



Simulationsmodelle in der Landwirtschaft

Thomas NEMECEK, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Reckenholz (FAL), CH-8046 Zürich

Ein Simulationsmodell ist ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit. Es erlaubt uns, komplexe Zusammenhänge zu untersuchen und besser zu verstehen. Anhand von drei Fallbeispielen werden Anwendungen von Simulationsmodellen gezeigt: Prognosen ermöglichen uns, bessere Entscheidungen zu treffen, zum Beispiel bei der Festlegung von Krautvernichtungsterminen im Saatkartoffelbau. Modelle können helfen, Umweltrisiken wie die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Wiesen abzuschätzen. In der Pflanzenzüchtung können Modelle der Optimierung von Zuchtzielen dienen.

Computer sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Heute steht uns eine Rechenleistung zur Verfügung, von der wir vor wenigen Jahren kaum träumten. Dank dieser Tatsache sind Simulationsmodelle in vielen Bereichen sehr wichtig geworden.

Simulationsmodelle helfen uns, Probleme zu lösen und Systeme besser zu verstehen (siehe Begriffserklärungen im Glossar). Mit Hilfe von Prognosen können bessere Entscheidungen getroffen und Massnahmen optimiert werden (Abb. 1).

Das Erstellen eines Simulationsmodells zwingt uns, die Realität mit mathematischen Gleichungen zu beschreiben. Dadurch können Erkenntnisse aus verschiedenen Quellen zusammengefasst und einheitlich dargestellt werden. In der Landwirtschaft begegnen wir oft komplexen Zusammenhängen. Unser Verständnis solcher Systeme stösst rasch an Grenzen. Simulationsmodelle können uns helfen, die Zusammenhänge besser zu verstehen und zu untersuchen.

In der landwirtschaftlichen Forschung ergänzen Modelle die Versuche, sie können diese jedoch niemals vollständig ersetzen. Gute Modelle können aber den experimentellen Aufwand reduzieren. Leicht lassen sich Szenarien simulieren, die mit Versuchen nicht realisierbar sind (sei es aus Kosten-, aus Umweltschutz- oder aus technischen Gründen). Simulationsstudien ermöglichen Problemfelder zu identifizieren und die künftige Forschung zu planen.

Viele Simulationsmodelle sind didaktisch wertvoll: Im Unterricht oder bei Präsentationen lassen sich die Sachverhalte sehr

eindrücklich darstellen.

Systemanalyse: Realität und Modell

Die Systemanalyse befasst sich mit dem Studium von Systemen. Das «reale System» steht im Mittelpunkt unseres Interesses. Es ist jener Teil der Wirklichkeit, der für unser Problem oder unsere Fragestellung relevant ist. Aufgrund der Kenntnisse des realen Systems und von Experimenten bilden wir ein Modell, das ein

vereinfachtes Abbild des realen Systems ist. Dieses Modell ist selbst wieder ein System. Genauso wie wir durch Beobachtung und durch Versuche Erkenntnisse über das reale System gewinnen können, erlauben uns Simulationen, unser Simulationsmodell zu untersuchen (Abb. 2).

Modell: Vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit

Wir begegnen Modellen vielfach in unserem Alltag. Sie helfen uns, die Realität besser zu verstehen. Modelle sind in gewisser Hinsicht immer «falsch»: Sie stellen die Wirklichkeit vereinfacht dar und zeigen nur einen Teil von ihr.

Ein Modell muss nicht der Realität möglichst nahe kommen, sondern für einen bestimmten Zweck geeignet und nützlich sein. Ein Atom-Modell ist in bezug auf Grösse, Farbe, Zusammensetzung usw. weit von seinem realen Vorbild entfernt und in diesem Sinne «falsch». Es ist aber



Abb. 1. Viruskrankheiten verursachen bei Kartoffeln grosse Ertragsausfälle. Die Pflanzen im Vordergrund sind mit Viren befallen. Entscheidend für die Bekämpfung ist die Produktion von wenig befallenem Saatgut, was unter anderem durch frühzeitiges Vernichten des Krautes erreicht wird. Mit dem Prognosesystem TuberPro lässt sich der Krautvernichtungstermin für Saatkartoffeln optimieren.

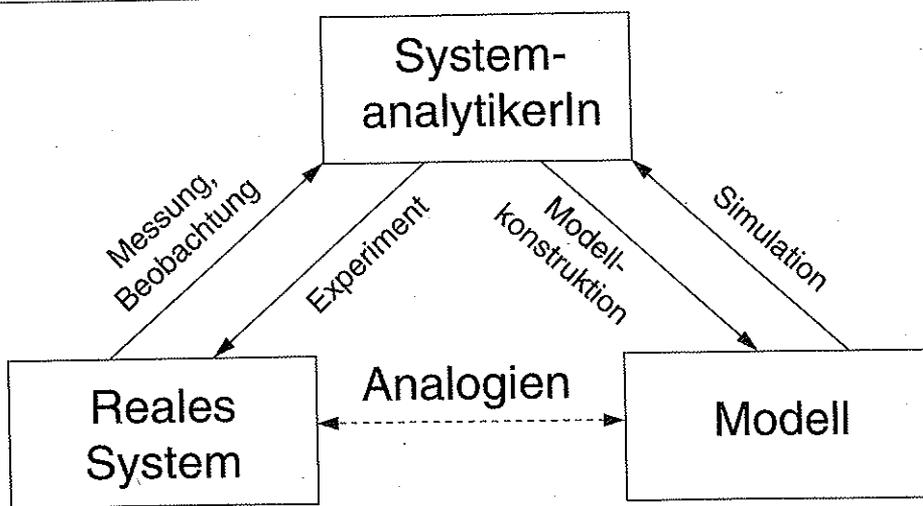


Abb. 2. Situation in der Systemanalyse: Durch Messungen und Beobachtungen gewinnen wir Erkenntnisse über das reale System. Weitere Informationen können wir durch Experimente erhalten, welche wir mit diesem System anstellen. Das Wissen wird in ein Modell umgesetzt, welches mittels Simulation untersucht wird. Die Erkenntnisse, die wir über unser Modell gewinnen, lassen sich, je nach Güte des Modells, auf das reale System übertragen (nach Fischlin 1991).

sehr nützlich, indem es uns erlaubt, den Aufbau und die «Funktionsweise» von Atomen zu verstehen. Modelle reduzieren die Realität auf das Wesentliche. Was wesentlich ist, wird von der Zielsetzung bestimmt. Beispielsweise ist der Mittelwert ein Parameter, der wesentliche Eigenschaften einer statisti-

schen Verteilung beschreibt. Der mittlere Weizenantrag war 1995 in der Schweiz mit 61,7 dt/ha viel höher als in Afrika mit 16,7 dt/ha (Quelle: FAO). Diese Zahlen sagen nichts aus über die Unterschiede zwischen Betrieben, Produktionsrichtungen oder Ländern; dazu müssten andere Kenngrößen herangezogen werden. Dennoch füh-

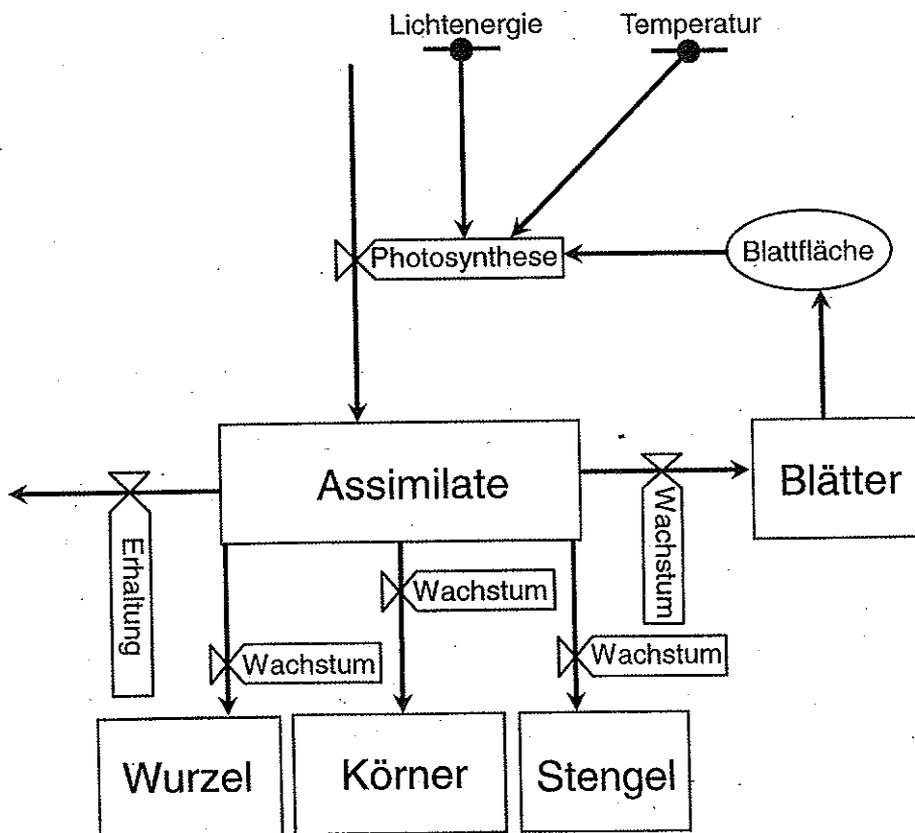


Abb. 3. Einfaches Modell einer Weizenkultur: Die Photosynthese wird durch die Lichtenergie angetrieben. Dabei werden Stoffe aus der Umgebung aufgenommen und Assimilate erzeugt. Ein Teil der Assimilate wird für die Erhaltung der Pflanze verbraucht (Atmung), wobei Stoffe das System wieder verlassen. Der Rest wird in die Wurzeln, die Körner, die Stengel und die Blätter eingelagert. Je nach Entwicklungsstadium variiert die Verteilung auf die einzelnen Organe. Die Blattfläche ist von der Blattmasse abhängig und beeinflusst die Photosynthese massgeblich.

ren uns die Mittelwerte die Ertragsunterschiede zwischen der Schweiz und Afrika deutlich vor Augen.

Modell-Beispiel: Weizenfeld auf dem Computer

Dieses Modell geht davon aus, dass die Photosynthese durch das Licht, die Temperatur und die Blattfläche bestimmt wird (Abb. 3). Wir nehmen zudem an, dass die Wasser- und Nährstoffzufuhr optimal ist und dass das Wachstum nicht durch Krankheiten, Schädlinge oder Unkräuter beeinträchtigt wird. In einem weiteren Schritt kann nun das Modell verfeinert werden, indem wir beispielsweise den Wasserhaushalt berücksichtigen. So kann das Modell auch in Situationen eingesetzt werden, wo die Wasserversorgung nicht optimal ist.

Simulation: Berechnung in kleinen Schritten

Das Prinzip der Simulation beruht auf der Berechnung in kleinen Zeitschritten. So kann der Endwert einer Grösse (z.B. der Ertrag bei Ernte) bei dynamischen Simulationsmodellen (siehe Glossar) nicht in einem Schritt direkt aus dem Anfangswert berechnet werden. Aufgrund der Kenntnis von Ertragsbildungsprozessen lässt sich jedoch der Zuwachs in kleinen Schritten (z.B. täglich) berechnen und aufaddieren (Abb. 4). Dieses Verfahren, genannt «numerische Integration», ist das Kernstück der Simulation. Es liegt auf der Hand, dass solche Berechnungen nur auf einem Computer durchführbar sind.

Schritte in einer Simulationsstudie

Das Vorgehen bei einer Simulationsstudie lässt sich nicht starr festlegen. Gewisse Vorgehensweisen haben sich jedoch bewährt und helfen mit, Fehler zu vermeiden. Der folgende Ablauf ist nicht fest, oft muss man auf bereits durchlaufene Schritte zurückkommen.

1. Ziele definieren: Modelle werden immer für einen bestimmten Zweck erstellt. So gibt es nicht einfach *das* Modell einer Weizenkultur, sondern für verschiedenen Zwecke sind verschiedene Modelle notwendig. Für die Ertragsprognose, die Optimierung der Bewässerung und für die Züchtungsplanung werden unterschiedliche Modelle benötigt. Die klare Definition von Zielen steht deshalb am Anfang jeder Modellierungsstudie.

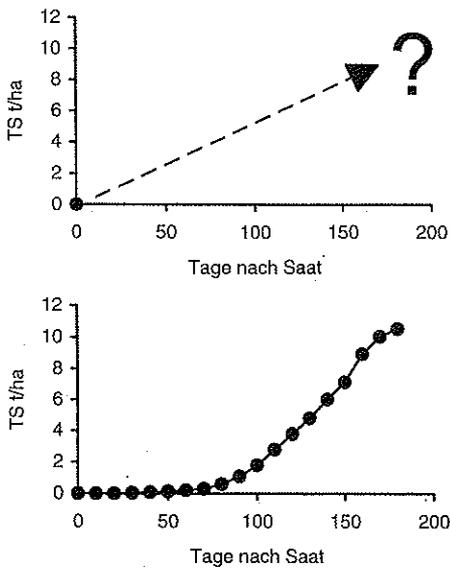


Abb. 4. Die Trockensubstanz (TS) des Sprosses einer Weizenkultur kann bei einem dynamischen Simulationsmodell nicht direkt berechnet werden (oben), sondern muss in kleinen Schritten aufgrund der ablaufenden Prozesse berechnet werden (unten, Daten nach van Keulen und Seligmann 1987).

2. Anwendungsbereich des Modells festlegen: Es muss entschieden werden, in welchem Bereich das Modell angewendet werden soll. Ein Modell das für Naturwiesen im Mittelland erprobt ist, wird unter Umständen bei Alpweiden unrealistische Ergebnisse liefern und muss entsprechend angepasst werden.

3. Systemgrenzen festlegen: Sobald die Ziele definiert sind, müssen die Systemgrenzen bestimmt werden. Es ist zu entscheiden, welche Größen zum System gehören und welche zu dessen Umwelt. Als Kriterium gilt, dass das System von seiner Umwelt beeinflusst wird, die Umwelt jedoch nicht durch das System beeinflusst wird. In einem Modell für ein Weizenfeld wird man den Niederschlag zur Umwelt zählen, den Bodenwassergehalt, falls berücksichtigt, jedoch zum System.

4. Relevante Größen definieren: Ausgehend von den Zielen müssen nun die Elemente bestimmt werden, die im Modell zu berücksichtigen sind. Es geht nicht um Vollständigkeit, sondern darum, die wesentlichen Elemente einzuschliessen und die weniger wichtigen zu vernachlässigen.

5. Datenmaterial sichten: Daten aus früheren Erhebungen, aus Publikationen, usw. müssen zusammengestellt und analysiert werden.

6. Mathematisches Modell aufstellen: Es bestehen nun Vorstellungen über die wichtigsten Mechanismen im System. Die Beziehungen zwischen den einzelnen Ele-

menten werden in mathematische Gleichungen gefasst.

7. Simulationsmodell programmieren: Das mathematische Modell muss nun in ein Simulationsmodell umgesetzt werden. Dies kann mit einer allgemeinen Programmiersprache geschehen oder besser mittels spezieller Software. Noch unbekannte Größen sind durch Schätzwerte zu ersetzen. Jetzt sollten bereits vorläufige Simulationsstudien gemacht werden.

8. Daten erheben: Bei der Modellkonstruktion (6.) ergeben sich oft Wissenslücken, die durch Versuche zu stopfen sind. Zusammenhänge müssen abgeklärt und Kenngrößen gemessen werden. Ebenfalls sind Daten für die Validierung des Modells (Modellprüfung anhand von experimentellen Daten) zu erheben (9.). Das Modell muss eventuell aufgrund der Resultate angepasst werden (\Rightarrow 6.).

9. Validierung (siehe Glossar): Nun kommen wir zu den eigentlichen Simulationen. Es muss überprüft werden, ob das Modell die Realität genügend genau nachvollziehen kann. Was «genügend genau» heisst, hängt von der Zielsetzung ab. (eventuell \Rightarrow 6. oder 8.)

10. Sensitivitätsanalyse, Stabilitätsanalyse (siehe Glossar): Wenn das Modell erfolgreich validiert ist, werden seine Eigenschaften untersucht. Dies erlaubt uns, Rückschlüsse auf unser reales System zu machen.

11. Modellanwendung: Im letzten Schritt wenden wir unser Modell an. Dies kann zum Beispiel eine Prognose sein, die Untersuchung einer Frage, die Prüfung einer Hypothese, usw.

Die Haupthindernisse in der Entwicklung und Anwendung von Modellen sind nach Penning de Vries und Rabbinge (1995):

- Mangel an (quantitativen) Daten für die Entwicklung und Validierung von Modellen;
- Mangel an gut ausgebildeten Fachleuten, die Modelle entwickeln, anpassen und anwenden können;
- zu wenig einheitliche Programmierung der Modelle; dadurch wird die Kombination von verschiedenen Modellen und deren Übertragbarkeit erschwert und
- schlechte oder fehlende Dokumentation.

Anwendungsbeispiele

■ Das Prognosesystem TuberPro berechnet den erwarteten Verlauf der Virusinfektionen von Saatkartoffeln, die Wahr-

scheinlichkeit der Anerkennung in den verschiedenen Saatgutklassen beziehungsweise das Risiko einer Deklassierung oder Zurückweisung eines Saatgutpostens und den erwarteten Ertrag (Abb. 5). Für die Prognose wird unter anderem der Blattlausflug, das Wetter, die Sorte, die Qualität des Ausgangssaatguts und das Anbaugebiet berücksichtigt (Nemecek *et al.* 1994 und 1995). TuberPro wurde an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Pflanzenbau in Changins entwickelt und wird als Prognosesystem für die französischsprachige Schweiz eingesetzt. Es wird jetzt auch in der deutschsprachigen Schweiz erprobt. Eine Version des Modells wurde speziell für Präsentationen entwickelt. Interessierte können dabei selber als Saatkartoffelproduzenten am Computer auftreten. Sie können versuchen, mit geeigneten Massnahmen die Qualität des Saatguts und damit ihr Einkommen zu verbessern. Dies hat oft «Aha»-Effekte zur Folge.

■ Die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Wiesen werden am Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL) der FAL untersucht (Führer 1997). Mittels Modellrechnungen wird die Wirkung höherer Temperaturen, Änderungen der Niederschlagsmengen und anderer Klimafaktoren sowie eines erhöh-

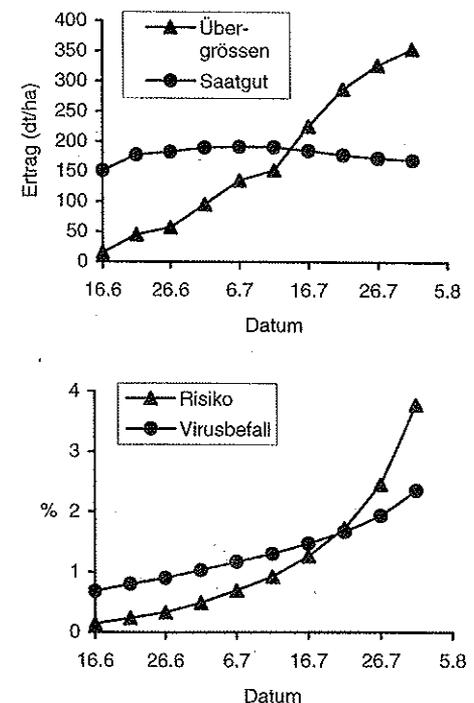


Abb. 5. Das Prognosesystem TuberPro berechnet den erwarteten Ertrag, aufgeteilt nach Saatgut und Übergrößen sowie den Verlauf des Virusbefalls und das Risiko einer Deklassierung oder Zurückweisung eines Saatgutpostens. Mit diesen Informationen können die Krautvernichtungszeitpunkte optimiert werden.

ten Kohlendioxidgehalt auf Wiesen des Mittellandes geschätzt. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Ertrag von Wiesen unter den erwarteten Klimabedingungen im allgemeinen steigen wird. Die Wirkung hängt jedoch stark von der Wasserspeicherung des Bodens und der Höhenlage ab. Die Untersuchungen werden nun auf das Berggebiet ausgeweitet, und es wird der Einfluss der Nutzung einbezogen.

■ In der **Pflanzenzüchtung** können Simulationsmodelle ebenfalls nutzbringend eingesetzt werden. Ellisèche und Hoogendoorn (1995) zeigen Beispiele aus der Kartoffelzüchtung. Es wurden folgende Zuchtziele untersucht: Knollenertrag, Trockenheitstoleranz, Resistenz gegen Kraut- und Knollenfäule und gegen Kartoffelzystennematoden. Mit Hilfe von Modellen wurde untersucht, welche Sortenmerkmale die Zuchtziele am stärksten beeinflussen und welche Merkmale die grösste Variabilität aufweisen. Diese Merkmale versprechen am ehesten Erfolg, um Zuchtziele zu erreichen. Mit solchen Studien können Züchtungsstrategien optimiert werden.

Ausblick

Die Landwirtschaft muss rationell, kostengünstig, natur- und umweltgerecht produzieren. Diese Zielsetzungen sind nicht leicht unter einen Hut zu bringen. Die Probleme und Fragestellungen, die sich daraus ergeben, werden zunehmend komplexer. Oft lassen sich die Folgen unseres Handelns nicht leicht abschätzen. In diesem Umfeld haben Simulationsmodelle einen wichtigen Platz und werden in Zukunft vermutlich an Bedeutung gewinnen.

Für die Praxis ergeben sich Vorteile, da mit Hilfe von Modellen die Produktion optimiert und so in einem Umfeld mit zum Teil widersprüchlichen Zielsetzungen eine machbare Lösung gefunden werden kann.

LITERATUR

- Ellisèche D. and Hoogendoorn J., 1995. The use of models in potato breeding. In: Haverkort, A.J. & MacKerron, D.K.L. (eds.): Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 341-356.
- Fischlin, A., 1991. Skript Vorlesung Systemanalyse, ETH Zürich.
- Fuhrer J. (Hrsg.), 1997. Klimaänderung und Grünland - Eine Modellstudie über die Auswirkungen

Kleines Glossar

- Dynamisches Modell:** Ein Modell, welches die Veränderung des Systems im Zeitverlauf simuliert (Gegensatz: statisches Modell).
- Sensitivitätsanalyse:** Untersuchung der Reaktion von gewissen Kenngrössen, wenn Eingangsgrössen und Parameter sich ändern. Beispiel: Wie stark verändert sich der Befall von Mais durch Maiszünsler, wenn der Mais zwei Wochen früher oder später gesät wird?
- Simulation:** Schrittweise Berechnung eines mathematischen Modells. Das Verfahren zur Berechnung heisst «numerische Integration».
- Stabilitätsanalyse:** Untersuchung des Stabilitätsverhaltens eines Systems. Ziel ist es, Gleichgewichtslagen zu finden und deren Eigenschaften zu untersuchen. Beispiel: Eine Magerwiese weist eine bestimmte Pflanzengesellschaft auf. Nun wird eine hohe Düngergabe verabreicht. Mit Hilfe einer Stabilitätsanalyse kann nun untersucht werden, ob sich nach 50 Jahren wieder die gleiche Pflanzengesellschaft etabliert, oder ob die Pflanzengesellschaft irreversibel verändert wurde.
- System:** Menge von Elementen, die miteinander in (enger) Beziehung stehen.
- Systemanalyse:** Wissenschaft der Erforschung von Systemen. Modellierung und Simulation gehören dabei zu den wichtigsten Werkzeugen.
- Validierung:** Vergleich von Simulationsresultaten mit experimentellen Daten. Es sollten dazu Daten verwendet werden, die nicht schon bei der Entwicklung des Modells eingesetzt wurden. Die Validierung ist die eigentliche Überprüfung des Modells. Die Validität kann immer nur in einem bestimmten Umfeld überprüft werden, das heisst, dass das Modell auch nur unter den geprüften Bedingungen anwendbar ist. Beispielsweise kann ein Modell für das Wachstum von Sommerweizen unter Schweizer Bedingungen entwickelt und erfolgreich geprüft werden; ein solches Modell wird möglicherweise unter tropischen Bedingungen komplett versagen.

einer Klimaänderung auf das Dauergrünland in der Schweiz, vdf Hochschulverlag AG, ETH, Zürich, 311 S.

Nemecek T., Derron J. O., Schwärzel R., Fischlin A. et Roth O., 1994. Un modèle de simulation au service des producteurs de plants de pommes de terre. *Revue suisse Agric.* 26, 17-20.

Nemecek T., Derron J. O., Schwärzel R., Goy G. et Fivaz Ch., 1995. Modèle épidémiologique des virus de la pomme de terre: validation et application pour la prévision. *Revue suisse Agric.* 27, 351-356.

Penning de Vries F.W.T. and Rabbinge R., 1995. Models in research and education, planning and practice. In: Haverkort, A.J. & MacKerron, D.K.L. (eds.): Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1-18.

Van Keulen H. und Seligman N.G., 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. PUDOC, Wageningen, 310 p.

RÉSUMÉ

Les modèles de simulation dans l'agriculture

Les modèles de simulation représentent la réalité d'une manière simplifiée. Ils nous permettent d'analyser et de mieux comprendre des interac-

tions complexes. Quelques caractéristiques essentielles des modèles et de la simulation sont décrites dans cet article. Trois exemples d'application dans l'agriculture sont donnés: le système TuberPro permet de prévoir le rendement et l'infection virale des plants de pommes de terre et d'optimiser ainsi les dates de défanage. Une autre étude de simulation estime l'effet du changement du climat sur les prairies. Dans la sélection créatrice de variétés, les modèles peuvent être utilisés pour l'optimisation des stratégies de sélection.

SUMMARY

Simulation models in agriculture

Simulation models are a simplified representation of reality. They allow us to investigate and to better understand complex relationships. Some essential features of models and simulation are shown in this paper. Three examples of application in agriculture are given: the system TuberPro allows to forecast yield and virus infection of seed potatoes and to optimize haulm destruction dates. A simulation study of another model estimates the effect of climate change on grassland. Models can also be used in crop breeding to optimize breeding strategies.

KEY WORDS: Modelling, simulation, agriculture, forecasting