

Die thermische Vegetationszeit im Wandel des Klimas

Pierluigi Calanca¹, Annelie Holzkämper¹ und Francesco A. Isotta²

¹Klima und Landwirtschaft, Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Analyse und Prognose – Klima, MeteoSchweiz, 8058 Zürich-Flughafen, Schweiz

Auskünfte: Pierluigi Calanca, E-Mail: pierluigi.calanca@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs14-150> Publikationsdatum: 18. Juli 2023



Steigende Temperaturen verlängern die potentielle Vegetationszeit (Foto: Agroscope, Gabriela Brändle)

Zusammenfassung

Die thermische Vegetationszeit bezeichnet die Periode im Jahr, in welcher die Temperaturbedingungen das Wachstum der Pflanzen ermöglichen. In der Agrarmeteorologie wird sie oft dem Zeitabschnitt gleichgesetzt, in der die tagesmittleren Temperaturen über 5°C liegen. In dieser Arbeit bewerteten wir die Dauer der thermischen Vegetationsperiode auf der Basis von homogenisierten, räumlichen Temperaturdaten für 1901–2020. Die Resultate zeigen, dass in den tieferen Lagen des Mittellandes die thermische Vegetationszeit aktuell durchschnittlich 210 bis 260 Tage beträgt, in mittleren Lagen der Voralpen und des Juras 160 bis 210 Tage, in noch höheren Lagen in den Alpen zwischen 110 und 160 Tage. Infolge des Klimawandels und der einhergehenden Zunahme der Temperatur,

hat sich die thermische Vegetationszeit seit Beginn des letzten Jahrhunderts deutlich verlängert. Im Zeitraum von 1971 bis 2020 erhöhte sich die Dauer der Vegetationsperiode um rund +10 Tage pro Jahrzehnt. Damit ging eine potenzielle Höhenverschiebung von thermischen Zonen einher. Im Zeitraum von 1971 bis 2020 betrug diese Verschiebung rund +90 m pro Jahrzehnt. Durch die Zunahme der Temperatur und der Verlängerung der Vegetationszeit nahmen auch die verfügbaren Wärme- oder Temperatursummen in den Jahren von 1971 bis 2020 in der Grössenordnung von +100 bis +150°C-Tage pro Jahrzehnt zu.

Key words: thermal vegetation period, global warming, altitudinal shift.

Einleitung

Im Zusammenhang mit der Pflanzenproduktion sind Kenntnisse der Länge der Vegetationsperiode wichtig für die Beurteilung der Standorteignung. Die Länge der Vegetationsperiode bestimmt welche Kulturen an einem Standort grundsätzlich angebaut werden können und welche Fruchtfolgen möglich sind. Zudem setzt sie Rahmenbedingungen für die Planung und Durchführung der landwirtschaftlichen Arbeiten auf dem Feld.

Die saisonale Entwicklung der Vegetation lässt sich primär aus phänologischen Beobachtungen ablesen (Wanner, 1973). Beginn und Ende der Vegetationszeit können aber auch auf Basis des Jahresgangs der Temperatur geschätzt werden, denn die phänologische Entwicklung von Pflanzen wird im Wesentlichen von der Temperatur gesteuert (Gensler, 1946). Eine gute Zusammenstellung der dafür verwendeten Ansätze ist in Schaumberger (2011) zu finden. Als Daumenregel wird oft die Vegetationszeit mit dem Zeitraum des Jahres gleichgesetzt, in dem der Tagesmittel der Temperatur mindestens 5 °C beträgt (DWD, 2022). Die so bestimmte Periode wird üblicherweise thermische Vegetationszeit genannt.

Infolge des menschengemachten Klimawandels hat die globale Temperatur seit Beginn des letzten Jahrhunderts kontinuierlich zugenommen, und mit ihr die regionale Temperatur in der Schweiz (Rebetez & Reinhard, 2008). Die fortschreitende Klimaerwärmung hat zu einem früheren Beginn des Vegetationswachstums im Frühling und längeren Wachstumsphasen im Herbst geführt (Defila & Clot, 2001; Defila & Clot, 2005; Calanca & Holzkämper, 2010). Mit Blick auf den Futterbau, haben diese Verschiebungen durchaus auch positive Auswirkungen gehabt, so etwa einen geringeren Bedarf an Winterfutter, mehr Erntetage und günstigere Bedingungen für die Bereitung von Anweklsilage in höheren Lagen (Luder & Moriz, 2005).

Seit einigen Jahren bietet das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) umfangreiche, räumlich explizite Datenprodukte an, die sich für die Untersuchung von Fragestellungen zu Themen wie die thermische Eignung für den Anbau von Mais (Buzzi *et al.* 2021) und Sorghum (Bütikofer *et al.* 2023), oder die Auswirkungen der Trockenheit auf die Landwirtschaft (Holzkämper & Calanca 2022) und die Futterproduktion (Calanca *et al.* 2022). Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Entwicklung der thermischen Vegetationsperiode seit Beginn des 20. Jahrhunderts anhand von räumlichen Analysen der monatlichen Mitteltemperaturen neu zu bewerten und zu interpretieren. Sie erhebt nicht den Anspruch, eine tiefgreifende Analyse der bestimm-

den Prozesse zu liefern, sondern ermöglicht es, einen Überblick über verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit der Vegetationsperiode zu gewinnen.

Daten und Methoden

Für unsere Auswertungen stützten wir uns auf die Rasterdaten der monatsmittleren Temperatur von Isotta *et al.* (2019), welche bezüglich der zeitlichen Konsistenz hohe Anforderungen erfüllen. Diese sogenannten räumlichen Analysen stehen in verschiedenen Produktvarianten zur Verfügung. Die Daten der von uns gewählten Variante standen in einer räumlichen Auflösung von ca. 2 km × 2 km zur Verfügung, und umfassten die Jahre 1901–2021.

Bei der Erstellung der aktuellen Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft verwendeten Jeanneret und Vautier (1977) eine Definition der thermischen Vegetationsperiode, welche auf unterschiedlichen Schwellenwerten für Beginn und Ende der Vegetationszeit basiert. In späteren Arbeiten des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie wurde auf eine Unterscheidung der Schwellenwerte für Beginn, resp. Ende der Vegetationszeit verzichtet (MeteoSchweiz, 2013). Da wir für unsere Untersuchungen ohnehin nur Monatsmittelwerte der Temperatur verwendeten, bestimmten wir Beginn und Ende der Vegetationszeit wie folgt:

- Falls die mittlere Temperatur des kältesten Monats eines Jahres über der Basistemperatur von 5,0 °C liegt, gilt das ganze Jahr als Vegetationszeit.
- Falls die mittlere Temperatur des wärmsten Monats unter der Basistemperatur von 5,0 °C liegt, ist das ganze Jahr als zu kühl zu betrachten und die Dauer der Vegetationszeit gleich Null zu setzen.
- In allen anderen Fällen gingen wir davon aus, dass die monatlichen Mitteltemperaturen nominell für die Monatsmitte gültig sind, und leiteten daraus, durch lineare Interpolation, Tagesmitteltemperaturen für das ganze Jahr ab. Anschliessend berechneten wir die Vegetationsperiode als die Zeit des Jahres, in der die interpolierten Tagesmitteltemperaturen über 5,0 °C liegen.

Eine Verschiebung des Beginns der Vegetationsperiode führt zu Veränderungen der effektiven Tageslänge zu Beginn der thermischen Vegetationszeit, die für Pflanzen mit ausgeprägtem Photoperiodismus von Bedeutung sein können. Um aufzuzeigen, welche Auswirkun-

gen die Temperaturzunahme der letzten Jahrzehnte auf die Tageslichtverhältnisse am Anfang der Vegetationszeit hat, schätzten wir die astronomische Tageslänge zu Beginn der Vegetationszeit nach Allen *et al.* (1998). Für die Betrachtung des Wachstums von Ackerkulturen werden oft die sogenannten Vegetationstaggrade beigezogen. Darunter wird die Summe der Temperatur abzüglich einer kulturabhängigen Basistemperatur verstanden, wobei nur positiv ausfallende Differenzen berücksichtigt werden. Wir untersuchten den Einfluss der Veränderung in der Dauer der thermischen Vegetationszeit auf die potenziell verfügbaren Vegetationstaggrade, in dem wir Temperatursummen über der gesamten Vegetationsperiode bildeten, unter Annahme einer Basistemperatur von 5,0°C, welche als typisch für das Getreide und viele Grünlandpflanzen angenommen werden kann.

Resultate

Vegetationszeit und Phänologie in Escholzmatt

Um den engen Zusammenhang zwischen Vegetationsperiode und Phänologie der Pflanzen zu veranschaulichen, zeigen wir in Abbildung 1, wie sich die Vegetationszeit am Standort Escholzmatt im Kanton Luzern (7°56' E, 46°54' N, 910 m ü. M.) seit 1901 entwickelt hat, und vergleichen diese Entwicklung mit derjenigen ab 1951 von drei ausgewählten phänologischen Ereignissen. Die Wahl von Escholzmatt war dadurch motiviert, dass bereits Luder und Moriz (2005) die Entwicklung der Vegetationsdauer an diesem Standort diskutiert haben. Gut zu sehen in Abbildung 1 ist der synchrone Verlauf des Anfangsdatums der Vegetationszeit und der Blüte des Löwenzahns. Beide Kurven zeigen das Einsetzen eines deutlichen Trends zu einer Verfrühung ab Mitte der 1970er bis zum Beginn der 1980er Jahre. Relativ zum fünfzigjährigen Zeitfenster zwischen 1971 und 2020, beträgt der Trend $-5,8 \pm 1,7$ Tage pro Jahrzehnt ($p < 0,01$) bezüglich des Beginns der Vegetationsperiode, und $-5,6 \pm 1,5$ Tage pro Jahrzehnt ($p < 0,01$) bezüglich des Datums der Löwenzahnblüte. Auch der Zeitpunkt des Beginns der Heuernte weist eine statistisch signifikante ($p < 0,01$) Tendenz zu einer Verfrühung um $-2,3 \pm 1,5$ Tage pro Jahr auf. Die Klimaerwärmung bewirkte auch eine Verzögerung der phänologischen Ereignisse im Herbst (Abb. 1). Die entsprechenden Trends sind jedoch weniger ausgeprägt. Der Trend 1971–2020 relativ zum Ende der Vegetationszeit beträgt $+3,3 \pm 3,0$ Tage pro Jahr und ist statistisch signifikant ($p < 0,01$). Der Trend relativ zum Datum der Blattfärbung der Buche beträgt lediglich $+1,0 \pm 1,2$ Tage pro Jahr und ist statistisch nicht signifikant ($p = 0,13$).

Räumliche Betrachtung

Am Anfang des letzten Jahrhunderts (1901–1930) betrug die Dauer der Vegetationsperiode in den tieferen Lagen des Mittellandes durchschnittlich 200 bis 250 Tage, in mittleren Lagen der Voralpen und des Juras 150 bis 200 Tage, in noch höheren Lagen in den Alpen zwischen 100 und 150 Tage oder weniger (Abb. 2).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts verlängerte sich die Vegetationszeit um fünf bis 15 Tage, blieb aber zwischen 1931–1960 und 1961–1990 praktisch unverändert. Diesbezüglich einzige Ausnahmen waren kleinere Gebiete nahe dem nördlichen und westlichen Grenzen, in denen eine leichte Zunahme zu verzeichnen war, und einzelne hochgelegene Flächen, in denen die Vegetationszeit kürzer wurde. Im Zusammenhang mit der seit den 1980er Jahren eingetretenen Trend hin zu einer stärkeren Erwärmung, verlängerte sich die Vegetation zwischen 1961–1990 und 1991–2020 erneut, und zwar um 15 bis 20 Tage. Gut erkennbar ist diese Entwicklung entlang dem Jurasüdfuss und der nördlichen Landesgrenze, im Reuss-, Glatt- und Rheintal, und in den Tälern und Ebenen des Tessins.

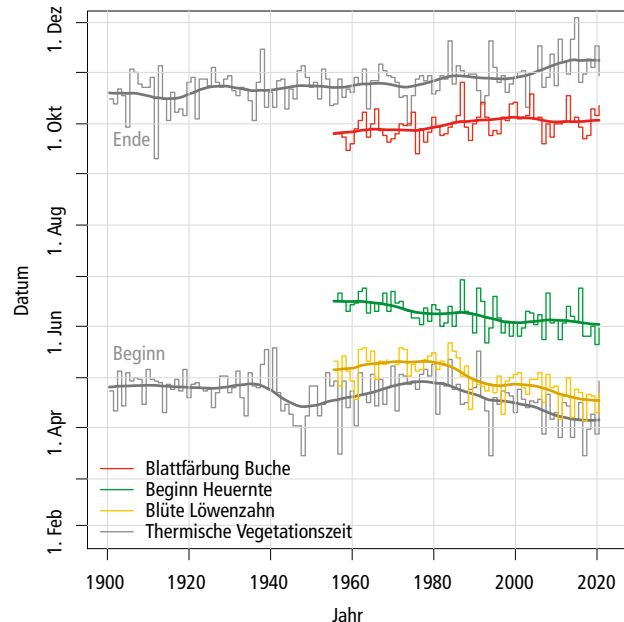


Abb. 1 | Entwicklung 1901–2021 von Beginn und Ende der thermischen Vegetationszeit (grau), sowie Entwicklung 1951–2021 des Datums der Löwenzahnblüte (gelb), der Heuernte (grün), und der Blattfärbung der Buche¹ (braun) am Standort Escholzmatt. Für die Verdeutlichung der langjährigen Tendenzen wurden die Zeitreihen mit einem iterativen Kolmogorov-Zurbenko-Filter (Zurbenko & Smith 2018) geglättet (Datenquelle: MeteoSchweiz).

¹Der Beginn der Färbung von Pflanzenblättern im Herbst ist nicht nur temperaturbedingt. Dennoch spielt die saisonale Temperaturabnahme neben der Verkürzung der Tage eine wichtige Rolle (siehe z. B., <https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/baeume-und-waldpflanzen/herbstliche-laubverfaerbung>). Hier haben wir die Datenreihe des Datums der Blattfärbung hauptsächlich zu Veranschaulichungszwecken beigezogen.

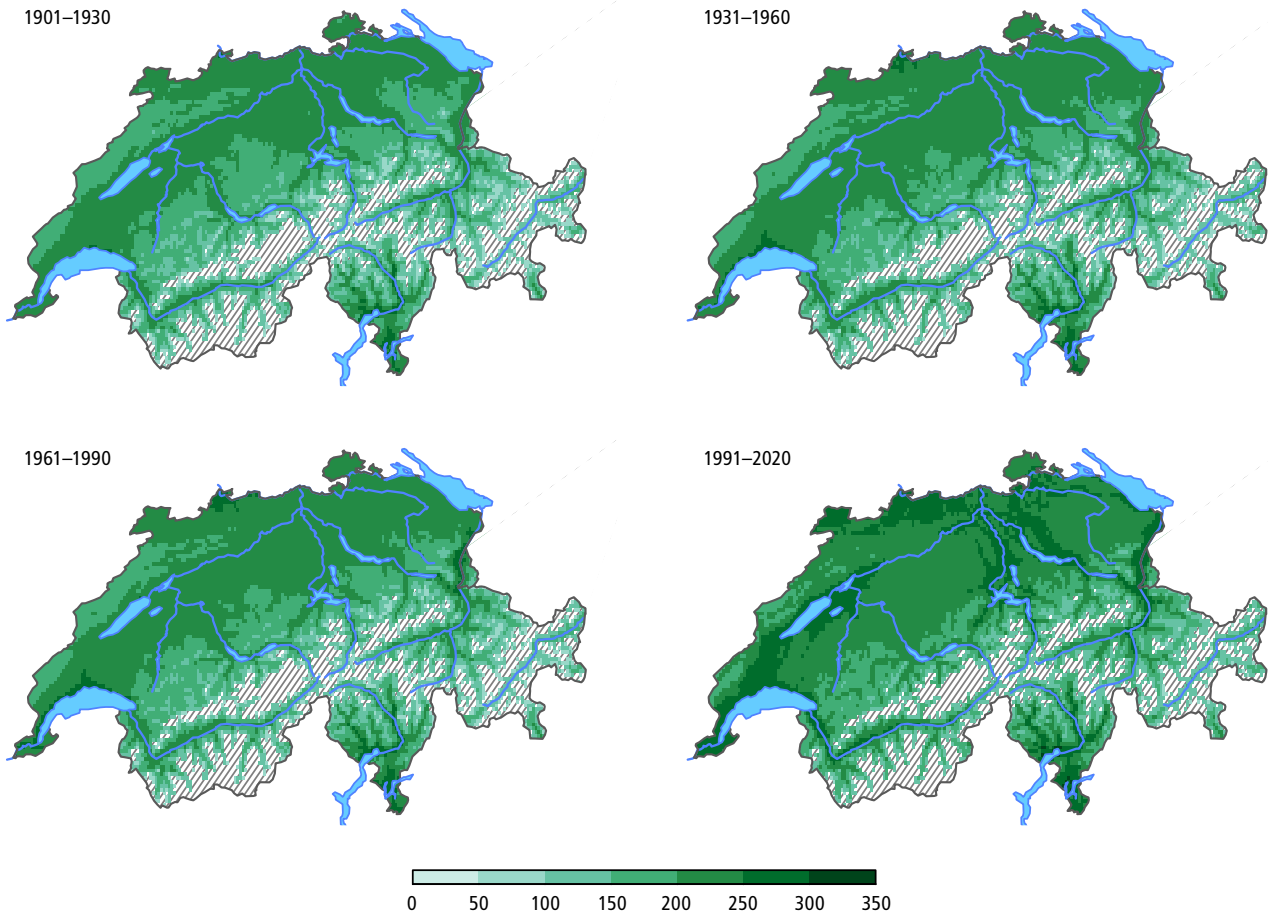


Abb. 2 | Karten der mittleren Dauer der thermischen Vegetationsperiode (in Tagen) in den vier Normperioden 1901–1930, 1931–1960, 1961–1990 und 1991–2020 (von oben links nach unten rechts). Die schraffierten Flächen bezeichnen Gebiete oberhalb von ca. 2500 m ü.M.

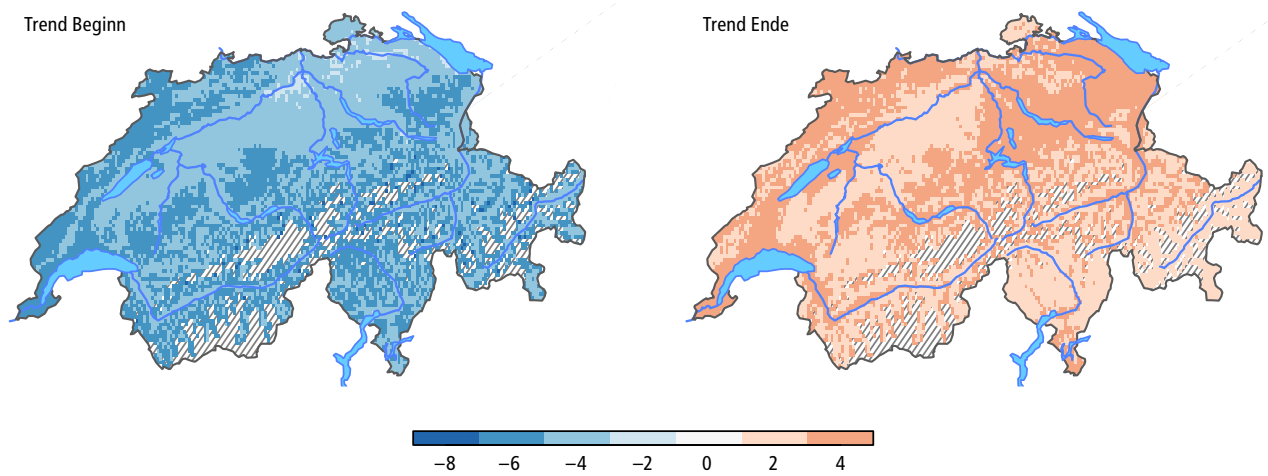


Abb. 3 | Karten des Trends über den Zeitraum 1971–2020 in Bezug auf das Datum des Beginns (links) und des Endes (rechts) der thermischen Vegetationsperiode. Einheiten: Tage Jahrzehnt⁻¹. Mit wenigen Ausnahmen, sind alle Resultate statistisch signifikant ($p < 0,05$). Die schraffierten Flächen bezeichnen Gebiete oberhalb von ca. 2500 m ü.M.

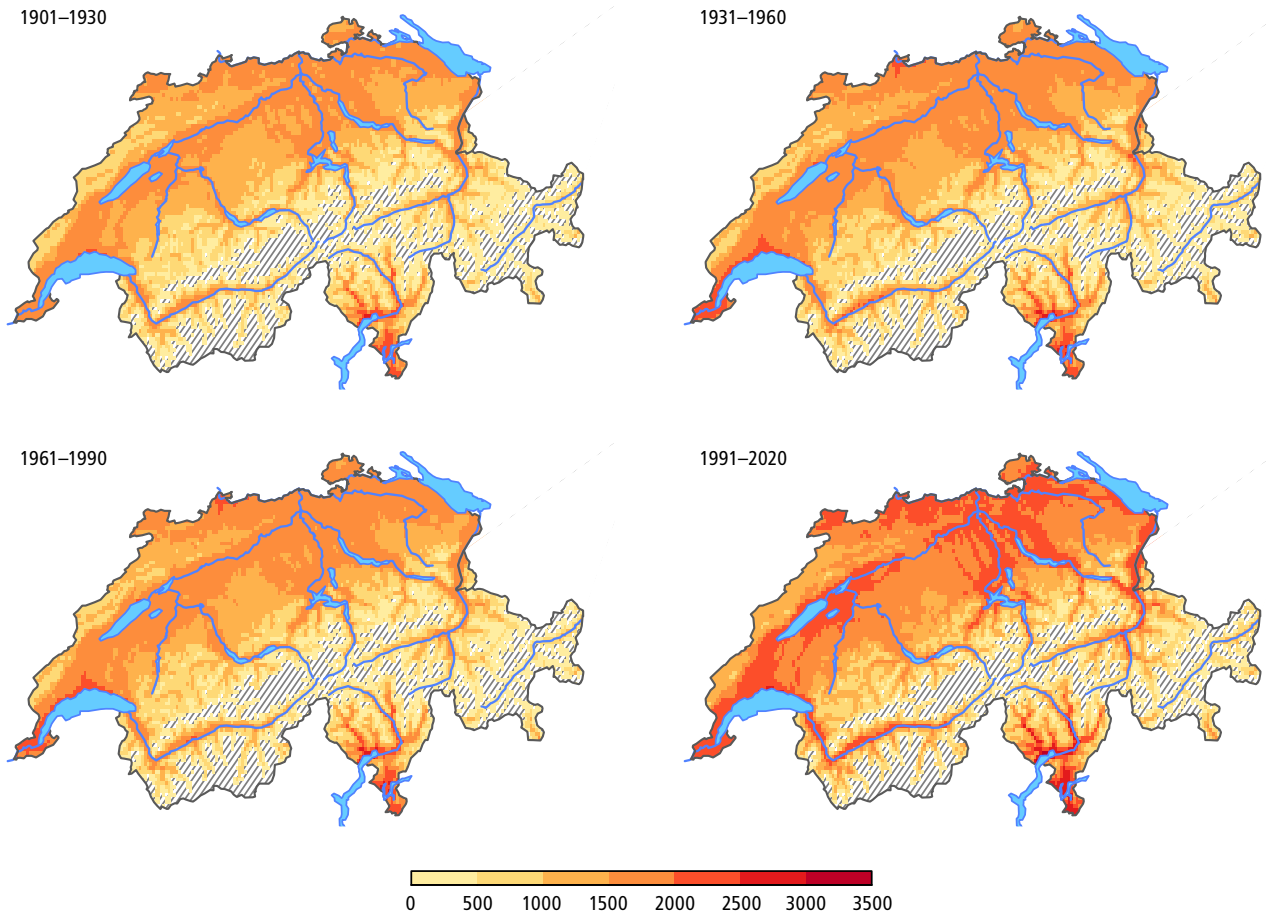


Abb. 4 | Karten der mittleren Temperatursummen (°C-Tage) in den Referenzperioden 1901–1930, 1931–1960, 1961–1990 und 1991–2020 (von oben links nach unten rechts). Es handelt sich um die Summen über der jeweiligen Vegetationsperiode der Temperaturen abzüglich der Basistemperatur von 5 °C. Die schraffierten Flächen bezeichnen Gebiete oberhalb von ca. 2500 m ü. M.

Wie schon bei der Analyse der Situation in Escholzmatt sichtbar, geht die Verlängerung der Vegetationszeit zwischen 1961–1990 und 1991–2020 sowohl auf ein früheres Eintreten im Frühling als auch auf ein späteres Ende im Herbst zurück. Die entsprechenden, linearen Trends über den Zeitraum 1971–2020 sind in Abbildung 3 dargestellt. Was den Beginn der thermischen Vegetationsperiode anbelangt, sind ausgeprägte Trends zu einer Verfrühung (zwischen $-5,0$ und $-10,0$ Tage Jahrzehnt $^{-1}$) nicht in den Niederungen des Mittellands zu finden, sondern im Jura, im Voralpenraum und in den mittleren Höhen des Alpenraums. Was das Ende der Vegetationsperiode betrifft, so scheinen regionalen Unterschiede eher mit geographischen Grossräumen als mit der Höhe zu tun haben. Ausgesprochen positive Trends (2,5 bis 5,0 Tage Jahrzehnt $^{-1}$) werden entlang dem Jurasüdfuss, im nördlichen Jura und im östlichen Mittelland beobachtet.

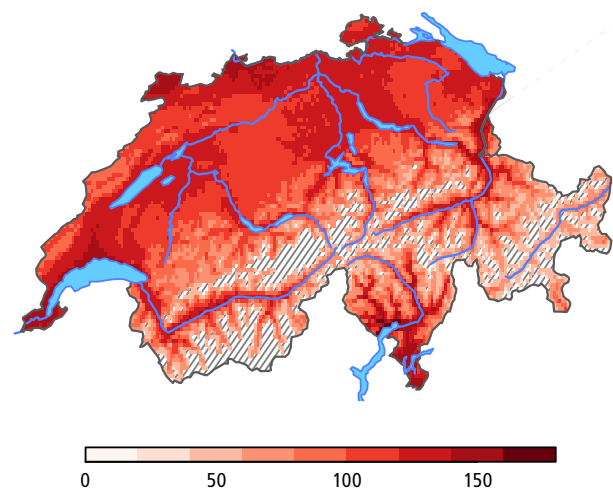


Abb. 5 | Wie Abb. 3 aber in Bezug auf den Trend über 1971–2020 der verfügbaren Temperatursumme. Einheiten: °C-Tage Jahrzehnt $^{-1}$.

Mit der Verlängerung der Vegetationsperiode ging ein deutlicher Anstieg der verfügbaren Wärme- oder Temperatursummen einher (Abb. 4). Zu den 600 und 1600 °C-Tage (Interquartil-Abstand) die je nach Höhenlage 1901-1931, zu Beginn des letzten Jahrhunderts, zur Verfügung standen, kamen bis 1991–2020 rund 400 °C-Tage hinzu, wobei die stärkste Zunahme wiederum in den Zeiträumen von 1961–1990 und 1991–2020 stattfand. Der Vergleich von Abbildung 4 mit Abbildung 2 zeigt, dass die räumlichen Muster der Entwicklung in beiden Fällen sehr ähnlich waren, was nicht erstaunlich ist.

Die Karte des Trends der verfügbaren Temperatursumme (Abb. 5) bestätigt die Entwicklung, die bereits in Abbildung 4 angedeutet wurde. Sie zeigt, dass seit den 1970er Jahre im ganzen Mittelland, in den Alpenen Tälern, und in der Südschweiz pro Jahrzehnt 100 bis 150 °C-Tage gewonnen wurden.

Verschiebung von Klimazonen?

Im Alpenraum hat der anhaltende Klimawandel zu einer Höhenverschiebung der Verbreitungsgebiete von Pflanzen, Pilzen und Tieren geführt (Vitasse *et al.*, 2021). Diese Verlagerung geht teilweise mit phänologischen Veränderungen einher, für die die thermische Vegetationszeit ein Indikator darstellt. Zur Veranschaulichung des Ausmaßes der potenziellen Höhenverschiebung, die durch die Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode hervorgerufen wird, stellen wir die Daten aus Abbildung 2 erneut dar, diesmal jedoch gegen die entsprechende

Geländehöhe (Abb. 6). Dabei beschränken wir uns auf den Vergleich zwischen den zwei Normperioden 1961–1990 und 1991–2020. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verlängerung der thermischen Vegetations-

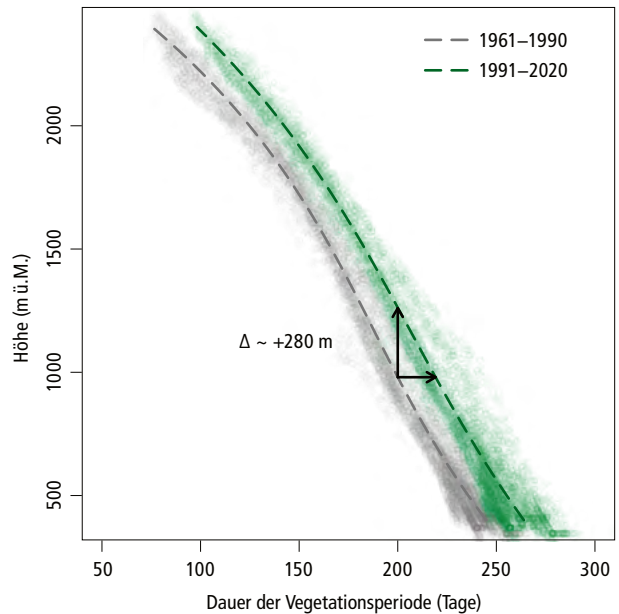


Abb. 6 | Höhenabhängigkeit der Dauer der thermischen Vegetationsperiode in den zwei Referenzperioden 1961–1990 (grau) und 1991–2020 (grün). Die Ergebnisse für die einzelnen Rasterpunkte sind mit leeren Kreisen dargestellt. Die gestrichelten Linien veranschaulichen die Gesamtbeziehung, die sich aus der Anpassung eines Polynoms dritter Ordnung an die Daten ergibt.

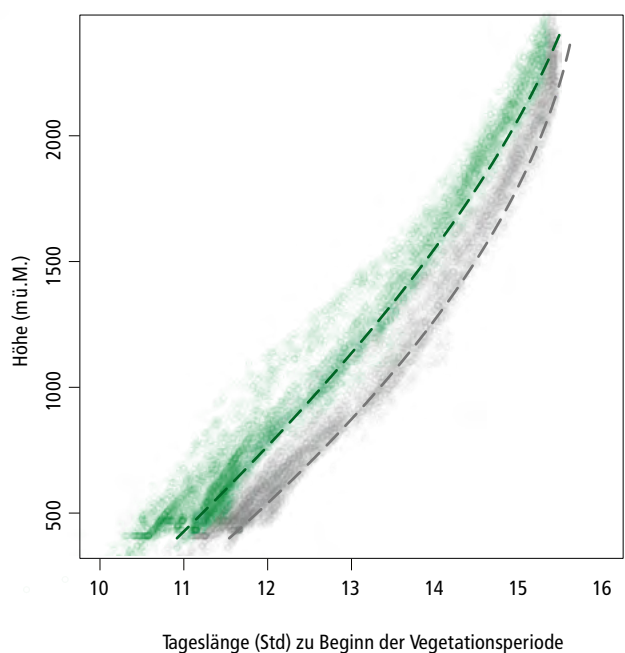
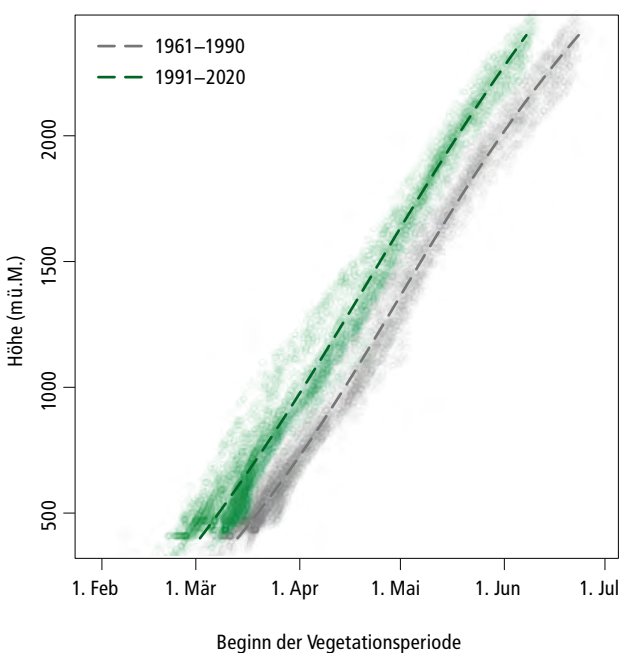


Abb. 7 | Wie in Abb. 6, jedoch in Bezug auf das Datum des Beginns der Vegetationsperiode (links) und die entsprechende Tageslänge (rechts).

periode um rund 20 Tage mit einer Höhenverlagerung von rund 280 m einherging. Dies entspricht einer Anhebungsrates um etwa 90 Höhenmetern pro Jahrzehnt. Die Verschiebung der Lebensräume in die Höhe und die Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode sind Ausdruck derselben klimatischen Entwicklung. Es ist jedoch zu bedenken, dass sich andere Faktoren, die die jahreszeitliche Entwicklung von Lebewesen steuern, im gleichen Zeitraum nicht oder nur in geringerem Masse verändert haben. Ein Beispiel dafür ist die Tageslänge. Sie ist nur von topografischen und astronomischen Parametern abhängig, die als zeitlich konstant betrachtet werden müssen. Ein früherer Beginn der thermischen Vegetationsperiode führt zu einer kürzeren Tageslänge zu dieser Jahreszeit (Abb. 7). Dies kann bei Lebewesen mit ausgeprägtem Photoperiodismus einer Verfrühung infolge steigender Temperaturen entgegenwirken.

Diskussion und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Analyse wurden die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Länge der thermischen Vegetationsperiode in der Schweiz untersucht. Die Ergebnisse spiegeln die unterschiedliche Entwicklung der Temperaturverhältnisse in den letzten 120 Jahren wider, mit einer ersten Erwärmungsphase in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts und einer noch stärkeren Erwärmungsphase beginnend in den 1970er–1980er Jahre (Hansen *et al.*, 2010). Unsere Resultate zeigen, dass die Dauer der thermischen Vegetationszeit zwischen 1901–1930 und 1931–1960 um fünf bis 15 Tage, und zwischen 1961–1990 und 1991–2020 um 15 bis 20 Tage zunahm. Unter Berücksichtigung der Unterschiede in der regionalen Ausprägung der globalen Erwärmung, sind diese Zahlen konsistent mit denjenigen, die für andere Regionen der Welt ermittelt wurden (z.B. Kukul & Irmak, 2018).

Die Zunahme der Dauer der thermischen Vegetationszeit war das Resultat eines früheren Starts und ein späteres Ende, wobei der negative Trend im Frühjahr stärker ausgeprägt war als der positive Trend im Herbst. Diese Asymmetrie spiegelt die Beobachtung wider, dass die Herbsttemperaturen in den vergangenen Jahrzehnten weniger stark zugenommen haben als die Temperaturen im Frühjahr (Klein *et al.*, 2018). Dies ist ebenfalls in Beobachtungen von phänologischen Ereignissen zu sehen (MeteoSchweiz, 2023).

Der anhaltende Trend zu einem früheren Start der thermischen Vegetationszeit hat zur Folge, dass die Tage zu Beginn der Vegetationsperiode kürzer werden. Wenn

wir auf die letzten Jahrzehnte zurückblicken und das Mittelland betrachten, können wir feststellen, dass sich die Tageslänge zu Beginn der Wachstumsperiode seit den 1970er Jahren um etwa 30 Minuten verkürzt hat. Wie schon erwähnt, ist diese Entwicklung für Organismen mit einem ausgeprägten Photoperiodismus von Bedeutung, denn der zeitliche Ablauf verschiedener Prozesse wird durch das Vorhandensein eines vorgegebenen Tag-Nacht-Signals und nicht durch das Auftreten bestimmter Temperaturbedingungen gesteuert (Salisbury, 1982). Dies könnte bedeuten, dass die effektive Wachstumsperiode nicht für alle Pflanzenarten dem gleichen Trend folgt wie die thermische Wachstumsperiode.

Im Zusammenhang mit einem früheren Beginn der Vegetationsperiode stellt sich weiter die Frage, ob damit auch eine Änderung im Auftreten von Spätfrostschäden verbunden ist. In einem sich erwärmenden Klima könnte das Spätfrostisiko entweder abnehmen oder zunehmen, je nachdem, wie sich die jahreszeitliche Entwicklung der Nachttemperaturen im Vergleich zum Auftreten sensibler phänologischer Stadien entwickelt. In einer Studie zum Frostisiko im Weinbau mit Fokus auf dem Rhonetal, haben Meier *et al.* (2018) gezeigt, dass zukünftig sowohl eine Abnahme als auch eine Zunahme von Frostisiken möglich ist, mit vom Standort abhängigen unterschiedlichen Tendenzen. Eine andere Studie mit Blick auf die Schweiz (Klein *et al.*, 2018) hat ein unverändertes Risiko der Frosteinwirkung für subalpine und alpine Pflanzen nach der Schneeschmelze geschätzt. In einer dritten Studie zeigten Vitasse *et al.* (2018), dass die Entwicklung des Frostisikos in den letzten Jahrzehnten von der Höhenlage abhing, mit marginalen Veränderungen in niedrigen Höhenlagen, aber einem Anstieg oberhalb von 800 m ü. M.

Rein numerisch, entsprach die Verlängerung der thermischen Vegetationsperiode um etwa 20 Tage in den Zeiträumen von 1961–1990 und von 1991–2020 einer Höhenverschiebung von etwa +90 m pro Jahrzehnt. Dass sich der Vegetationsraum auch in den Alpen in die Höhe verlagert, ist durch zahlreiche Beobachtungen belegt (Walther *et al.*, 2005). Diese Höhenverlagerung verläuft parallel zu einer Verschiebung der potenziell für den Ackerbau geeigneten Zonen nach Norden (King *et al.*, 2018; Grünig *et al.*, 2020). Um wieviel sich die Verbreitungsgebiete verschoben haben, hängt von der betrachteten Lebensform ab. In ihrer kürzlich erschienenen Übersichtsarbeit, ermittelten Vitasse *et al.* (2021) für krautige Arten eine durchschnittliche Höhenverlagerungsrate von 20 m pro Jahrzehnt. Dies entspricht nur etwa einem Viertel der potenziellen Verschiebung, die

mit der Verlängerung der thermischen Vegetationszeit einhergehend, und zeigt, dass andere Faktoren die tatsächliche Ausdehnung von Verbreitungsgebieten beschränken (Xie *et al.*, 2021). Mit Blick auf den Alpenraum kann z.B. der Rückgang der Schneedecke erwähnt werden (Matiu *et al.*, 2021; Rumpf *et al.*, 2022).

Eine längere Vegetationsperiode hat sicherlich positive Auswirkungen auf einzelne Bereiche der landwirtschaftlichen Tätigkeit. Vor allem in der Futterproduktion ermöglicht sie eine längere Nutzung von Wiesen und Weiden, was sowohl für die Futtermittelversorgung in der warmen Jahreszeit als auch für den Aufbau von Futterreserven für die kalte Jahreszeit von Vorteil ist. Dies allerdings nur vorausgesetzt, dass sich die Niederschlagsbedingungen nicht verschlechtern. Es ist eine Tatsache, dass die Futtermittelproduktion in der jüngsten Vergangenheit mehrfach mit dürrebedingten Verlusten zu kämpfen hatte (Calanca *et al.*, 2022).

Die Folgen für den Ackerbau sind vielseitiger. Auf der einen Seite, öffnet die mit einer längeren Vegetationszeit einhergehende Zunahme der verfügbaren Temperatursummen Optionen für eine Diversifizierung von Fruchtfolgen oder z.B. den Anbau von neuen, wärmeliebenden Kulturpflanzen (Bütikofer *et al.*, 2023). Auf der anderen führen hohe Temperaturen zu einem schnelleren Wachstum und eine Verkürzung von phänologischen Phasen, die sich negativ auf die Ertragsbildung auswirken können (bei Getreide, z.B. durch weniger Zeit für die Körnerfüllung; Wiegand & Cuellar, 1981; Asseng *et al.*, 2015). In der Westschweiz wurden Trends zu einer Verfrühung des Erntetermins von Winterweizen beobachtet, die mit einer kürzeren Dauer der Kornfüllungsphase verbunden sind (Meier, 2015; Dario Fossati, pers. Mitt., 2022). Die kürzere Vegetationsperiode und die höheren Temperaturen wirken sich auch auf die Saisonalität des Wasserbedarfs aus, was im Hinblick auf mögliche Trockenheitsperioden im Frühjahr genau untersucht werden muss.

Fazit

Die jahreszeitliche Abfolge der landwirtschaftlichen Tätigkeiten wird stark von der Phänologie der Pflanzen bestimmt. Ein gutes Verständnis der phänologischen Entwicklung von Nutzpflanzen war früher und ist auch heute noch notwendig, um die Nahrungsmittelproduktion zu sichern. Dies erklärt neben dem generellen Interesse am Naturphänomen auch die Etablierung der Phänologie als wissenschaftliche Disziplin (Jeanneret *et al.*, 2018). Allein die zahlreichen Studien, die in der Schweiz in diesem Bereich durchgeführt wurden, zeu-

gen von dem Interesse an der Phänologie (Rutishauser *et al.*, 2020). Zudem, liefert die Phänologie wichtige Erkenntnisse zum Klimawandel und seinen Auswirkungen (siehe z.B. Walther *et al.*, 2002; Menzel *et al.*, 2020).

Die Länge der Vegetationsperiode ist nur eine der vielen Facetten der Phänologie. Obwohl wir uns hier thematisch eingeschränkt haben, hoffen wir, dass die vorliegende Studie einen kleinen Beitrag zu den derzeit in der Schweiz und anderswo laufenden Untersuchungen zur Veränderung der Klimafaktoren für die Pflanzenproduktion leisten kann. Die menschenverursachte globale Erwärmung ist ein Prozess, der vor einigen Jahrzehnten eingesetzt hat, zurzeit voll im Gange ist, und sich in naher Zukunft wahrscheinlich noch beschleunigen wird. Demzufolge ist davon auszugehen, dass die Saisonalität der Nutzpflanzen sich weiterbewegen wird, mit entsprechenden Folgen für die Landwirtschaft (Holzkämper *et al.*, 2020). Um die Landwirtschaft zu unterstützen, müssen diese Veränderungen sorgfältig verfolgt werden. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang die kürzlich erschienene Analyse von Erdin (2023) zur Korrelation zwischen dem Beginn der Weidezeit im Frühling bzw. Beginn der Winterfütterung im Herbst und der mittleren Jahrestemperatur. ■

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) für die Bereitstellung der räumlichen Klimaanalysen.

Bibliographie

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, 300 S.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P. et al. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Clim Change* 5, 143–147. <https://www.nature.com/articles/nclimate2470>
- Bütikofer, N., Vonlanthen, T., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2023). Thermische Eignungskarten für Sorghum in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz* 14: 24–33. <https://doi.org/10.34776/afs14-24>
- Buzzi, F., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., & Calanca, P., (2021). Temperatursummen-Karten für die Sortenwahl im Maisanbau. *Agrarforschung Schweiz* 12, 1–8.
- Calanca, P., & Holzkämper, A. (2010). Agrarmeteorologische Bedingungen im Schweizer Mittelland von 1864 bis 2050. *Agrarforschung Schweiz* 1(9): 320–325.
- Calanca, P., Wüst-Galley, C., Giuliani, S., & Erdin, D. (2022). Auswirkungen der Trockenheit auf die Produktivität des Schweizer Grünlands. *Agrarforschung Schweiz* 13: 135–144.
- Defila, C., & Clot, B. (2001). Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology*, 45(4): 203–207
- Defila, C., & Clot, B. (2005). Phytophenological trends in the Swiss Alps, 1951–2002. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(2): 191–196. DOI: 10.1127/0941-2948/2005/0021
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2022). *Wetter- und Klimalexikon*. Online Ausgabe. www.dwd.de/lexikon
- Erdin, D. (2023). Die Vegetationsperiode wird länger. *Agristat Aktuell* 01–23. Schweizer Bauernverband, Brugg. <https://www.sbv-usp.ch/de/agristat-aktuell-01-23-die-vegetationsperiode-wird-laenger>
- Gensler, G. A. (1946). *Der Begriff der Vegetationszeit*. Philosophische Fakultät II. Zürich, Universität Zürich: 142 S.
- Grünig, M., Mazzi, D., Calanca, P., Karger, D. N., & Pellissier, L. (2020). Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change. *Communications Biology*, 3(1), 233 (10 pp.). <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0962-9>
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48, RG4004 / 2010. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- Holzkämper, A., & Calanca, P. (2022). Auswirkungen der Trockenjahre 1947, 2003 und 2018 auf die Landwirtschaft. In: Hitze- und Trockensommer in der Schweiz. *Geographica Bernensia*, Bern, 16–17.
- Holzkämper, A., Hund, A., & Fossati, D. (2020). Saisonalitätsänderungen und die Folgen für die Landwirtschaft. In: Klimawandel und Jahreszeiten. *Geographica Bernensia*, Bern, 2020, 16–17.
- Isotta, F. A., Begert, M., & Frei, C. (2019). Long-term consistent monthly temperature and precipitation grid data sets for Switzerland over the past 150 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 3783–3799. <https://doi.org/10.1029/2018JD029910>
- Jeanneret, F., & Vautier, P. (1977). *Klimaeignungskarten für die Landwirtschaft in der Schweiz*. Eidg. Justiz- und Polizeidepartement und Eidg. Volkswirtschaftsdepartement, Bern, 47 S. + 4 Karten
- Jeanneret, F., Rutishauser, T., & Brügger, R. (2018). Phänologie und Saisonalität – Geschichte, Monitoring, Raumsprache. *Geographica Bernensia*, Band U26. doi:10.4480/GB2018.U26.
- King, M., Altdorff, D., Li, P. et al. (2018). Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, 8, 7904. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26321-8>
- Klein, G., Rebetez, M., Rixen, C. et al. (2018). Unchanged risk of frost exposure for subalpine and alpine plants after snowmelt in Switzerland despite climate warming. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1755–1762. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1578-3>
- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). U.S. Agro-Climatic in 20th Century: Growing Degree Days, First and Last Frost, Growing Season Length, and Impacts on Crop Yields. *Scientific Reports*, 8, 6977. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25212-2>
- Luder, W., & Moriz, C. (2005). Raufutterernte: Klimaerwärmung besser nutzen. *FAT Berichte* Nr. 634, 8 S.
- Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G. et al. (2021). Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *The Cryosphere*, 15, 1343–1382. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- Meier, M., Fuhrer, J., & Holzkämper, A. (2018) Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*, 62, 991–1002. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>
- Meier, S. (2015). Ernte wird immer hektischer. Schweizer Bauer, Ausgabe vom 21.02.2015. <https://www.schweizerbauer.ch/pflanzen/ackerbau/ernte-wird-immer-hektischer/>
- Menzel, A., Yuan, Y., Matiu, M. et al. (2020). Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*, 26, 2599–2612. <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>
- MeteoSchweiz (2013). Klimaszenarien Schweiz – Eine regionale Übersicht. *Fachbericht MeteoSchweiz* 246, 36 pp. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publicationen/publikationen/berichte-und-bulletins/2014/klimaszenarien-schweiz-eine-regionale-uebersicht.html>
- MeteoSchweiz (2023). Frühlingsindex. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/vegetationsentwicklung/fruehlingsindex.html>
- Rebetez, M., & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91, 27–34. DOI 10.1007/s00704-007-0296-2
- Rumpf, S. B., Gravey, M., Brönnimann, O. et al. (2022). From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science*, 376, 1119–1122. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn6697>
- Rutishauser, T., Brönnimann, S., Gehrig, R. et al. (2020). Klimawandel und Jahreszeiten (Reihe G Grundlagenforschung G97). *Geographica Bernensia*, Bern. doi: 10.4480/GB2020.G97.01
- Salisbury, F. B. (1982). Photoperiodism. *Horticultural Reviews*, 4, 66–105. <https://doi.org/10.1002/9781118060773.ch3>
- Schaumberger, A. (2011). *Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland*. Dissertation, Technische Universität Graz, 264 S.
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>
- Vitasse, Y., Ursenbacher, S., Klein, G. et al. (2021). Phenological and elevational shifts of plants, animals and fungi under climate change in the European Alps. *Biological Reviews*, 96, 1816–1835. <https://doi.org/10.1111/brv.12727>
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P. et al. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Walther, G.-R., Beissner, S., & Burga, C.A. (2005). Trends in the Upward Shift of Alpine Plants. *Journal of Vegetation Science*, 16, 541–548. <https://www.jstor.org/stable/4096792>
- Wanner, H. (1973). Eine Karte der Vegetationszeit im Kanton Bern: Beitrag zur Problematik von phänologischen Netzbeobachtungen. *Geographica Helvetica*, 28, 152–158. <https://doi.org/10.5194/gh-28-152-1973>
- Wiegand, C. L., & Cuellar, J. A. (1981). Duration of Grain Filling and Kernel Weight of Wheat as Affected by Temperature. *Crop Science*, 21, 95–101. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X001100010027x>
- Zurbenko, I. G., & Smith, D. (2018). Kolmogorov-Zurbenko filters in spatio-temporal analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 10:e1419. <https://doi.org/10.1002/wics.1419>
- Xie, J., Hüslar, F., de Jong, R. et al. (2021). Spring temperature and snow cover climatology drive the advanced springtime phenology (1991–2014) in the European Alps. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126, e2020JG006150. <https://doi.org/10.1029/2020JG006150>