

Wie sich der Klimawandel auf den Maisanbau in der Schweiz auswirkt

Annelie Holzkämper und Jürg Fuhrer

Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: Annelie Holzkämper, E-Mail: annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch



Mit dem Klimawandel wird das Ertragspotenzial für Mais im Mittelland zunehmend durch Hitzestress und eine Beschleunigung der phänologischen Entwicklung eingeschränkt. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

Einleitung

Der Klimawandel erfordert Anpassungen in der Landwirtschaft, um Risiken zu minimieren und neue Chancen zu nutzen (BLW 2011). Unsicherheiten in Klimaprojektionen erschweren aber die Vorhersage der Auswirkungen und damit die Priorisierung von Massnahmen. Deshalb sind robuste Massnahmen zur Erhöhung der Klimaresilienz von Anbausystemen nötig. Dazu gehört die Standort- und Sortenwahl, die im Zuge einer Veränderung der Klimaeignung angepasst werden muss. Trends in der Klimaeignung der letzten Jahrzehnte sind für Weizen und Mais bereits dokumentiert (Holzkämper *et al.* 2015). Ziel der vorliegenden Arbeit war es nun, künftige Verschiebungen in der Klimaeignung aufgrund von Temperaturänderungen am Beispiel von Mais flächendeckend zu analysieren,

sowie die Veränderungen in der Bedeutung verschiedener Klimafaktoren für einzelne Standorte zu bestimmen.

Material und Methoden

Klimadaten

Als Grundlage für die regionale Bewertung der aktuellen Klimaeignung dienten die gegitterten Temperatur- und Niederschlagsdaten von MeteoSchweiz für den Zeitraum 1983–2010 (Frei und Schär 1998; Frei *et al.* 2006; MeteoSchweiz 2012). Globalstrahlungsdaten waren für 2004–2010 von MeteoSchweiz (Stöckli 2013) und für 1983–2003 von CM SAF (*Satellite Application Facility on Climate Monitoring*, Posselt *et al.* 2012) verfügbar. Für die Bewertung der Klimaeignung an ausgewählten Standorten dienten die Stationsdaten aus dem Messnetz von Meteoschweiz.

Klimaszenarien

Als Grundlage für die Berechnung von Verschiebungen in der Klimateignung dienten die gegitterten Daten für die Änderung der Mitteltemperatur des C2SM (*Center for Climate Systems Modeling*, ETH Zürich; Zubler *et al.* 2014). Dieser Datensatz umfasst Werte für jeden Tag des Jahres in einer Auflösung von etwa zwei Kilometern für die gesamte Schweiz. Änderungen im Niederschlag liegen im gleichen Massstab vor, aber nicht in direkter Verbindung mit der Temperaturänderung. Betrachtet wurden deshalb allein Temperaturänderungen abgeleitet aus zwanzig Klima-Modellketten (als Median der Änderung relativ zur Referenz 1983–2010) für drei Zeithorizonte (2020–2049, 2045–2074 und 2070–2099) ausgehend vom A2-Emissionsszenario. Dieses Szenario beruht auf der Annahme einer Zunahme der globalen Bevölkerung und der Verwendung fossiler Energieträger und damit auf einer starken Zunahme der Treibhausgase (*Business-as-Usual*-Szenario, IPCC 2007).

Die Verwendung von kombinierten Temperatur- und Niederschlagsänderungen war für ausgewählte Standorte möglich. Dazu wurden die Projektionen aus zehn Klima-Modellketten verwendet (Fischer *et al.* 2011; Bossard *et al.* 2011). Die jahreszeitlichen Bereiche der Änderung sind in Abbildung 1 für Zürich-Reckenholz und Changins dargestellt. Hier wurde zusätzlich das RCP3PD-Szenario betrachtet, dem die Annahme einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 50 % zugrunde liegt (van Vuuren *et al.* 2012).

Bewertung der Klimateignung

Die Bewertung der Klimateignung für Mais wurde mit Hilfe einer kürzlich entwickelten Methode durchgeführt (Holzkämper *et al.* 2013; Abb. 2). Sie basiert auf der Einteilung des Wachstumszyklus in vier Phasen: (i) Aussaat bis Keimung, (ii) Keimung bis Beginn der Blüte, (iii) Blühperiode und (iv) Reifungsphase. Das Eintreten dieser Phasen wird anhand von Temperatursummen dynamisch bestimmt (Tab. 1). Der Saattermin wird für einen festgelegten Zeitraum (15. April–31. Mai) ebenfalls dynamisch bestimmt; er tritt ein, wenn die mittlere Temperatur über die letzten zehn Tage 12 °C übersteigt. >

Zusammenfassung

Die globale Erwärmung verändert die Bedingungen für den Pflanzenbau, was hier anhand der Klimateignung für Mais flächendeckend für die Schweiz untersucht wurde. Dazu wurden gegitterte Daten¹ der Temperaturänderung für drei Zeithorizonte (2020–49, 2045–74, 2070–99) benutzt, die aus zwanzig Klima-Modellketten für das A2-Emissionsszenario (*Business-as-Usual*-Szenario) zur Verfügung standen. Mit der Klimaerwärmung dehnt sich die geeignete Anbaufläche in höheren Lagen aus und nimmt in tieferen Lagen längerfristig ab. In einem zweiten Teil wurde der Einfluss einzelner Klimafaktoren auf die Klimateignung anhand von kombinierten Temperatur- und Niederschlagsszenarien aus zehn Modellketten für die Standorte Zürich-Reckenholz und Changins untersucht. Hitzestress und eine beschleunigte Pflanzenentwicklung begrenzen die Klimateignung an beiden Standorten zunehmend, während die Beeinträchtigung durch Trockenheit während der Reifung nur am Westschweizer Standort deutlich steigt. Allerdings spielt dabei auch die zeitliche Verschiebung der Pflanzenentwicklung eine Rolle, da durch Verkürzung der Wachstumsphasen das Risiko von Trockenstress gemindert werden kann. Die Ergebnisse dieser Untersuchung liefern – trotz Unsicherheiten in Bezug auf die längerfristige Klimaentwicklung – Hinweise für die Planung von Standort- und Sortenwahl als Massnahme zur Klimaanpassung.

¹Räumlich interpolierte Daten mit Rasterauflösung von ca. 2km.

Tab. 1 | Für die Modellierung der Phänologie von Körnermais verwendete Temperatursummen (Basistemperatur = 6 °C), sowie mittlere Eintrittstermine basierend auf den Klimadaten von 15 Stationen im Mittelland für den Zeitraum 1981–2010 (Holzkämper *et al.* 2013).

Phänologische Stadien	Temperatursumme in Grad-Tagen	Mittlere Eintrittstermine
Auflaufen	100	~ 18. Mai
Beginn der Blüte	800	~ 24. Juli
Ende der Blüte	1100	~ 15. August
Reife	1600	~ 11. Oktober

Tab. 2 | Klimafaktoren zur Bestimmung der phasenspezifischen Limitierung für Körnermais

Faktor	Beschreibung	Einheit
Frost	Mittlere tägliche Minimaltemperatur $T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	[$^{\circ}\text{C}$]
Wachstumstemperatur	Mittlere Tagestemperatur T_{mean}	[$^{\circ}\text{C}$]
Hitzestress	Mittlere tägliche Maximaltemperatur $T_{max} > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	[$^{\circ}\text{C}$]
Wasserstress	Mittlere tägliche Wasserverfügbarkeit (= Niederschlagsmenge – ET_0)	[mm]
Strahlung	Mittlere tägliche Globalstrahlung	[MJ m^{-2}]
Phasenlänge	Länge der phänologischen Phase	[Anzahl Tage]

ET_0 = Referenzverdunstung nach Priestley-Taylor

In jeder Phase werden sechs Klimafaktoren berücksichtigt, welche die Anbaueignung limitieren können (Tab. 2). Bei Wachstumstemperatur, Wasserstress und Phasenlänge kann der optimale Wertebereich sowohl unter- als auch überschritten werden. Die Abhängigkeit der Klimaeignung von diesen Klimafaktoren wurde durch Funktionen mit Werten zwischen 0 und 1 dargestellt (Abb. 2). Eine Beschreibung dieser Faktoreignungsfunktionen findet sich bei Holzkämper *et al.* (2013). Die Grenzen der Funktionsverläufe wurden aufgrund von Literaturdaten und Expertenwissen festgelegt. Für die Ableitung der Gesamt-Klimaeignung wurden die phasenspezifischen Faktoreignungen nach dem Minimum-Prinzip zu vier Phaseneignungswerten aggregiert. Die Gesamt-Klimaeignung wurde schliesslich durch die Bil-

dung einer gewichteten Summe bestimmt, wobei für Mais jede Phase gleich hoch gewichtet wurde. Daraus ergab sich ein relativer Index für die Klimaeignung zwischen 0 und 1. Diese Methode erlaubt es, neben der Gesamtklimaeignung auch die phasenspezifischen Faktoreignungen beziehungsweise Klimalimitierungen explizit zu betrachten.

Resultate

Räumliche Verschiebung der Klimaeignung

Die Verteilung der Klimaeignung für Körnermais unter aktuellen Bedingungen und die Änderung für drei zukünftige Zeitfenster (2020–2049, 2045–2074 und 2070–2099) wurden aus den Temperaturänderungen

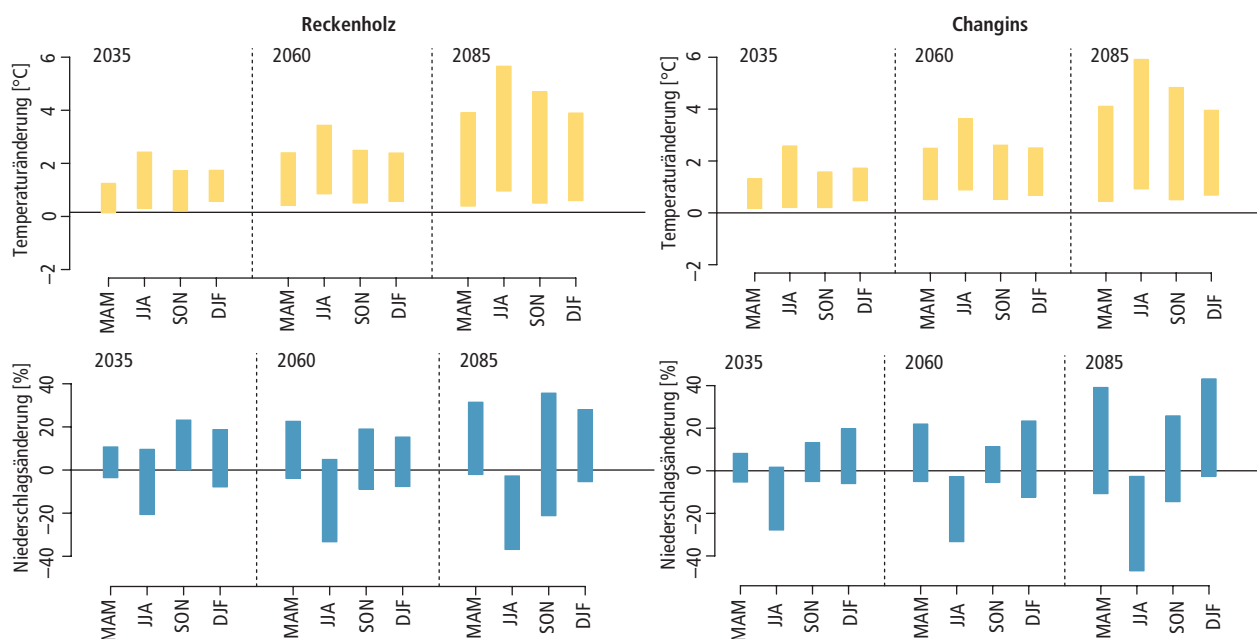


Abb. 1 | Saisonale Änderungen in Temperatur und Niederschlag an den Standorten Zürich-Reckenholz und Changins. Boxen symbolisieren die Spanne der Änderungen aus allen Modellketten und Emissionsszenarien (MAM = März, April, Mai; JJA = Juni, Juli, August; SON = September, Oktober, November; DJF = Dezember, Januar, Februar).

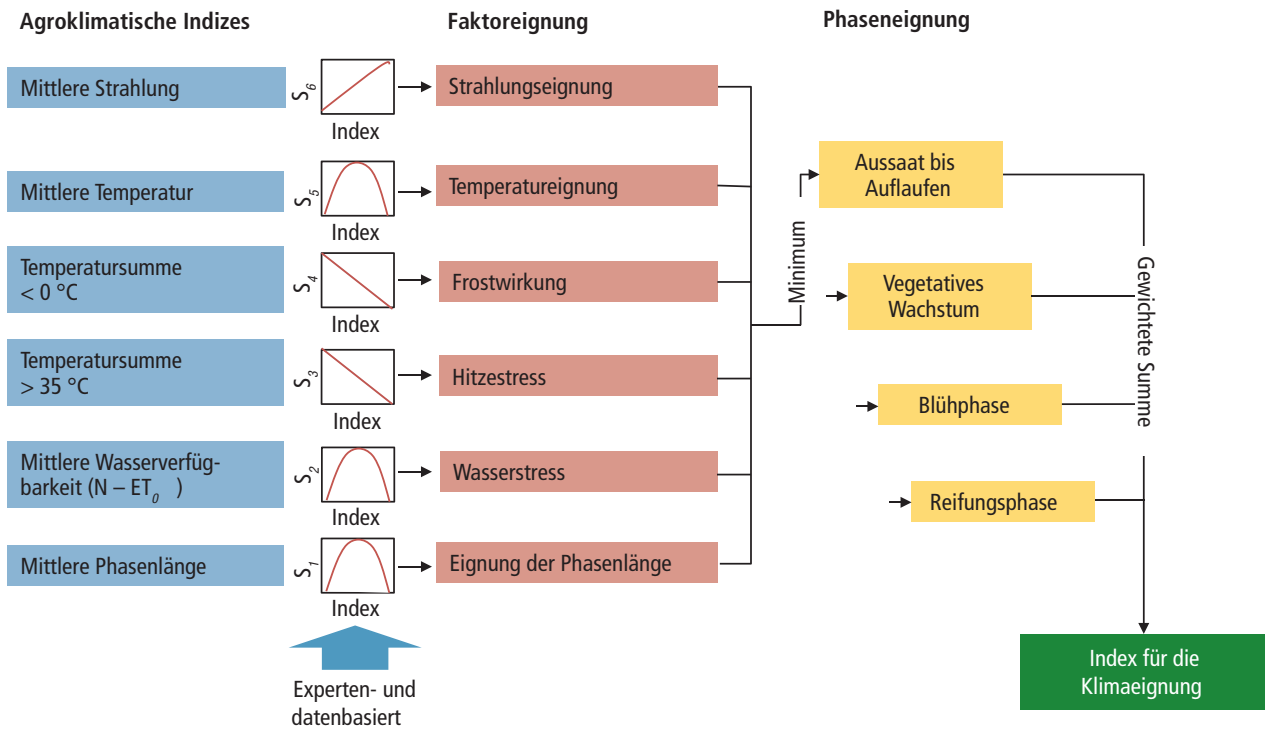


Abb. 2 | Ableitung der Klimaeignung von sechs agro-klimatischen Indizes, die für vier phänologische Phasen berechnet werden (N = Niederschlag; ET_0 = Referenzverdunstung nach Priestley-Taylor; S_{1-6} = Faktoreignungsindizes).

abgeleitet (Abb. 3). Die Karten zeigen, wie sich das klimatisch geeignete Anbaugbiet mit zunehmender Temperatur unter dem A2-Emissionsszenario künftig verändert, wobei Lagen mit einer Hangneigung $> 15\%$ ausgenommen wurden. Es ergibt sich eine Verschiebung der Gebiete guter Eignung. In den tieferen Lagen des Mittellands, den aktuellen Hauptanbaugebieten für Körnermais, ist bei fortschreitender Klimaerwärmung mit einer teilweise deutlichen Abnahme der Klimaeignung zu rechnen.

Änderung der Bedeutung von Klimafaktoren

Änderungen in der Bedeutung einzelner Klimafaktoren für die Klimaeignung wurden exemplarisch für die Standorte Zürich-Reckenholz und Changins betrachtet. Im Gegensatz zur flächendeckenden Analyse standen für die entsprechenden Klimastationen kombinierte Temperatur- und Niederschlagszenarien zur Verfügung. Vor allem Änderungen der Limitierungen durch Hitze und eine verkürzte Phasenlänge sind an beiden Standorten für die Abnahme der Klimaeignung verantwortlich, wie dies in Abbildung 4 für das A2-Szenario dargestellt ist. Änderungen in den Niederschlagsmengen führen beim Westschweizer Standort zu einer Zunahme von Wasserstress

während der Reifungsphase, aber zu einer Abnahme während dem vegetativen Wachstum und der Blühphase. Für Zürich-Reckenholz sind Änderungen in der Häufigkeit der Limitierung durch Trockenstress weniger ausgeprägt. Die Abnahme von Trockenstress an beiden Standorten steht im Zusammenhang mit der Verschiebung der phänologischen Phasen: Durch die Beschleunigung der phänologischen Entwicklung setzen sensitive Phasen wie die Blüteperiode früher ein, d. h. zu einem Zeitpunkt, an dem die Trockenheit noch weniger ausgeprägt ist. Durch diese zeitliche Verschiebung wird der Einfluss einer abnehmenden Wasserverfügbarkeit und damit der Trockenstress vermindert. Die Gegenläufigkeit dieser beiden Effekte zeigt sich auch daran, dass die Änderungen in den Trockenheitslimitierungen über alle drei Zeithorizonte in etwa gleich bleiben, obwohl Temperatur- und Niederschlagsänderungen zunehmend stärker werden. Eine zeitliche Veränderung zeigt sich dagegen deutlicher in den zunehmenden Limitierungen durch Hitzestress und Beschleunigung der phänologischen Entwicklung (Phasenverkürzung). Diese Änderungen sind für beide Emissionsszenarien tendenziell gleich, aber im Falle des weniger günstigen A2-Szenarios deutlich stärker als beim gemäßigten RCP3PD-Szenario (hier nicht dargestellt).

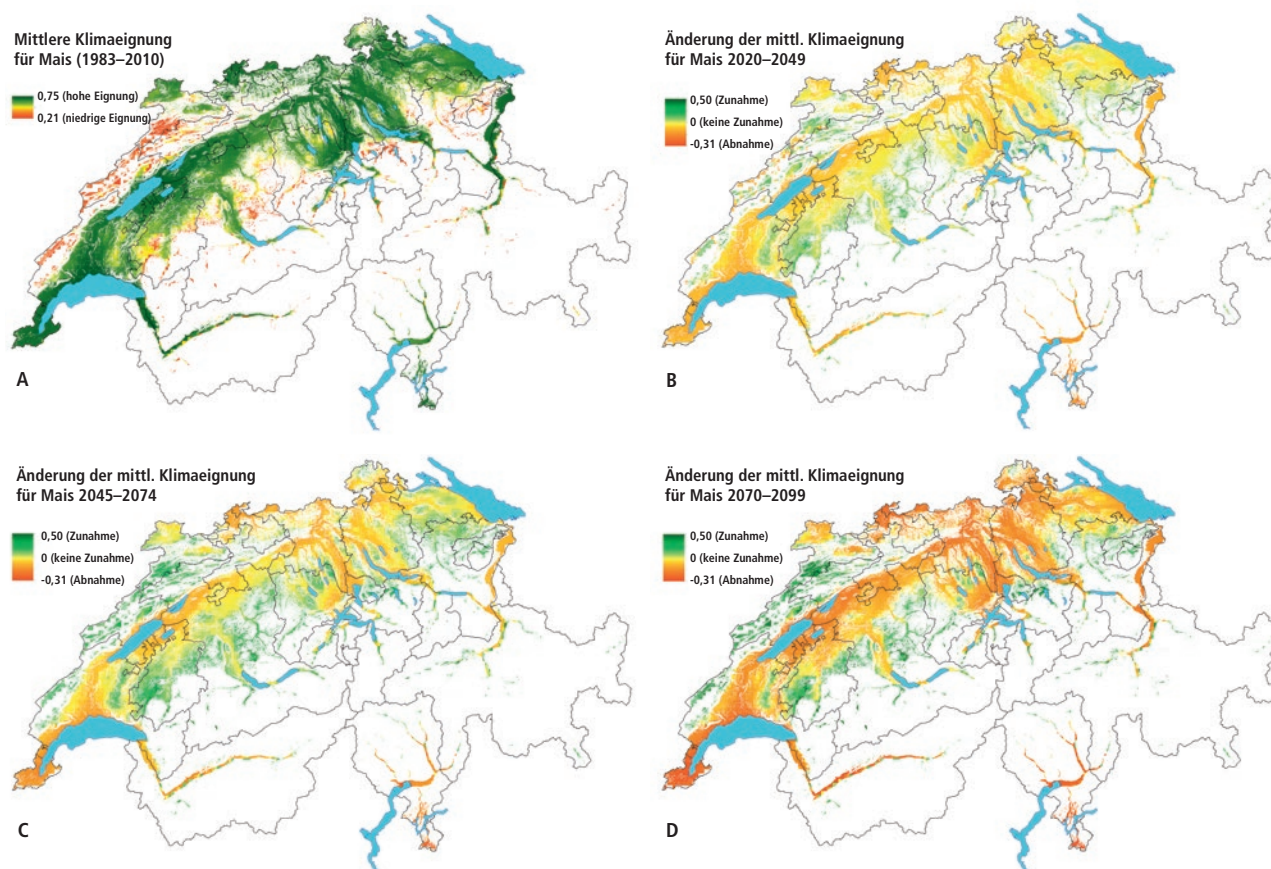


Abb. 3 | Karten der aktuellen Klimaeignung für Körnermais (A) (1983–2010, aus Holzkämper *et al.* 2015) sowie für die drei Zeithorizonte 2020–49 (B), 2045–74 (C) und 2070–99 (D), berechnet auf Basis der Mediane der Temperaturänderungen aus 20 Klima-Modellketten für das A2-Emissionsszenario. (Flächen mit Hangneigungen > 15 % sind ausgeschlossen.)

Diskussion

Die positive Auswirkung der jüngsten Temperaturzunahme auf die Klimaeignung für Mais (Holzkämper *et al.* 2015) dürfte aufgrund der künftigen Erwärmung im Schweizer Mittelland zwar vorerst weiter zunehmen, längerfristig aber abnehmen. Dies ist vor allem so, weil Limitierungen durch Hitzestress zunehmen und es aufgrund beschleunigter Entwicklung zu Ertragsminderungen kommen kann. Die Änderungen im Niederschlag beeinflussen den Trocken- oder Feuchtstress in dieser Analyse wegen einer temperaturbedingten Phasenverschiebung nur begrenzt. Man kann jedoch annehmen, dass bei höheren Temperaturen ein Wechsel zu Sorten mit höheren Temperaturbedürfnissen stattfindet und sich die phänologischen Phasen somit insgesamt weniger stark verschieben. Das heisst, dass das Risiko von sommerlichem Trockenstress über die hier gezeigten Änderungen hinaus zunehmen kann.

Aufgrund der mittelfristigen Verbesserung der Klimaeignung durch die Erwärmung scheint ein Ausbau des Maisanbaus in verschiedenen Gebieten möglich. Allerdings ist eine Verlagerung in höhere Lagen aufgrund der zunehmend ungünstigeren Hangneigung nur bedingt realistisch. Zudem kann die Bodenqualität in solchen Lagen ungenügend sein. Dass Bodeneigenschaften in der verwendeten Methode nicht berücksichtigt werden, stellt auch deshalb eine Einschränkung dar, weil die Interaktion von Boden und Klima für das Auftreten von Trockenstress wichtig ist.

Die projizierten Änderungen in den Faktorlimitierungen liefern Hinweise darauf, welche Anpassungsmaßnahmen wo zur Minderung von Ertragsrisiken beitragen können. Um der Zunahme von Trocken- und Hitzestress entgegenzutreten, wäre vermehrte Bewässerung besonders im westlichen Mittelland eine vordringliche Massnahme, was den Ergebnissen anderer Studien entspricht (Fuhrer *et al.* 2014). Auch durch die Wahl von

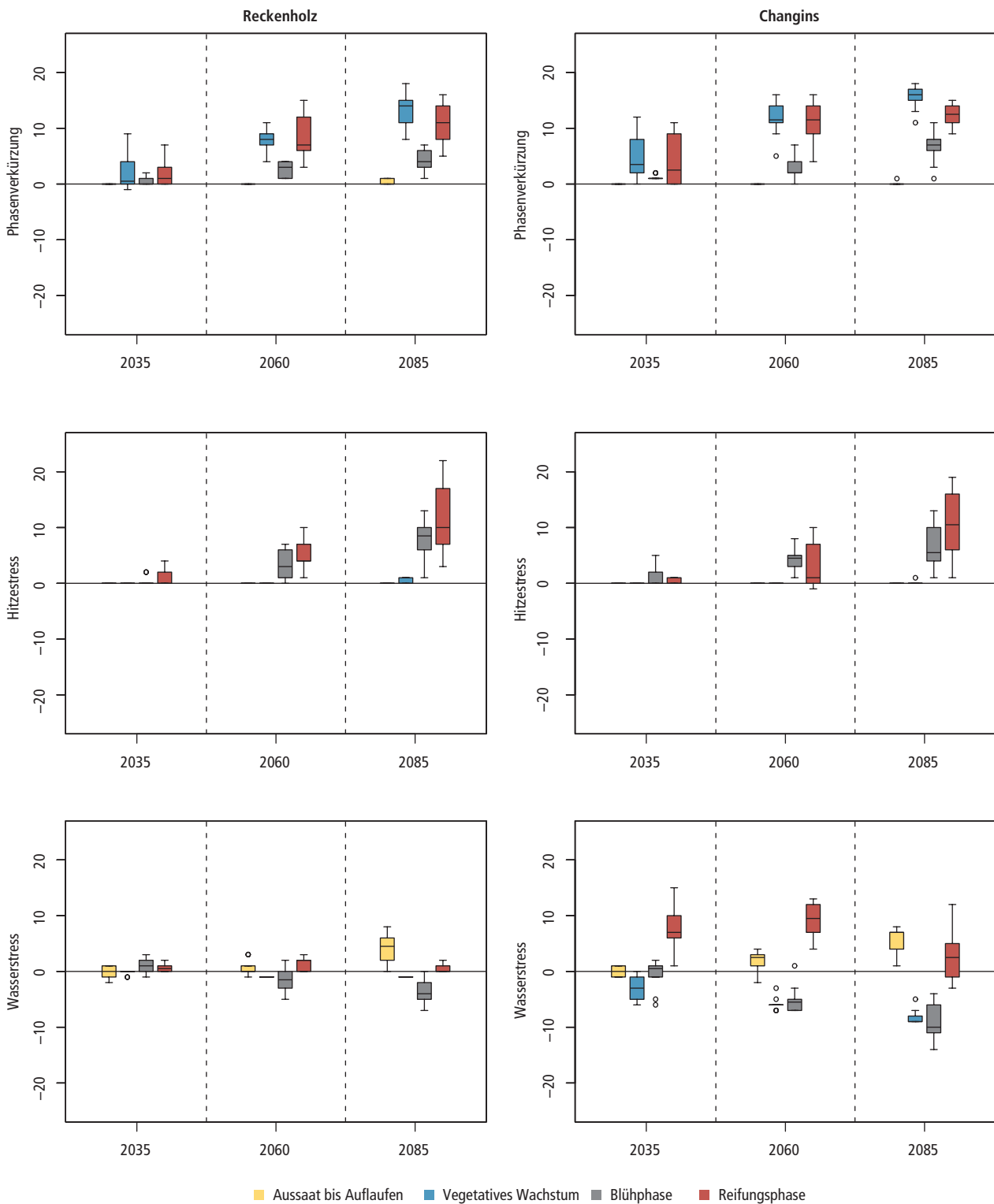


Abb. 4 | Änderungen in der Häufigkeit der stärksten Limitierungen in jeder phänologischen Phase für drei Projektionshorizonte für das A2-Emissionsszenario. Boxplots zeigen die Unsicherheitspannen (Boxplot mit Median, 25/75%- und 5/95%-Perzentilen) aus zehn Klimamodellketten.

hitze- und trockenheitsresistenteren Sorten kann Klimarisiken entgegengewirkt werden. Wärmebedürftigere Sorten können die Limitierung durch eine beschleunigte Entwicklung verringern, und die Verschiebung des Saattermins hilft, die verlängerte Wachstumsperiode besser zu nutzen (Torriani *et al.* 2007), bis hin zur Möglichkeit einer zusätzlichen Sommerkultur. Es gilt aber zu bedenken, dass die verfügbaren Klimaszenarien keine Änderung in der Globalstrahlung und für Temperatur und Niederschlag nur mittlere Änderungen und keine Verschiebung in deren Variabilität annehmen. Nimmt die Häufigkeit von Klimaextremen wie Trockenheit und Hitze zu, wie neue Studien nahelegen (u. a. Fischer und Knutti 2015), so könnte die Zunahme der Klimavariabilität die Ertragsstabilität senken.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse liefern Hinweise für die Planung von Standort- und Sortenwahl als Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel. Allerdings sind Auswirkungen des Klimawandels auch hier von den Modellketten und mit fortschreitendem Projektionshorizont auch zunehmend vom Emissionsszenario abhängig. Bei der Planung von Anpassung sind diese Unsicherheiten so weit als möglich zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass Massnahmen gegenüber den bekannten Unsicherheiten robust sein und die Klimaresilienz allgemein erhöhen sollten. Konkret kann das u. a. heissen: möglichst hohe genetische Diversität erhalten, Wasserspeicher für die Bewässerung einrichten oder Bodeneigenschaften für einen günstigen Wasser- und Nährstoffhaushalt erhalten. Schliesslich kann ein adaptiver Ansatz mithelfen, neu auftretende Unsicherheiten in der Planung zu berücksichtigen, indem die Wirksamkeit eingeleiteter Massnahmen regelmässig überprüft wird und, wo dies möglich ist, Änderungen bei deren Umsetzung vorgenommen werden. ■

Literatur

- BLW, 2011. Klimastrategie Landwirtschaft. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern. 46 S.
- Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T. & Schär C., 2011. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences* **15**, 2777–2788.
- Fischer A.M., Weigel A.P., Buser C.M., Knutti R., Künsch H.R., Liniger M.A., Schär C. & Appenzeller C., 2011. Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *International Journal of Climatology*, Advance online publication.
- Fischer E.M. & Knutti R., 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change* **5**, 560–564.
- Frei C. & Schär C., 1998. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology* **18** (8), 873–900.
- Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J. & Vidale P.L., 2006. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **111** (D6), 1–22.
- Fuhrer J., Tendall D., Klein T., Lehmann N. & Holzkämper A., 2013. Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. *ART-Schriftenreihe* **19**, 56 S.
- Holzkämper A., Calanca P. & Fuhrer J., 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology* **168**, 149–159.
- Holzkämper A., Fossati D., Hiltbrunner J. & Fuhrer J., 2015. Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. *Regional Environmental Change* **15** (1), 109–122.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf. 996 S.
- MeteoSchweiz, 2012. Documentation of MeteoSwiss grid-data products: Daily mean, minimum and maximum temperature: TabsD, TminD, TmaxD. Available from www.meteoschweiz.ch.
- Posselt R., Müller R., Trentmann J. & Stöckli R., 2012. Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring – the CM-SAF retrieval in international comparison. *Remote Sensing of Environment* **118**, 186–198.
- Stöckli R., 2013. The HelioMont Surface Solar Radiation Processing. *Scientific Report MeteoSwiss* **93**, 122 S.
- Torriani D.S., Calanca P., Schmid S., Beniston M. & Fuhrer J., 2007. Potential effects of changes in mean climate and climate variability on the yield of winter and spring crops grown in Switzerland. *Climate Research* **34**, 59–69.
- Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. *et al.*, 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* **109**, 5–31
- Zubler E., Fischer A.M., Liniger M.A., Croci-Maspoli M., Scherrer S.C. & Appenzeller C., 2014. Localized climate change scenarios of mean temperature and precipitation over Switzerland. *Climatic Change* **125** (2), 237–252.

Riassunto**Impatto dei cambiamenti climatici sulla coltivazione di mais in Svizzera**

Il riscaldamento globale modifica i presupposti per la produzione agricola, aspetto che è stato qui studiato a livello nazionale per la Svizzera sulla base dell'idoneità climatica per il mais. A questo riguardo sono stati usati dati su griglia¹ relativi al cambiamento di temperatura per tre orizzonti temporali (2020–49, 2045–74, 2070–99), ricavati da venti catene di modelli climatici per lo scenario di emissione A2 (scenario «Business as Usual»). Con il riscaldamento climatico, la superficie adatta alla coltivazione si spinge ad altitudini più elevate, diminuendo, a lungo termine, a quelle più basse. In una seconda parte è stata studiata l'influenza di singoli fattori sull'idoneità climatica, partendo da scenari combinati di temperatura e precipitazione derivati, per le località di Zurigo-Reckenholz e Changins, da dieci catene di modelli del clima. Su entrambi i siti, lo stress da calore e uno sviluppo accelerato delle piante limitano progressivamente l'idoneità climatica, mentre i danni da siccità durante la maturazione aumentano notevolmente solo per la località della Svizzera occidentale. A questo proposito occorre tuttavia tener conto dello slittamento temporale dello sviluppo delle piante, in quanto il raccorciamento delle fasi di crescita tende a diminuire il rischio di stress da siccità. Nonostante le incertezze sull'andamento del clima a lungo termine, i risultati di questo studio forniscono indicazioni per la pianificazione della scelta delle aree di produzione e delle varietà, quale misura di adattamento ai cambiamenti climatici.

¹Dati interpolati spazialmente con una griglia di risoluzione di ca. 2 km.

Summary**The impact of climate change on maize cultivation in Switzerland**

The premise that global warming changes the conditions for crop production was investigated throughout Switzerland on the basis of a climate suitability for grain maize cultivation. Gridded projections¹ of temperature changes for three time periods (2020–49, 2045–74, 2070–99) available from twenty climate-model chains for the A2 emissions scenario (i.e. the «business as usual» scenario) were used. It was found that with climate warming, the suitable production area increases at higher altitudes but decreases at lower altitudes in the longer term. In a second part of the study, we investigated the influence of individual climatic factors on climate suitability using combined temperature and precipitation scenarios from ten model chains for the Zurich-Reckenholz and Changins sites. Results suggest that heat stress and accelerated plant development are increasingly limiting climate suitability at both sites, whilst water shortage during maturation is only increasing significantly at the Changins site in western Switzerland. The shortening of growth phases also plays a role here, since the temporal shift in crop development can reduce the risk of drought stress if drought-sensitive phenological periods are shifted away from periods of most intense stress. Despite uncertainties with regard to long-term climate change, the results of this study can provide advice for the planning of possible climate change adaptation measures (i.e. future cultivar choice, shifts in production areas).

Key words: climate change, climate suitability, maize, adaptation.

¹Spatially interpolated data with a grid resolution of approx. 2 km.