorliegenden Arbeit weiterentwickelt wurde. Das Modell wurde anhand von manuell erhobenen Unkrautboniturdaten aus den Jahren 2001 bis 2006 auf Plausibilität überprüft und parametrisiert. Anschließend wurden unterschiedliche Herbizid-Applikations-Szenarien gerechnet, um anhand ökonomischer und ökologischer Kriterien einen optimierten Schwellenwert für die Herbizidapplikation zu ermitteln.

Der vorliegende Artikel ist die Weiterführung der Arbeit des Projektseminars im Studiengang 'Geoökologie' der Technischen Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig in Zusammenarbeit mit der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin und Braunschweig (BBA) unter der Leitung von Prof. Dr. Otto Richter (TU-Braunschweig) und Dr. Henning Nordmeyer (BBA) aus dem Jahr 2005.

3. Datengrundlage

Grundlage für die Parametrisierung des Modells bilden zum einen Erhebungen der BBA auf dem Schlag 'Ochsenberg' bei Helmstedt, die seit dem Jahr 2000 durchgeführt wurden, und zum anderen eigene Erhebungen, die im Rahmen des Projektseminars 2005 am gleichen Standort durchgeführt wurden. Dazu wurden auf dem Schlag Messpunkte im Abstand von 25 m × 36 m mittels GPS eingemessen. Die Unkrautbonituren wurden jeweils vor und nach der Herbizidapplikation an 76 Messpunkten auf dem Untersuchungsschlag durchgeführt. Zusätzlich wurden an den Messpunkten Bodenproben entnommen und ausgewählte Bodenparameter gemessen. Im Einzelnen wurden pH-Wert, Korngrößenverteilung, C_{org}-, P-, K- und Mg-Gehalt ermittelt. Im Jahre 2002 wurden Bodenproben zur Bestimmung des Unkrautsamenvorrates entnommen und der Samenanteil im Boden nach der Keimungsmethode ermittelt.

Eine Korrelationsanalyse im Rahmen des Projektseminars 2005 ergab, dass der Tongehalt als einziger der erhobenen Bodenparameter einen geringen, aber doch statistisch nachweisbaren Einfluss (Signifikanzniveau 1 % bis 5 %, je nach Jahr) auf das Unkrautauflkommen im Untersuchungsgebiet hatte. Auf der Grundlage der jährlich ermittelten Unkrautdaten wurden für jedes Jahr Herbizidapplikationskarten erstellt und die Herbizidapplikation GPS-gestützt teilflächenspezifisch durchgeführt.

Apera spica-venti wurde als Unkrautart für die Modellierung gewählt, weil hier die umfangreichste Datengrundlage für die Untersuchungsfläche zur Verfügung stand. Außerdem entsteht bei Düngung keine Änderung des Konkurrenzverhaltens gegenüber der Kulturpflanze (DUNKER, 2002).

Um zur Modellierung der räumlichen Dynamik einen Zellulären Automaten auf das Untersuchungsgebiet anwenden zu können und hierbei die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Gemeinen Windhalms (im Bereich von einigen m/Jahr) zu berücksichtigen, war es notwendig, die punktuell erfassten Messwerte des Tongehalts und der Unkrautzählungen auf ein 1 m x 1 m Raster zu überführen. Hierzu wurden die Punktmessungen mit dem GIS-Programm ArcView regionalisiert und dann mit Hilfe des Programms GS+ einer Variogramm-Analyse unterzogen und mittels Block-Kriging interpoliert.

4. Modell

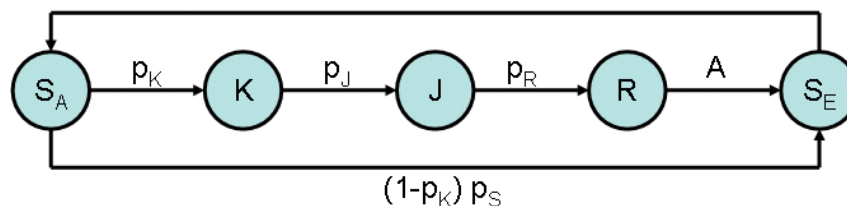
Tab. 1: Bezeichnungen / Symbols

K	Keimlingsdichte [$1/m^2$]
S	Samenpotential im Boden [$1/m^2$]
J	Dichte der Jungpflanzen [$1/m^2$]
R	Dichte der reifen Pflanzen [$1/m^2$]
A	Mittlere Samenanzahl pro Pflanze
A_{max}	Maximale mittlere Samenanzahl pro Pflanze
p_K	Auflaufwahrscheinlichkeit (0 ... 1)
p_J	Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimlinge (0 ... 1)
p_{J0}	Grundüberlebenswahrscheinlichkeit der Keimlinge (0 ... 1)
p_R	Überlebenswahrscheinlichkeit der Jungpflanzen (0 ... 1)
p_{R0}	Grundüberlebenswahrscheinlichkeit der Jungpflanzen (0 ... 1)
p_S	Überlebenswahrscheinlichkeit der Samen im Boden im Sommer (0...1)
p_W	Überlebenswahrscheinlichkeit der Samen im Boden im Winter (0...1)
D_{max}	maximale Dichte der Jungpflanzen [$1/m^2$]
D_{max}^0	maximale Grunddichte der Jungpflanzen [$1/m^2$]
λ	Form-Faktor der Tonabhängigkeitsfunktion
Ton	Tongehalt des Bodens [%]
Ton _{opt}	Optimaler Tongehalt des Bodens[%]
W_{Herb}	Wirkungsgrad des Herbizides (0 ... 1)

Tab. 1, Fortsetzung: Bezeichnungen / Symbols

S_{neu}	Neugebildete Samen [$1/\text{m}^2$]
α	Konkurrenzfaktor für die reifen Pflanzen
β	Konkurrenzfaktor für die Kulturpflanze
F	Dichte der Kulturpflanze [$1/\text{m}^2$]
γ	Konkurrenz-Exponent
σ	Standardabweichung oder „Breitefaktor“ der Verteilungsfunktion
μ_X, μ_Y	Durch den Wind verschobener Mittelpunkt der Verteilungsfunktion
p_D	Distributionswahrscheinlichkeit
$S_{\text{ein}}[x, y]$	Umverteilte Samen für die Zelle $[x, y]$
Appl	Herbizidapplikation (1=Ja / 0=Nein)
Schad	Schädigung der Samenproduktion durch Herbizid (0...1)

In Anlehnung an DUNKER (2002) wurden im Lebenszyklus von *Apera spica-venti* (Abb. 1) vier Stadien unterschieden. Das Samenpotential (S) im Boden, das Keimlingsstadium (K), das Stadium der Jungpflanze (J) und das der Reifen Pflanze (R), die wieder neue Samen (A) produziert.

Abb. 1: Lebenszyklusgraph von *Apera spica-venti* / Life cycle diagram of *Apera spica-venti*

Die Entwicklung des Samenpotentials nach einer Iteration (1 Jahr) lässt sich dann wie folgt darstellen:

$$S_{i+1} = ((1 - p_K) p_S + A \cdot p_R \cdot p_J \cdot p_K) \cdot p_W \quad (1)$$

Die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Stadium ins nächste werden im Weiteren definiert.

Die Auflaufwahrscheinlichkeit (p_K) wurde mit 4 % angenommen (DUNKER, 2002). TOEWS (2005) gab einen Bereich von 3 % bis 30 % an. Allerdings rechnete er auch mit einer maximalen Samenproduktion von 564 Samen pro Pflanze und keiner tiefen Bodenbearbeitung (Pflug) des Bodens. Daher wird hier mit dem Wert von DUNKER (2002) gerechnet.

Die Dichteabhängigkeit der Übergangswahrscheinlichkeit zur Jungpflanze wurde nach RICHTER et al. (2000) definiert:

$$p_J(K) = p_{J0} \frac{D_{\max}}{D_{\max} + K} \quad (2)$$

Nach TOEWS (2005) wurde die Überlebenswahrscheinlichkeit der ungestörten Jungpflanze zur reifen Pflanze mit 71 % angegeben. Diese wurde auf die Grundüberlebenswahrscheinlichkeiten der Keimlinge (p_{J0}) und der Jungpflanzen (p_{R0}) verteilt, die sich damit zu jeweils 84 % ergaben. Eine Abhängigkeit der maximalen Jungpflanzendichte vom Tongehalt wurde wie folgt festgelegt:

$$D_{\max}(Ton) = D_{\max}^0 - \lambda(Ton - Ton_{opt})^2 \quad (3)$$

Die Korrelationsanalyse der verschiedenen Bodenparameter mit den Abundanzen von *Apera spica-venti* auf dem Untersuchungsschlag ergab lediglich eine Abhängigkeit vom Tongehalt. Diese wurde durch eine Funktion 2. Ordnung mit einem Maximum bei einem optimalen Tongehalt modelliert. Die maximale Jungpflanzendichte (D_{\max}^0) wurde hierbei mit 500 Pflanzen pro m^2 angenommen. Aus den Untersuchungen auf dem Schlag Ochsenberg ergab sich ein optimaler Tongehalt (Ton_{opt}) von 17 % bei einem Formfaktor (λ) der Funktion von 10^{-5} . Abb. 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

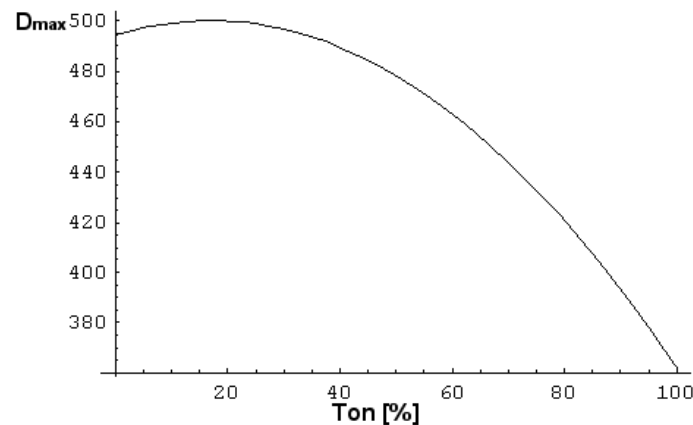


Abb. 2: Abhängigkeit der maximalen Jungpflanzendichte vom Tongehalt des Bodens / Dependency of the juvenile density on the clay content of the soil

Die Reifewahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Herbizidapplikation ergibt sich wie folgt:

$$p_R(Appl) = p_{R0} (1 - (Appl \cdot W_{Herb})) \quad (4)$$

Der Wirkungsgrad (W_{herb}) des verwendeten Herbizids (Atlantis WG, 150 g/ha; Wirkstoffe: Iodosulfuron und Mesosulfuron) wurde im Rahmen des Projektseminars 2005 zu ca. 88 % ermittelt. Dieser Wert resultierte aus der Quotientenbildung der Erst- und Nachboniturdaten aus dem Jahr 2005. Der tatsächliche Wert dürfte höher liegen, da vermutlich nach der Applikation des Herbizides noch weitere Pflanzen aufgelaufen sind, was im Modell nicht berücksichtigt wird.

Die Dichteabhängigkeit mit inter- und intraspezifischer Konkurrenz nach RICHTER et al. (2000) und DUNKER (2002) wurde um eine Reduktion der Samenproduktion nach Herbizidapplikation erweitert:

$$A(F, R, Appl) = A_{\max} \frac{R}{(1 + \alpha \cdot R + \beta \cdot F)^\gamma} (1 - (Appl \cdot Schad)) \quad (5)$$

Analog zu DUNKER (2002) wurde mit einer Kulturpflanzendichte (F) von 400 Pflanzen pro m² und den Konkurrenzfaktoren $\alpha = 0,3$ und $\beta = 0,28$ bei einem Konkurrenzexponenten $\gamma = 0,7$ gerechnet.

Nach OEBEL (2006) können nach Herbizidapplikation auflaufende Pflanzen keine Samen mehr bilden und haben keinen Einfluss auf den Kornertrag. Hier wird davon ausgegangen, dass die Herbizidapplikation überlebende und später auflaufende Pflanzen lediglich eine Teilschädigung erfahren. Dies drückt sich in einer Reduktion der Samenproduktion über den Faktor *Schad* aus, der hier (Gleichung 5) mit 60 % angenommen wurde.

Bei BAYER (2004) wird die maximale Samenzahl pro Pflanze (A_{\max}) mit 1000 bis 12000 angegeben. TOEWS (2005) rechnet mit im Mittel 361 Samen pro Pflanze. Eigene Zählungen ergaben durchschnittlich 897 Samen pro Pflanze (A), wobei die 10 ausgezählten Pflanzen unter Konkurrenzdruck der Weizenpflanzen standen. Aus Gleichung 5 ergibt sich A_{\max} damit unter der Annahme von bei den Bonituren im Mittel beobachteten 20 Pflanzen pro m² (R) zu ca. 2500 Samen pro Pflanze.

5. Räumliche Dynamik

Um die Dynamik der räumlichen Ausbreitung von *Apera spica-venti* zu modellieren wurde ein Zellulärer Automat bei Verwendung einer erweiterten von Neumann Umgebung (Abb. 3) benutzt (RICHTER et al., 2002).

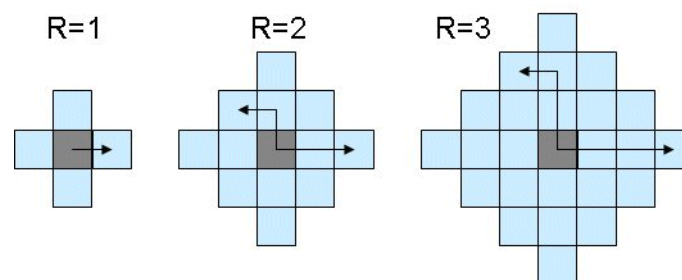


Abb. 3: Verschiedene Arten der Nachbarschaft von Zellen in einem klassischen zellulären Automaten bei unterschiedlichen 'von-Neumann-Distanzen' / Different neighbourhoods of cells in cellular automata with different 'von-Neumann-distances'

Es wurde davon ausgegangen, dass die meisten Samen von der Pflanze direkt auf den Boden darunter fallen. Die Samendichte auf dem Boden folgt dann einer Normalverteilung, deren Breite von der Windempfindlichkeit der einzelnen Samenkörner abhängt. Das Maximum der

Gauss-Glocke ist dann noch zusätzlich durch einen Windfaktor verschoben. Somit gibt es eine leichte Anisotropie in der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Abb. 4 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

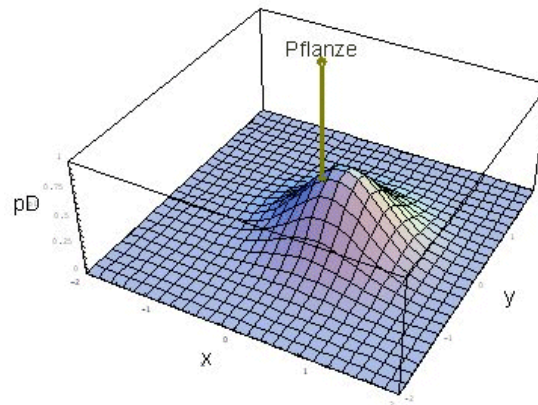


Abb. 4: Anisotropie der Samendistributionswahrscheinlichkeit / Anisotropy of seed distribution probability

Der Umverteilungsfaktor für Samen als Funktion des Abstandes in x- und y-Richtung ermittelt sich dann wie folgt:

$$p_D(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma}\right)^2} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

Die Distribution der Samen von einer Zelle $[x_1, y_1]$ in eine andere $[x, y]$ ergibt sich dann zu:

$$S_{\text{ein}}[x, y] = S_{\text{neu}}[x_1, y_1] \cdot p_D(x - x_1, y - y_1) \quad (7)$$

Damit durch den Zellulären Automaten 99,9 % aller produzierten Samen berücksichtigt werden, musste seine Größe dynamisch an die Breite der Gaussverteilung ($3 \cdot \sigma$) angepasst werden. Eine Samenumverteilung durch das Erntegerät wurde nicht berücksichtigt, da zum Erntezeitpunkt des Winterweizens die Samen von *Apera spica-venti* bereits größtenteils ausgefallen waren.

6. Untersuchung zur Plausibilität

Das erstellte Modell wurde mit den Unkrautboniturdaten aus den Jahren 2004 und 2005 überprüft. Abb. 5 stellt die Daten und ihre Zuordnung zum Modell dar. In Abb. 6 wird die Vorgehensweise verdeutlicht.

Hierbei stellte sich heraus, dass die vom Modell generierten Werte nur marginal von den tatsächlichen Werten der Nachbonitur (in Abb. 6 dargestellt für das Jahr 2005) abwichen. Bei sehr geringen Pflanzendichten ergab sich naturgemäß eine hohe relative Abweichung.

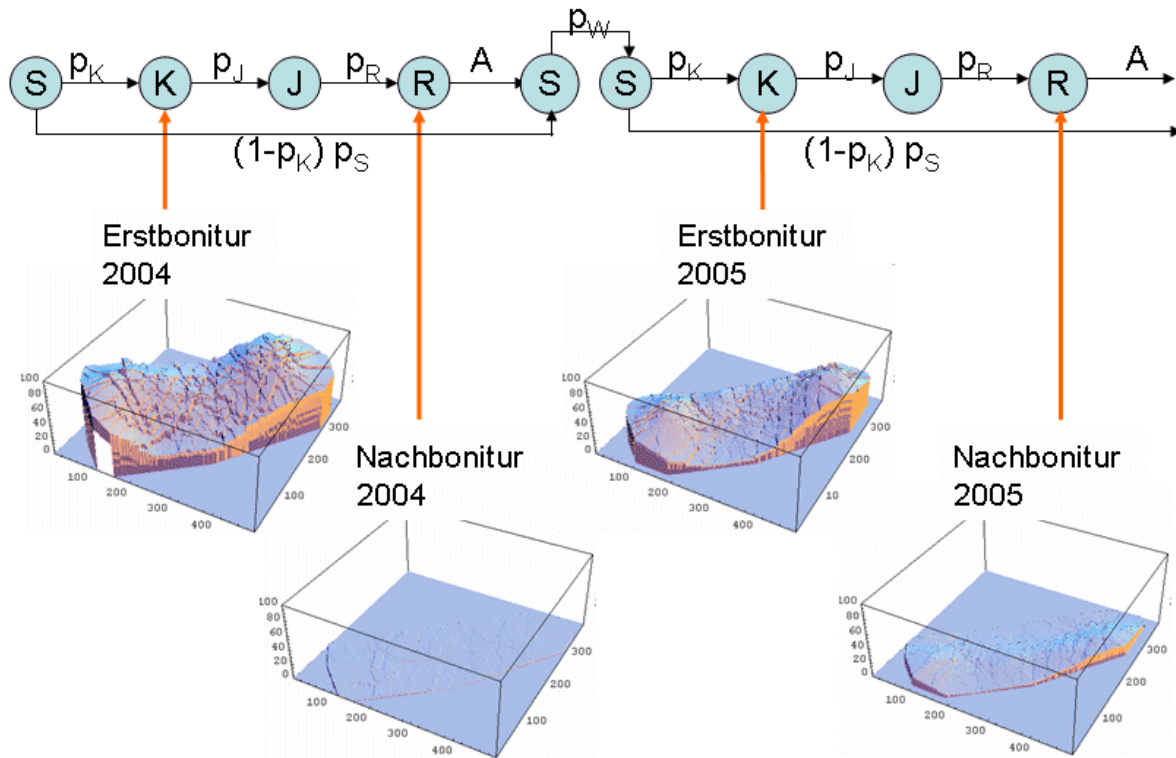


Abb. 5: Datengrundlage und ihre Zuordnung zum Modell / Data and correlation to the model

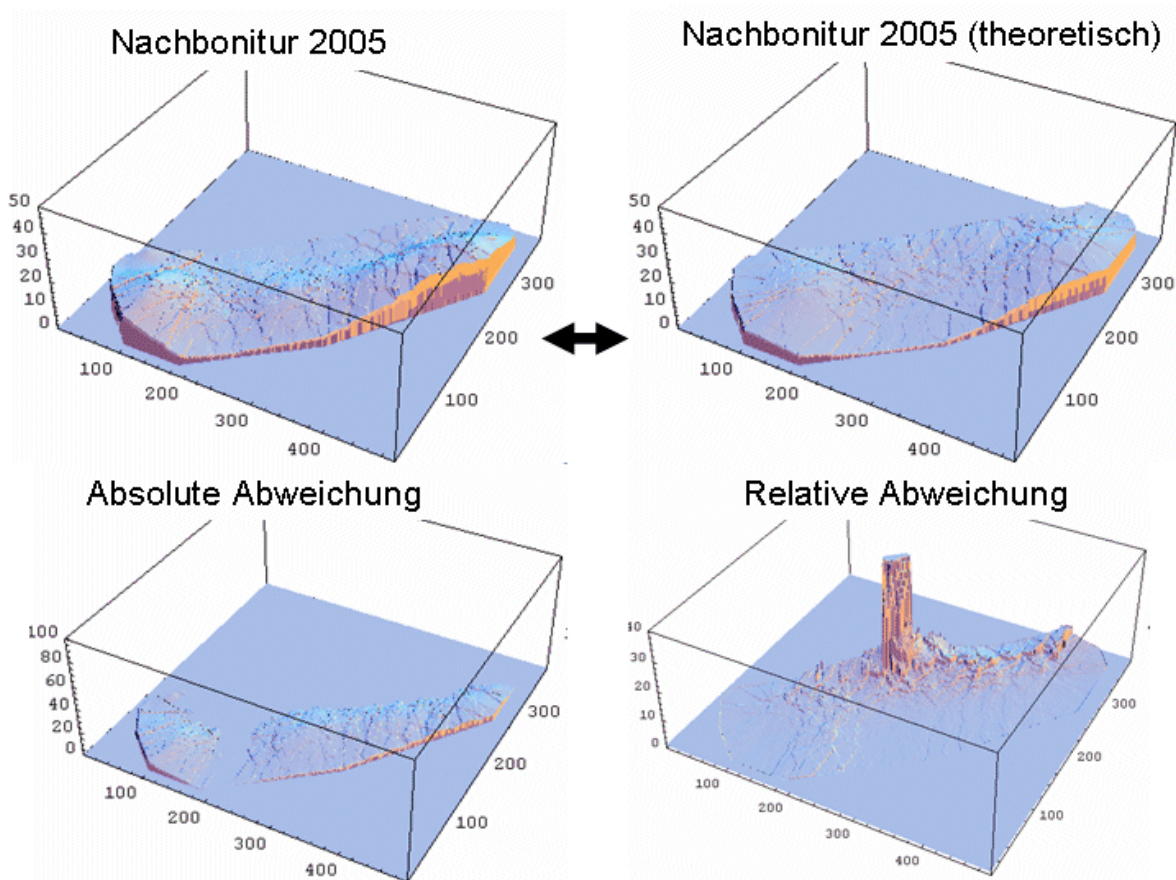


Abb. 6: Plausibilitätsanalyse durch Vergleich tatsächlicher und errechneter Werte / Plausibility analysis by comparing real and calculated values

Insgesamt wurde die tatsächliche Unkrautdynamik durch das eingesetzte Modell hinreichend genau beschrieben.

7. Schwellenwert für die Herbizidapplikation

Um eine statistisch sinnvolle Aussage über den im Mittel mit Herbizid zu behandelnden Flächenanteil treffen zu können, musste über einen langen Zeitraum simuliert werden.

Für die weitere Untersuchung wurde ein Testfeld mit einer Größe von 200 m × 200 m mit einer Rastergröße von 1 m × 1 m generiert, auf dem dann verschiedene Herbizid-Applikations-Strategien über 300 Jahre simuliert wurden. Das Feld wurde mit einer Anfangs-Verunkrautung versehen, die sich nach einigen Jahren ohne Herbizideinwirkung gleichmäßig mit einer maximalen Dichte (D_{\max}) auf dem gesamten Feld verteilte.

Um die durchschnittliche Herbizidapplikation bei verschiedenen Schwellenwerten der durch die aufkommenden Unkrautpflanzen verursachten Ernteeinbuße gegenüber zu stellen, wurde mit einer Parzellengröße von 10 m × 10 m gerechnet. Hierbei wurde die bei gleicher Bewirtschaftung aufgebrauchte Herbizidmenge (in % der Gesamtfläche) sowie die Anzahl der reifen Unkrautpflanzen bezogen auf die Gesamtfläche über den Zeitraum der letzten 100 Jahre der Simulation statistisch ausgewertet. Damit die Zeit bis zur gleichmäßigen Ausbreitung von *apera-spica venti* auf dem gesamten Testfeld nicht in die statistische Auswertung einfließen konnte, wurden zur Sicherheit jeweils die ersten 200 Jahre der Simulation verworfen.

Ergebnis einer Simulation war immer eine Häufigkeitsverteilung des mit Herbizid behandelten Anteils der Gesamtfläche über einen Zeitraum von 100 Jahren.

Die Umsetzung erfolgte mit der Programmiersprache C++ unter Linux bei Verwendung der open source Bibliothek Qt der Firma Trolltech. Abb. 7 stellt das Benutzerinterface des Programmes dar.

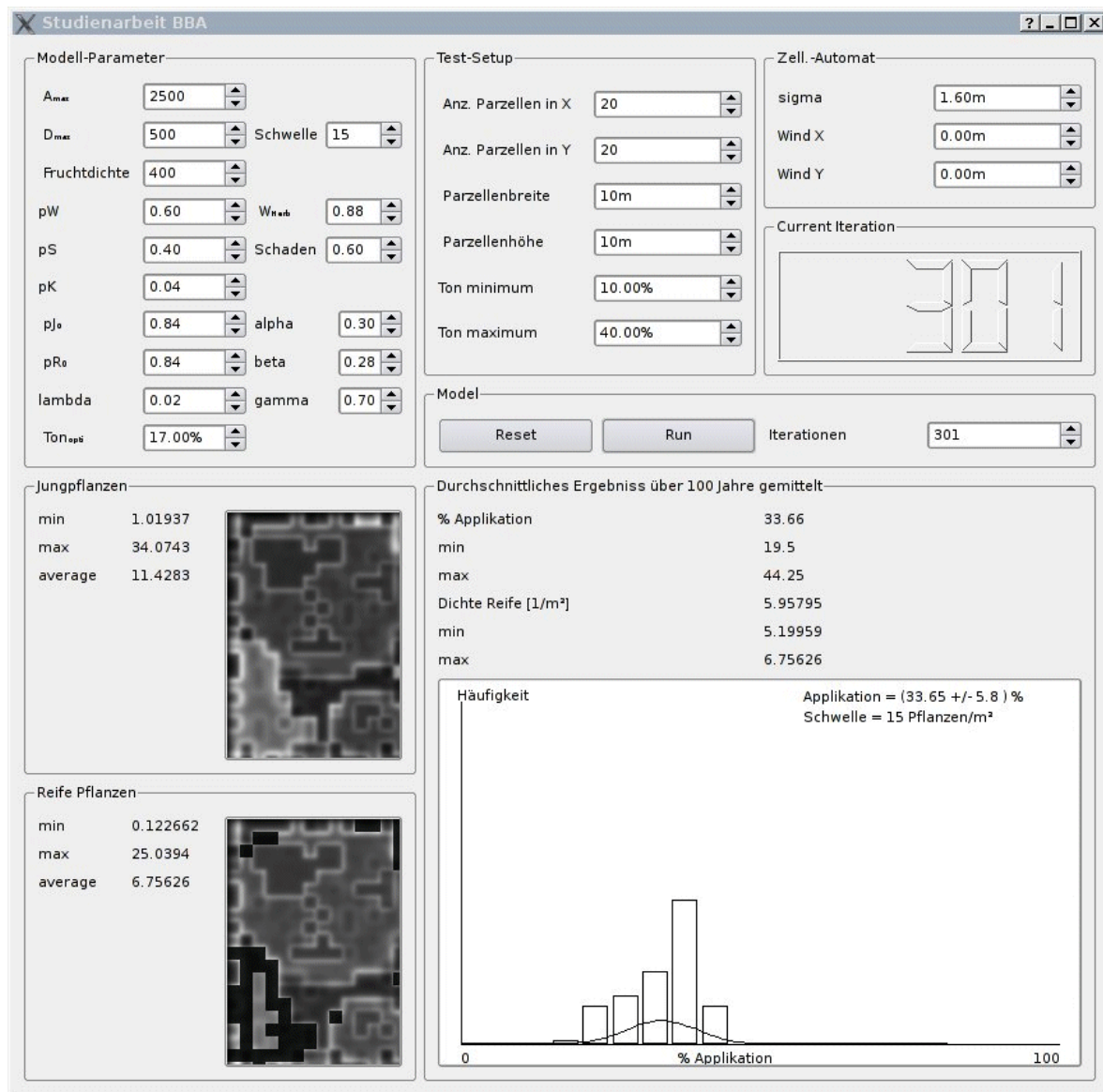


Abb.7: Benutzerinterface (oben: Modellparametereinstellungen; unten: Visualisierung der Ergebnisse der aktuellen Iteration; unten links: 2D-Grafiken der aktuellen Jungpflanzendichte der Dichte der reifen Pflanzen; unten rechts: Häufigkeitsverteilungsglyph des behandelten Flächenanteils über die letzten 100 Jahre der Simulation) / User interface (top: model parameter definition; bottom: visualization of current iteration results; bottom left: 2d density plots of juvenile and mature plants; bottom right: frequency distribution graph of with herbicide threatened part of the area over the last 100 years of the simulation)

8. Ergebnisse der Simulation

Es stellte sich heraus, dass die Wahl des Schwellenwertes nur einen geringen Einfluss auf die im langjährigen Durchschnitt zu applizierende Herbizidmenge hatte. Es ergaben sich bei den gewählten Parametern für die Populationsdynamik berechnete Werte von 35 % bis 30 % für den mit Herbizid zu behandelnden Anteil der Gesamtfläche. Die Standardabweichung dieses

Mittelwertes änderte sich allerdings stark in Abhängigkeit vom gewählten Schwellenwert. In Abb. 8 sind exemplarisch einige Ergebnisse der Simulation aufgeführt.

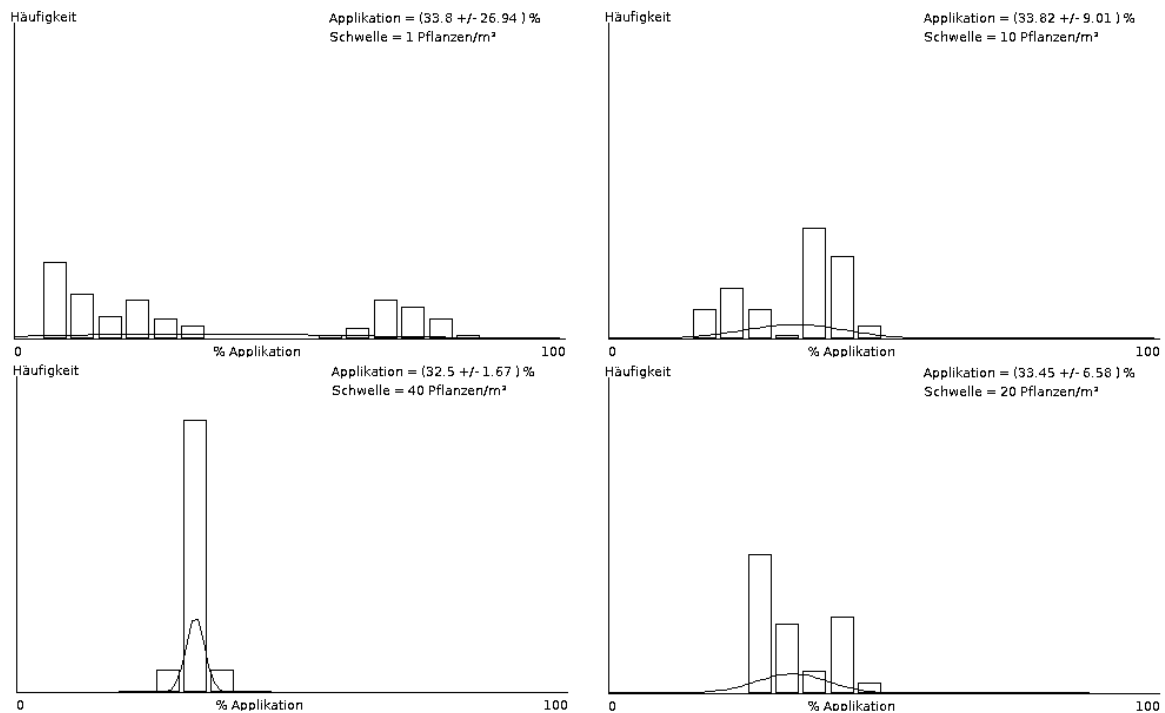


Abb. 8: Ergebnisse der Simulation mit verschiedenen Schwellenwerten: Häufigkeitsverteilungen des mit Herbizid behandelten Flächenanteils über 100 Jahre / Results of the simulation with different threshold value: frequency distributions of with herbicide threatened part of the area over 100 years

Es war zu beobachten, dass sich bei kleinen Schwellenwerten zwei Maxima der Häufigkeitsverteilung einstellen, die sich dann bei größeren Schwellenwerten zu einem vereinen. Zusammenfassend wird dieser Zusammenhang in Abb. 9 dargestellt.

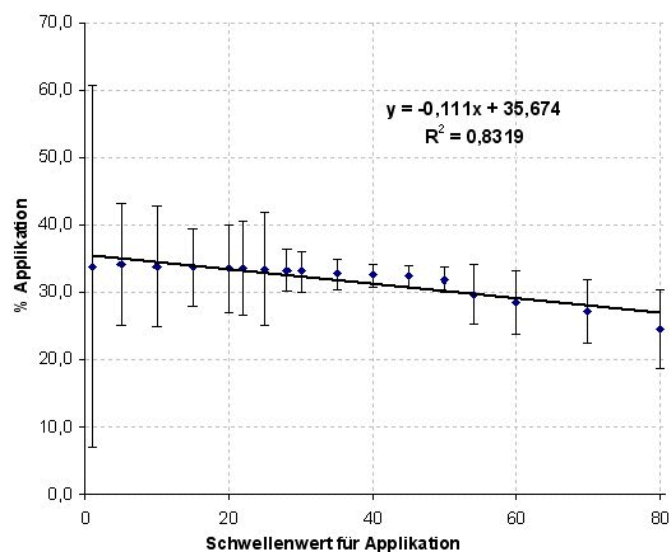


Abb. 9: Über 100 Jahre gemittelter Anteil der mit Herbizid zu behandelnden Fläche in Abhängigkeit vom Schwellenwert / 100 year mean values of the herbicide threatened part of the test area with respect to the threshold value

Die Standardabweichung des Mittelwertes erlaubt hier jeweils Aussagen über den Anteil der Jahre mit hoher Herbizidapplikation. Abb. 9 zeigt ein Minimum der Standardabweichung des Mittelwertes bei einem Schwellenwert von 45 Pflanzen/m².

Die Trendlinie in Abbildung 9 zeigt nur ein leichtes Gefälle (Steigung -0,11); dennoch ergibt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,83$ ein klarer linearer Zusammenhang zwischen Applikationsschwelle und im langjährigen Mittel zu behandelnder Fläche.

9. Diskussion und Ausblick

Die teilflächenspezifische Herbizidapplikation ist für Landwirte nur dann als Alternative zu der bisherigen Ganzflächenbehandlung interessant, wenn trotz höherer Kosten für die Anschaffung der Gerätetechnik, für die Unkrauterkennung und die Applikation ein ökonomischer Vorteil entsteht. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme hängt im wesentlichen von der Größe der zu bearbeitenden Fläche, den Herbizidkosten, dem eingesetzten Verfahren, der angebauten Kulturpflanze und der Unkrautzusammensetzung und -verteilung ab (OEBEL, 2006).

Der Einsatz eines Modells, in dem Fach- und Erfahrungswissen (Applikations- und Boniturlisten der Vorjahre) kombiniert werden, kann zur Ermittlung der optimalen Schadenschwelle auf dem jeweiligen Schlag und zur Voraussage der eingesparten Herbizidmenge genutzt werden. Somit bietet es eine Entscheidungshilfe bei der Planung bevorstehender Herbizidapplikationen. Zwar ist die Anwendung mathematischer Modelle auf biologische Systeme durch eine hohe räumliche Variabilität erschwert, doch wird bei ausreichender Parametrisierung die Realität hinreichend präzise wiedergegeben um Aussagen treffen zu können (Flake 2003).

Mit dem hier vorgestellten Modell konnten theoretische Einsparungen von bis zu 70 % in einer Winterweizen Monokultur über 100 Jahre ermittelt werden. Zwar lässt sich die Tendenz erkennen, dass die mit Herbizid zu behandelnde Fläche bei größerem Schwellenwert geringer wird, doch sind die dann zu erwartenden Ertragseinbußen in Abhängigkeit von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ökonomisch nicht mehr vertretbar. Neben den ökonomischen ergeben sich aus der Verringerung des Herbizidaufwandes auch ökologische Vorteile. So sinkt die potentielle Kontaminationsgefahr für Grund- und Oberflächenwässer und es erhöht sich durch selektives Stehen lassen von Unkräutern mit geringer Abundanz die Biodiversität auf dem Acker, wovon u. A. Ackerwildkräuter und Insekten profitieren (OEBEL, 2006).

Das Ergebnis der Simulationen deutet darauf hin, dass sich bei einem Schwellenwert von 45 Pflanzen/m² nur eine geringe Streuung der Applikationsmenge über 100 Jahre einstellt. Ausgehend von der Annahme, dass bei hoher Applikationsrate die Artenvielfalt auf dem Acker-

standort stärker reduziert wird und auch eine höhere Grundwassergefährdung auftritt, ergibt sich eine geringere ökologische Belastung durch weniger Jahre mit hoher Applikationsrate.

Eine ökonomisch sinnvolle Schadensschwelle konnte mit dem hier vorgestellten Modell nicht ermittelt werden. Fast unabhängig vom Schwellenwert mussten im langjährigen Mittel annähernd gleiche Mengen Herbizid ausgebracht werden, wobei der mit Herbizid zu behandelnde Flächenanteil stark in Abhängigkeit von den Parametern der Populationsdynamik variierte, die es noch genauer durch Feld- und Laborversuche zu bestimmen gilt.

Insbesondere die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Samen im Sommer und im Winter bedürfen einer genaueren Untersuchung. Gegebenenfalls müsste hier die Tiefe der Bodenbearbeitung in das Modell mit einfließen, da Samen nur in den oberen cm des Bodenkörpers keimen. Auch eine Berücksichtigung von Inhomogenitäten in der Samenverteilung durch Bodenbearbeitung (Pflug) und Erntemaschinen sowie in weiteren Bodenparametern wäre sinnvoll.

Wechselwirkungen zwischen der Ackerfläche und ihrer Umgebung (z.B. Einwehung von Samen) sowie Fruchtfolgen und Konkurrenzen zu anderen Ackerunkräutern sollten ebenfalls in einer Erweiterung des Modells berücksichtigt werden.

Das hier vorgestellte Modell bietet eine Möglichkeit verschiedene annuelle Unkräuter im Zusammenspiel mit verschiedenen Ackerfrüchten im Hinblick auf benötigte Herbizidmengen im langjährigen Mittel bei Monokultur unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften zu untersuchen. Hier wurde stellvertretend mit den Parametern von *Apera spica-venti* in Konkurrenz zu Winterweizen gerechnet. Bei geeigneter Parametrisierung können aber auch andere Kombinationen untersucht werden.

Literatur

BAYER (2004): Moderne Strategien für eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung. Internetbroschüre vom 1.10.2006, Bayer Crop Science GmbH. www.bayer-crop-science.de/imperia/md/content/de/pflanzenschutz/ratundhilfe/infoshop/broschueren/sonstiges/2005/graeserbroschuere.pdf.

BMVEL (2004): Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz. Richtlinie, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft.

DICKE, D. (2005): Lenkung teilschlagspezifischer Unkrautkontrollverfahren unter Berücksichtigung der Populationsdynamik von Unkräutern mit computergestützten Modellen. Dissertation, Bonn.

DUNKER, M. (2002): Erfassung und Modellierung der kleinräumigen Unkrautverteilung auf Ackerflächen in Abhängigkeit von der Bodenvariabilität. Dissertation, Braunschweig.

- DUNKER, M., O. RICHTER und H. NORDMEYER (2002): Modellierung der Ausbreitungsdynamik von *alopecurus myosuroides huds.* für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII:359–366.
- FLAKE, M. (2003): Strategien nachhaltiger Landbewirtschaftung. Messen und Modellieren der räumlichen Variabilität agrarökologischer Prozesse. Dissertation, Braunschweig.
- NORDMEYER, H. (2005): Site specific weed control and spatial distribution of weed seed bank. Precision Agriculture, pages 139–136.
- NORDMEYER, H. (2006a): Patchy weed distribution and site specific weed control in winter cereals. Precision Agriculture, 7:219–231.
- NORDMEYER, H. (2006b): Teilflächenunkrautbekämpfung im Rahmen des Reduktionsprogramms chemischer Pflanzenschutz. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XX:165–172.
- OEBEL, H. (2006): Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren. Dissertation, Hohenheim.
- RICHTER, O., O. BÖTTCHER und P. ZWERGER (2000): Modellierung der Ausbreitung von herbizidresistenten Unkräutern durch Kopplung eines populationsgenetischen Modells mit Zellulären Automaten. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII:329–336.
- RICHTER, O., O. BÖTTCHER AND P. ZWERGER (2002): Modelling spatio-temporal dynamics of herbicide resistance. Weed research, 42:52–64.
- TOEWS, T. (2005): Ökonomik teilflächenorientierter Unkrautbekämpfung. Dissertation, Gießen.

Zu den Autoren

Ronald Möws, Karlstrasse 10, 38106 Braunschweig, E-Mail: r.moews@tu-bs.de ist Student der Geoökologie an der TU-Braunschweig im 9. Semester.

Dipl.-Ing (FH) Peter Vorpahl, Rudolfstrasse 17, 38104 Braunschweig, E-Mail: p.vorpahl@tu-bs.de ist Student der Geoökologie an der TU-Braunschweig im 9. Semester.

Danksagung

Diese Arbeit entstand als eine Studienarbeit aus einem Projektseminar im Studiengang Geoökologie an der TU Braunschweig. Wir danken allen Teilnehmern des Projektseminars für die Vorarbeiten zu diesem Artikel.

Teilgenommen haben Manuel Buch, Helen Feldhaus, Jan Feldhaus, Christian Gläser, Michael Herbst, Yvonne Hermanns, Kerstin Hockmann, Anna Kaeser, Danyelle Klauß, Oliver Mie-

lenz, Ronald Möws, Mona Rabe, Henrike Schelle, Anna Trockel, Ferdinand Vollmers, Peter Vorpahl und Julia Weyer als Studenten der Geoökologie unter Betreuung von Dr. Dagmar Söndgerath, Klaus Schmalstieg und Wolfgang Max.

Unser besonderer Dank geht an Prof. Dr. Otto Richter und Dr. Henning Nordmeyer für die Leitung des Projektseminars und die Unterstützung bei dieser Arbeit.