

Umwelt

Klimawandel und landwirtschaftliche Produktion

Pierluigi Calanca, Jürg Fuhrer, Karsten Jasper, Daniele Torriani, Franziska Keller und Sibylle Dueri, Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, CH-8046 Zürich

Auskünfte: Pierluigi Calanca, E-Mail: pierluigi.calanca@fal.admin.ch, Fax +41 (0)44 377 72 01, Tel. +41 (0)44 377 75 12

Zusammenfassung

Der bevorstehende Klimawandel könnte auch für die Schweizer Landwirtschaft zu einer grossen Herausforderung werden. Wichtige Fragen in diesem Zusammenhang betreffen das Ausmass der Klimaänderung, die Auswirkungen des Klimawandels auf heutige Agrarökosysteme und die Möglichkeiten, welche der Landwirtschaft für eine gezielte Anpassung zur Verfügung stehen. Die Beantwortung dieser Fragen ist Ziel des Projekts «GRASS – Climate Change and Food Production», das Agroscope FAL Reckenholz 2001 als Beitrag zum Nationalen Forschungsschwerpunkt (NFS) Klima lanciert hat.

Die Untersuchungen der ersten vier Forschungsjahre haben sich an die Klimaszenarien des «Intergovernmental Panel on Climate Change» gehalten. Die Resultate zeigen, dass in der Schweiz mit einer grösseren Variabilität des regionalen Klimas zu rechnen ist. Von der neuen Situation profitieren dürften die Futterpflanzen, wogegen die Auswirkungen auf das Sommergetreide ohne Anpassung der Sorten eher negativ ausfallen könnten. Das steigende Risiko für Dürreperioden wird eine bessere Absicherung der Betriebseinnahmen erfordern. Die Erarbeitung und Umsetzung von Anpassungsstrategien für die Bewirtschaftung wird in der zweiten Phase von GRASS an Bedeutung gewinnen.

Vor kurzem haben Stott *et al.* (2004) in der Zeitschrift «Nature» zum ersten Mal die Frage aufgeworfen, ob sich die Gefahr von Hitzewellen wie diejenige vom Sommer 2003 durch den bisherigen Ausstoss von Treibhausgasen bereits vergrössert hat. Die Autoren kommen zum Schluss, dass der menschliche Einfluss auf das Klima in den vergangenen 150 Jahren das Risiko solcher Ereignisse mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % bereits verdoppelt hat.

Klima als nationaler Forschungsschwerpunkt

Dieses Beispiel illustriert, wie aktuell das Thema «Klima und vom Menschen verursachte Klimaänderung» ist. Nicht zuletzt den Berichten des Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen, dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001), den internationalen Auseinandersetzungen im Zusammenhang mit dem Kyoto-Proto-

koll und der Diskussion um die CO₂-Abgabe in der Schweiz ist das Interesse der Öffentlichkeit für die Problematik der globalen Erwärmung zu verdanken. Der Schweizerische Nationalfonds hat die wissenschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung des Themas erkannt und 2001 den Nationalen Forschungsschwerpunkt (NFS) Klima mit Sitz an der Universität Bern gegründet.

Die Ziele dieses Forschungsschwerpunkts sind:

- das Klima und seine Variabilität besser zu verstehen;
- die möglichen Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft zu analysieren;
- ökonomisch vertretbare Wege zur Minimierung des Ausstosses von Treibhausgasen zu zeigen;
- Optionen für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Anpassung zu erkunden.

Die Forschung ist auf elf Institutionen aus der ganzen Schweiz verteilt, die in vier thematischen Arbeitsgruppen organisiert sind:

- Rekonstruktion des vergangenen Klimas;
- Simulation des zukünftigen Klimas;
- Auswirkungen des Klimawandels auf Agrar- und Waldökosysteme;
- Beurteilung und Absicherung der ökonomischen Risiken.

Wie bei allen anderen Nationalen Forschungsschwerpunkten, geht es auch beim NFS Klima primär um die Grundlagenforschung. Der Nationalfonds hat aber von Anfang an die Bewilligung der Kredite von der Erfüllung zweier weiterer Bedingungen abhängig gemacht, nämlich von der Förderung der institutionellen Zusammenarbeit und des wissenschaftlichen Nachwuchses. Aus diesem Grund organisieren die Verantwortlichen des NFS Klima jedes Jahr eine einwöchige Sommerschule, die jeweils einen Aspekt des Klimawandels mit Vorträgen und Workshops durchleuchtet. Die Veranstaltung steht Doktorierenden und neu Promovierten aus der ganzen Welt offen.

Agroscope FAL Reckenholz beteiligt sich am NFS Klima mit dem Projekt «GRASS – Climate Change and Food Production», das Teil des Arbeitsprogramms «Ecosystems Impacts and Adaptation» ist. Weitere Pro-

jekte, die mit GRASS in Verbindung stehen, sind an folgenden Instituten angesiedelt: Institut für Pflanzenwissenschaft der Universität Bern, an den Instituten für Agrarwirtschaft, für Pflanzenwissenschaft, für Waldökologie und für Terrestrische Ökologie der ETH Zürich, am Institut für Geographie der Universität Zürich und am botanischen Institut der Universität Basel.

Im Folgenden zeigen wir ausgewählte Resultate unserer Forschungsarbeiten. Es handelt sich nicht um eine ausführliche Darstellung, sondern viel mehr um einen Versuch, den regionalen Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Produktivität landwirtschaftlicher Kulturen exemplarisch darzustellen.

Das Klima der Schweiz im 21. Jahrhundert

Welche Folgen werden die ansteigenden Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre für das Schweizer Klima haben? Um diese Frage zu beantworten, haben wir während der ersten Phase von GRASS hauptsächlich mit Klimaszenarien des IPCC gearbeitet. Für unsere Betrachtungen haben wir insgesamt 18 Szenarien berücksichtigt, die ein breites Spektrum sowohl von Klimamodellen als auch von Emissionsszenarien abdecken.

Die Szenarien des IPCC sind global und weisen eine räumliche Auflösung von rund 200 mal 200 Kilometer auf. Diese Auflösung reicht nicht aus, um der räumlichen Variabilität des Schweizer Klimas Rechnung zu tragen. Ausgehend vom IPCC-Datenmaterial haben wir deshalb in Zusammenarbeit mit der Universität Bern regionale Szenarien für Temperatur und Niederschlag abgeleitet (Gyalistras 2002), welche die Schweiz in einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometer abdecken.

Dabei haben wir zwei Regionalisierungsmethoden eingesetzt. Die erste Methode beschränkt sich auf eine einfache räumliche Interpolation der globalen Gitterpunktdaten. Im Gegensatz dazu verwendet das so genannte statistische Down-Scaling empirische Beziehungen zwischen lokal gemessenen Grössen und der grossräumigen Verteilung von Druck und Temperatur. Hinter dem statistischen Down-Scaling steckt die Idee, anhaltende Muster der bisher beobachteten Klimavariabilität für die Betrachtung der Zukunft anzuwenden (von Storch and Zwiers 1999).

Zusammenfassend sind für die Schweiz folgende Veränderungen zu erwarten:

- eine Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts mit einer Zunahme von heute 380 ppm auf 550 bis 970 ppm CO₂ im Jahr 2100;

- eine generelle Temperaturerhöhung bis 2100 um 1 bis 7 °C, je nach Szenario und Jahreszeit mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit, dass die Erhöhung zwischen 3 bis 5 °C betragen wird;

- feuchtere Winter, mit einer Zunahme des Niederschlags um 10 bis 20 %. Wegen der Temperaturerhöhung werden vor allem die Regenfälle zunehmen.

- tendenziell trockenere Sommer. Je nach Szenario und Gebiet beträgt die relative Änderung der Sommerniederschläge zwischen plus fünf und minus 60 %.

- eine Zunahme der Jahr-zu-Jahr-Variabilität und von Extremereignissen.

Die Auswirkungen der Klimaänderung aufspüren

Viele Erkenntnisse über die Auswirkungen von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die

Vegetation wurden in der Vergangenheit aus gezielten Feld- oder Laborexperimenten gewonnen. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das 10-jährige Experiment der ETH in Eschikon (Lüscher *et al.* 1995). Bei solchen Versuchen werden die Klimabedingungen «im Kleinen», das heisst auf einer Skala von maximal einigen Metern, künstlich verändert und das Ansprechverhalten der Pflanzen über eine relativ kurze Zeit erfasst.

Um die langfristigen Reaktionen der Ökosysteme zu betrachten, wird seit einiger Zeit auch vermehrt mit mathematischen Modellen gearbeitet. Sie erlauben es, aufgrund von physikalischen Gesetzmässigkeiten eine zeitliche und räumliche Extrapolation vorzunehmen.

Für das Projekt GRASS haben wir insgesamt vier solche Modelle eingesetzt:

- «PaSim» (Riedo *et al.* 1998), ein Modell zur Berechnung der Stoff- und Energieflüsse in Graslandökosystemen;

- «WaSim-ETH» (Jasper *et al.* 2004), ein räumlich verteiltes, hydrologisches Modell zur Berechnung des regionalen Wasserhaushalts;

- «CropSyst» (Stöckle *et al.* 1994), ein Produktivitätsmodell zur Simulation des Ertrags verschiedener Ackerkulturen;

- «CH-Farm» (Dueri *et al.*, eingereicht), ein Modell zur Berechnung der Stickstoffflüsse auf der Betriebsebene.

Mit Hilfe dieser Modelle haben wir in der ersten Phase von GRASS primär versucht, die Auswirkungen der Klimaänderung auf die potenzielle Produktivität und auf die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit im Boden konkret darzustellen.

Abb. 1. Photosynthetische Leistung von Weizen (durchgezogene Linie) und Mais (gestrichelte Linie) bei verschiedenen Konzentrationen des atmosphärischen CO₂. Modifiziert nach Rosenzweig und Hillel (1998).

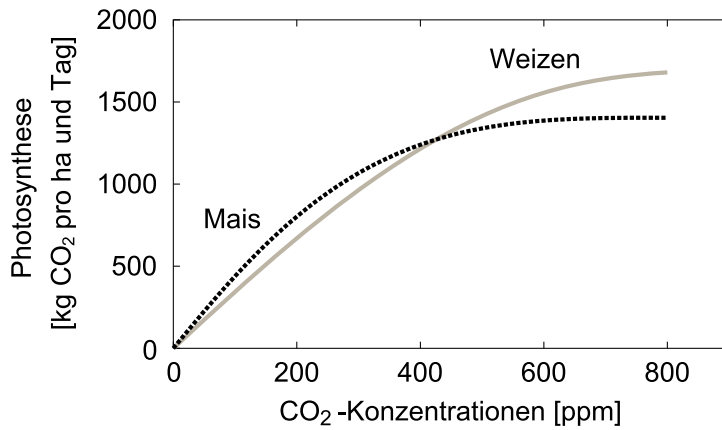
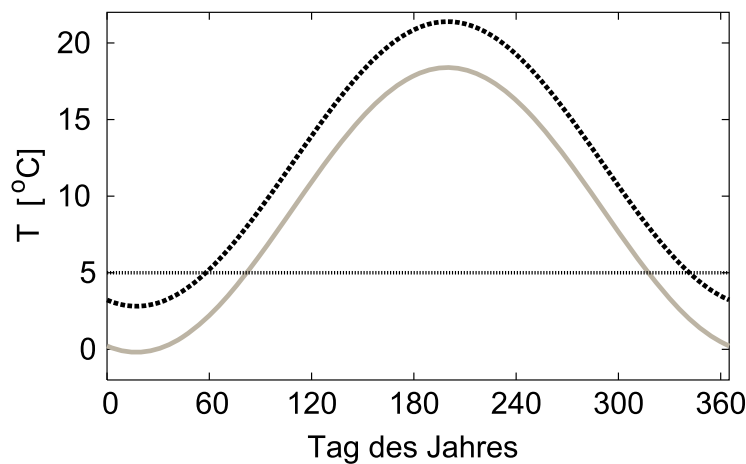


Abb. 2. Mittlerer Jahresgang der Temperatur an der Station Bern-Liebefeld, in der Gegenwart (durchgezogene Linie) und nach einer Zunahme der Jahrestemperatur um 3 °C (gestrichelte Linie). Die Periode, in der die Temperatur über 5 °C liegt, definiert in vielen Graslandmodellen die Vegetationsperiode von Wiesen und Weiden.



Potenzielle Produktivität der Kulturen

Die potenzielle Produktivität von Wiesen, Weiden und Ackerkulturen wird insgesamt vom Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen profitieren können (Führer 2003). Bei heutigen Sorten und Anbautechniken und abgesehen von einer möglichen

Akklimatisierung der Pflanzen an die erhöhten CO₂-Konzentrationen, könnte die Steigerung der Produktivität bei einer Verdoppelung des atmosphärischen CO₂ rund 30 % bei C3-Pflanzen, zum Beispiel Weizen, und 10 % bei C4-Pflanzen, zum Beispiel Mais, betragen (Abb. 1; Rosenzweig and Hillel 1998).

Abb. 3. Um eine gute Produktivität zu gewährleisten, muss sich die Landwirtschaft an die neuen Klimabedingungen anpassen. Dies gilt insbesondere für den Ackerbau. Im Gegensatz zur Situation in der Graswirtschaft, hat eine Erhöhung der Temperatur beim Sommergetreide eher negative Auswirkungen. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope FAL Reckenholz)



Das Potenzial der Grünlandproduktion wird zudem durch höhere Temperaturen begünstigt. Pro Grad Anstieg der Jahrestemperatur verfrüht sich der Beginn der Vegetationsperiode um sechs bis sieben Tage, während sich das Ende um gleich viele Tage verzögert. Bei einer Zunahme der Jahrestemperatur um 3 °C verlängert sich somit die Vegetationsperiode von Wiesen und Weiden in tiefen und mittleren Höhenlagen um 30 bis 40 Tage (Abb. 2). Vereinfachend bedeutet dies, dass für die Wiesen ein zusätzlicher Schnitt pro Jahr möglich wird.

Ein weiterer Faktor zugunsten der Produktivität von Wiesen und Weiden ist der durch die Temperaturerhöhung hervorgerufene Rückgang der Schneedecke. Unsere Simulationen zeigen für das Zeitfenster von 2071 bis 2100 eine Hebung der mittleren Schneelinie um 300 bis 600 Meter und eine frühere Ausaperung der schneebedeckten Flächen im Frühling um fünf bis acht Wochen (Jasper *et al.* 2004). Dies lässt darauf schließen, dass die Bewirtschaftung der hochgelegenen Wiesen wesentlich früher angesetzt werden könnte.

Im Gegensatz zur Situation in der Graswirtschaft hätte eine Erhöhung der heute herrschenden Temperaturen bei Ackerkulturen und insbesondere beim Getreide eher negative Auswirkungen (Abb. 3). Es ist anzunehmen, dass ohne eine Anpassung der Sorten die erwartete Erwärmung zu einer Verminderung der Assimilation und einer Beschleunigung von Wachstum, Kornfüllung und Reifung führen wird (Rosenzweig and Hillel 1998). Simulationen mit «CropSyst» zeigen zum Beispiel, dass sich bei einer Temperaturzunahme von 3 °C die gesamte Entwicklungszeit von Sommergetreide bis zur Ernte um 15 bis 20 Tage

verkürzt (Abb. 4), dies bei möglichen Produktivitätsverlusten in der Grössenordnung von 10 %.

Den Pflanzen geht das Wasser aus

Ob die potenzielle Produktivität in der Praxis erreicht wird oder nicht, hängt in erster Linie von der Verfügbarkeit von Wasser im Boden ab. Produktivitätseinbußen treten auf, wenn die Pflanzen unterversorgt sind, das heisst wenn der Bodenwassergehalt im Mittel der Vegetationsperiode weniger als etwa 50 % der nutzbaren Feldkapazität beträgt. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts könnte dieser Fall regelmässig eintreten, sowohl im Mittelland und in den voralpinen Gebieten als auch auf der Alpenseite. Allerdings wird auch in Zukunft das Ausmass der Trockenheit von Landnutzung, Bodeneigenschaften und topographischen Gegebenheiten abhängig sein.

Sinkt der mittlere Bodenwassergehalt noch weiter, dann ist von extremer Trockenheit beziehungsweise von Dürre die Rede. Dieser Fall trat während dem Hitzesommer 2003 in vielen Gebieten Europas ein. Eine zusätzliche Bewässerung der Kulturen konnte nur begrenzt vor grösseren Schäden bewahren, was sich in den Gesamtverlusten der Schweizer Landwirtschaft in der Grössenordnung von 500 Millionen Franken zeigt. Nach unseren Analysen (Calanca 2004) beträgt die Wahrscheinlichkeit von Sommerdürren im Schweizer Mittelland unter heutigen Klimabedingungen rund 15 % (Abb. 5). Künftig könnte sie aber bis auf 50 % steigen, wenn man von einer Abnahme der Niederschlagshäufigkeit von 20 % ausgeht (Abb. 6).

Auch die Luft wird trockener

Alle Szenarien deuten an, dass mit dem Anstieg der Temperatur auch das Wasserdampfdefizit

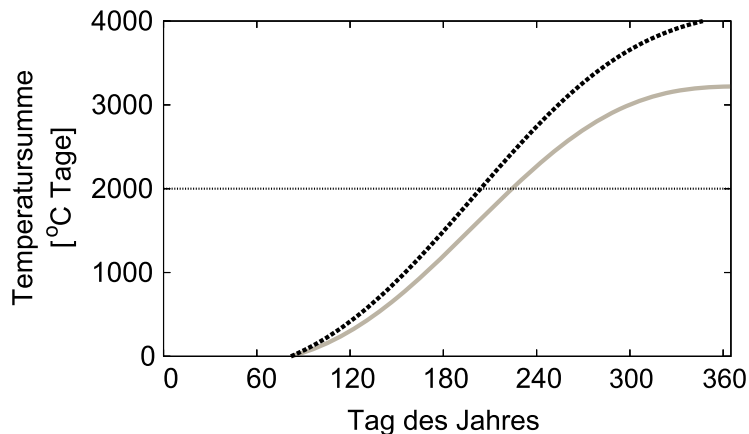


Abb. 4. Mittlerer Jahresgang der Temperatursumme an der Station Bern-Liebefeld, in der Gegenwart (durchgezogene Linie) und nach einer Zunahme der Jahrestemperatur um 3 °C (gestrichelte Linie). Die Temperatursumme dient als Mass der phänologischen Entwicklung von Ackerkulturen. In diesem Beispiel werden Aussaat und Reife bei Tag 80 und 2000 °C Tage angesetzt.

der Luft zunehmen wird. Dies könnte durchaus positive Effekte auf die Graswirtschaft haben, da hohe Dampfdruckdefizite die Abtrocknung von Emd und Heu im Feld begünstigen (Luder 1996) und somit für eine höhere Qualität des Futters sorgen.

Hingegen würde die Zunahme des Dampfdruckdefizits der Luft die negativen Auswirkungen

höherer Temperaturen auf die Produktivität von Sommergetreide noch verstärken. Während heute im Mittelland das mittlere Dampfdruckdefizit der Monate Juni, Juli und August rund sieben Hektopascal beträgt, könnte derselbe gegen Ende des Jahrhunderts auf im Mittel über zehn Hektopascal steigen. Berechnungen mit «CropSyst» haben gezeigt (Torriani *et al.*, in

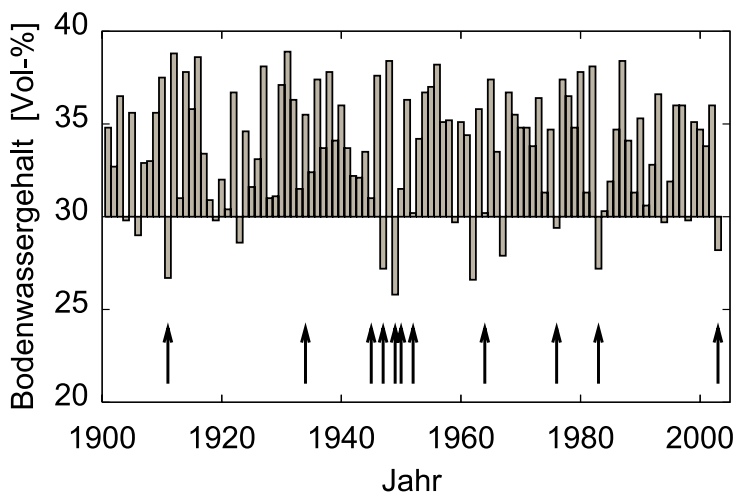


Abb. 5. Rekonstruktion des mittleren Bodenwassergehalts der Monate Juni, Juli und August an der Station Bern-Liebefeld für den Zeitraum 1900 bis 2003. In diesem Beispiel liegt der Schwellenwert für das Auftreten von extremer Trockenheit bei 30 Volumen-Prozent. Die Pfeile zeigen dokumentierte Dürresommer an (Calanca 2004).

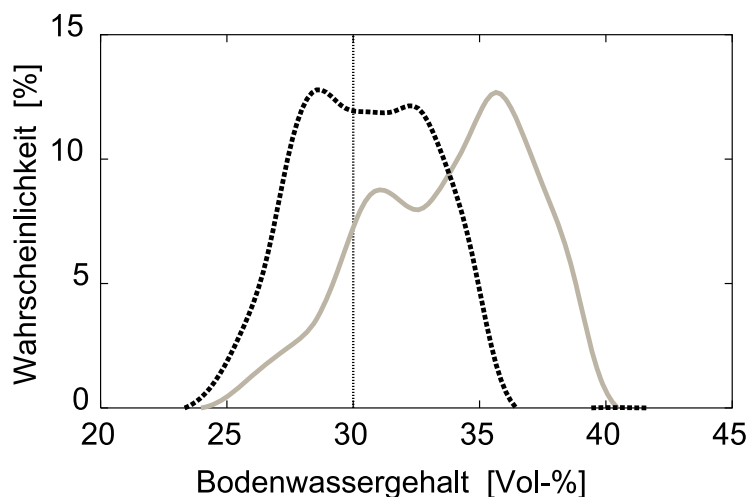


Abb. 6. Wahrscheinlichkeitsverteilung des mittleren Bodenwassergehalts der Monate Juni, Juli und August unter gegenwärtigen Klimabedingungen (durchgezogene Linie) und bei einer Erhöhung der Jahrestemperatur um 3 °C (gestrichelte Linie). Zudem wurde eine Abnahme der Häufigkeit von Niederschlagsereignissen um 20 % und eine Zunahme der Globalstrahlung um 10 % angenommen.

Vorbereitung), dass unter diesen Umständen die Strahlungsnutzungseffizienz der Ackerkulturen bis auf die Hälfte des Optimums zurückgehen könnte. Die Strahlungsnutzungseffizienz kann als Verhältnis zwischen der kumulierten Biomasse und der dafür gebrauchten Strahlungsmenge definiert werden. Sie ist bei optimalen Verhältnissen ungefähr konstant.

Klimawandel und Landwirtschaft

Ohne Zweifel stellt die globale Erwärmung für die einheimische Landwirtschaft eine grosse Herausforderung dar, denn die klimatischen Bedingungen werden sich auch bei uns grundlegend verändern. Die Landwirtschaft wird sich insbesondere mit einer grösseren Variabilität der Witterung auseinandersetzen müssen. Das bedeutet zunehmende Schwankungen der Jahreserträge, was wiederum eine verbesserte Absicherung der Betriebseinnahmen erfordern könnte.

Als eine solche Massnahme scheint sich die grossflächige Einführung von Bewässerungsanlagen anzubieten, um Ernteverluste als Folge von extremer Trockenheit vorzubeugen. Ob eine solche kostenintensive Massnahme überhaupt realisierbar ist, kann erst nach eingehender Beurteilung der Kostenentwicklung

entschieden werden, wobei die verschärfte Konkurrenzsituation mit anderen Wirtschaftskreisen bezüglich Wasser berücksichtigt werden muss. Ausserdem zeigten die zunehmenden Probleme der Landwirtschaft Spaniens während der Dürre im Sommer 2005, dass eine flächendeckende Bewässerung beim mehrjährigen Anhalten einer Trockenphase auch an die technischen Grenzen stösst.

Häufig wird der Klimawandel in einem pessimistischen Tonfall diskutiert (Abb. 7). Es ist eine wichtige Aufgabe von Forschungsprogrammen wie dem NFS Klima, auch positive Aspekte aufzuzeigen. Die erwähnten günstigeren Bedingungen im Futterbau sowohl für die Produktivität der Wiesen als auch für die Qualität des Futters sind solche positiven Auswirkungen. Das Potenzial für eine verbesserte Produktion könnte durch gezielte Anpassungen sogar noch grösser sein als oben dargestellt. Darauf deuten zum Beispiel die Ergebnisse der kürzlich veröffentlichten Arbeit von Luder und Moriz (2005) hin.

Auch im Ackerbau bestehen Optionen zur Verbesserung der Produktion. Häufig erwähnt wird die Einführung beziehungsweise die Züchtung von Wärme liebenden Kulturen oder Sorten, die für ein optimales Wachstum höhere Temperaturen brauchen und gegen Hitzestress widerstandsfähiger sind (Rosenzweig and Hillel 1998). Es ist sogar denkbar, dass in gewissen Regionen mit einer gezielten Anpassung der Feldbestellung zwei Ernten pro Jahr möglich werden könnten.

GRASS und NFS Klima: Wie geht es weiter?

Die genauere Betrachtung von Anpassungsoptionen ist ein wichtiges Ziel für die zweite Phase von GRASS. Diese Arbeit werden wir in enger Zusam-

menarbeit mit dem Institut für Agrarwirtschaft der ETH durchführen. Das Augenmerk wird sich speziell auf Biobrennstoffe richten, da sie derzeit auf reges Interesse stossen.

Vertiefende Untersuchungen zu den Auswirkungen von häufiger werdenden Extremereignissen werden weiterhin im Zentrum stehen. Ein weiterer Beitrag wird Agroscope FAL Reckenholz bei der Modellierung des Stoffhaushalts im Boden leisten. Hierfür werden die Resultate von Feldexperimenten der Universität Bern, der ETH Zürich und der Universität Zürich zur Verbesserung des Grasland-Modells «PaSim» eingesetzt. Solche Verbesserungen sind dringend nötig, um langfristige Veränderungen im Kohlenstoffgehalt von Wiesen und Weiden besser quantifizieren zu können. Auf dem Weg in diese Richtung wird Agroscope FAL Reckenholz von der Beteiligung an verschiedenen EU Projekten profitieren können.

Die nationale und regionale Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft bleibt auch für die zweite Phase des NFS Klima wichtig. Zunehmend an Gewicht gewinnen wird die lokale Skala, da für die Erarbeitung und Umsetzung von Anpassungsstrategien die Wahl standortgerechter Kulturen von zentraler Bedeutung ist.

Detaillierte Angaben zum Nationalen Forschungsschwerpunkt Klima sind unter <http://www.nccr-climate.unibe.ch> zu finden.

Literatur

- Calanca P., 2004. Interannual variability of summer mean soil moisture conditions in Switzerland during the 20th century: A look using a stochastic soil moisture model. *Water Resour. Res.* **40**, W12502, doi:10.1029/2004WR003254.

Abb. 7. Klimawandel wird oft als Bedrohung wahrgenommen, wie dunkle Wolken am Himmel. Es ist eine Aufgabe vom NFS Klima zu zeigen, dass die Klimaänderung auch positive Auswirkungen haben kann. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope FAL Reckenholz)



- Dueri S., Calanca P & Fuhrer J., 2005. Climate change alters farm nitrogen use efficiency – A Swiss case study with a dynamic farm model. Submitted to *Agricultural Systems*.
- Fuhrer J., 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agric. Ecosyst. Environment* **97**, 1-20.
- Gyalistras D., 2002. An uncertainty analysis of monthly temperature and precipitation scenarios for Switzerland. Internal report, Climatology and Meteorology Research Group, University of Bern, 16 S. Zugang: <http://www.climate-impacts.ch> [18.7.2005].
- Jasper K., Calanca P., Gyalistras D. & Fuhrer J., 2004. Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Clim. Res.* **26**, 113-129.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001. Climate Change 2001. Cambridge University Press, Cambridge. Vol. A: The Scientific Basis. Vol. B: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Vol. C: Mitigation.
- Luder W., 1996. Wetterrisiko und verfügbare Feldarbeitstage in der Schweiz. FAT-Berichte 490, FAT Tänikon, 9 S.
- Luder W. & Moriz C., 2005. Raufutterernte: Klimaerwärmung besser nutzen. FAT-Berichte 634, FAT Tänikon, 8 S.
- Lüscher A., Rüegg K. & Nösberger J., 1995. CO₂-Reaktion von Wiesenpflanzenarten und Genotypen. *Agrarforschung* **2(11+12)**, 500-503.
- Riedo M., Grub A., Rosset M. & Fuhrer J., 1998. A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling* **105**, 141-183.
- Rosenzweig C. & Hillel D., 1998. Climate Change and the Global Harvest. Oxford University Press, New York, 324 S.
- Stöckle C.O., Martin S. & Campbell G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* **46**, 335-359.
- Stott P.A., Stone D.A. & Allen M.R., 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* **432**, 610-614.
- Torriani D., Calanca P. & Fuhrer J., in prep. Effects of water vapour pressure deficit and soil moisture availability on the productivity of maize in Switzerland.
- Von Storch H. & Zwiers F.W., 1999. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge, 484 S.

RÉSUMÉ

Changements du climat et production agricole

Les changements climatiques à venir pourraient représenter un défi pour l'agriculture suisse. Dans ce contexte les questions qui se posent sont celles qui concernent l'ampleur des changements, leurs effets sur les écosystèmes agricoles et les possibilités d'adaptation qui s'offrent à l'agriculture. Trouver une réponse à ces questions est le but de «GRASS – Climate Change and Food Production», un projet de recherche lancé par Agroscope FAL Reckenholz en tant que contribution au Pôle de recherche national (PRN) sur le climat.

Les analyses des quatre premières années de recherche se sont orientées vers les scénarios climatiques de l'«Intergovernmental Panel on Climate Change». Les résultats donnent pour la Suisse une augmentation de la variabilité du climat à l'échelle régionale. Les cultures fourragères devraient pouvoir profiter de la nouvelle situation, tandis que les effets sur les céréales de printemps seront, sans adaptation des cultures, plutôt négatifs. Le risque de sécheresse sera plus élevé. Ceci demandera une meilleure protection des revenus des entreprises. La discussion des possibilités de réorganisation des exploitations sera au centre de la recherche dans la deuxième phase de GRASS.

SUMMARY

Climate change and agricultural production

The shift in climatic conditions expected for the coming decades could become a major challenge for the Swiss agriculture. Relevant questions in this context concern the extent of the regional climate changes, their impact on agricultural ecosystems and the possibility for agriculture to adapt to the new conditions. Providing an answer to these questions is the main goal of «GRASS – Climate Change and Food Production», a project initiated in 2001 by Agroscope FAL Reckenholz as a contribution to the National Centre of Competence in Research (NCCR) on Climate.

The analyses carried out during the first four years have been based on climate scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The results indicate an enhancement of climatic variability at the regional scale. Feed growing could take advantage of the new situation whereas, without adaptation, negative impacts are expected in the cropping of spring corn. The increase in the risk of droughts will require a better hedging of farm incomes. Consideration of the possibilities for the reorientation of farming systems will play a key role in the second phase of GRASS.

Key words: climate change, climate variability, droughts, feed dropping, arable crops, NCCR Climate.