

Klimawandel und Jahreszeiten

Report**Author(s):**

Rutishauser, This; Brönnimann, Stefan; Gehrig, Regula; Pietragalla, Barbara; Baumgarten, Frederik; Vitasse, Yann; Stöckli, Sibylle; Pfister, Christian; Holzkämper, Annelie; [Hund, Andreas](#) ; Fossati, Dario; Meier, Michael; Weingartner, Rolf; Buchmann, Moritz

Publication date:

2020

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000457612>

Rights / license:

[Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](#)

Originally published in:

Geographica Bernensia G97, <https://doi.org/10.4480/GB2020.G97.01>



Klimawandel und Jahreszeiten



Inhaltsverzeichnis

Pflanzenkalender dokumentieren den Rhythmus der Jahreszeiten	4
Regula Gehrig, Barbara Pietragalla, Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser	
Waldphänologie – Wie sich Klimaänderungen im Wald bemerkbar machen	8
Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser	
Timing in der Tierwelt	10
Sibylle Stöckli, This Rutishauser	
Meteophile Chronisten und die Jahreszeiten der letzten 1000 Jahre	12
Christian Pfister	
Kurze Winter, lange Sommer in Temperaturmessungen	14
Stefan Brönnimann	
Saisonalitätsänderungen und die Folgen für die Landwirtschaft	16
Annelie Holzkämper, Andreas Hund, Dario Fossati	
Spätfröste und Klimawandel – Steigt oder sinkt das Schadenrisiko?	18
Stefan Brönnimann, Annelie Holzkämper, Michael Meier	
Saisonalität des Abflusses – ein charakteristisches Merkmal der Fließgewässer	20
Rolf Weingartner	
Beobachtete und zukünftige Veränderungen der Schneebedeckung	22
Moritz Buchmann	
Anmerkungen, Bildnachweis und Autorenschaft	24

Redaktion:

This Rutishauser

Lektorat:

Isabel Plana

Layout:

Alexander Hermann

Bibliographische Angaben:

Rutishauser, This; Brönnimann, Stefan; Gehrig, Regula; Pietragalla, Barbara; Baumgarten, Frederik; Vitasse, Yann; Stöckli, Sibylle; Pfister, Christian; Holzkämper, Annelie; Hund, Andreas; Fossati, Dario; Meier, Michael; Weingartner, Rolf; Buchmann, Moritz (2020). Klimawandel und Jahreszeiten. Geographica Bernensia, G97, 28 S., doi:10.4480/GB2020.G97.01.

Übersetzungen:

Französisch (doi:10.4480/GB2020.G97.02)

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2020

Geographisches Institut der Universität Bern, Schweiz

Druck: Publikation Digital AG



Vorwort

Der Klimawandel hat unsere Aufmerksamkeit vermehrt auf Veränderungen in unserer Umwelt gelenkt. Extreme Ereignisse wie Stürme, Überschwemmungen, Trocken- und Hitzeperioden haben direkte Auswirkungen auf unsere Lebenswelt und unseren Alltag. Weniger offensichtlich aber von grosser Tragweite sind die Einflüsse, die der Klimawandel auf die Jahreszeiten ausübt. Die Verschiebung von Blüh- und Ernteterminen, der Rückgang von Schneetagen in höheren Lagen und gar das Ausbleiben von Winterschnee im Mittelland zeigt vor allem mit Blick über mehrere Jahre und Jahrzehnte die gravierenden Folgen für die Umwelt aber auch für Landwirtschaft, Tourismus und Raumplanung.

In phänologischen Beobachtungen – breit gefasst definiert als jahreszeitlich wiederkehrende Erscheinungsformen in der Umwelt – lassen sich sinnlich und alltäglich die Veränderungen erfahren, die der Klimawandel mit sich bringt. Darüber hinaus bilden die Überlieferungen dieser Beobachtungen von Generation zu Generation wichtige Brücken in Familiengeschichten und wichtigen Ortsbeschreibungen. Vor allem aber bringen uns die Beobachtungen näher, wie eng Mensch und Natur schon immer verbunden waren.

Am Geographischen Institut der Universität Bern hat phänologische Forschung eine lange Tradition. Was in den späten 1960er-Jahren als Beobachtungsnetz und Datengrundlage für die Raum- und Agrarreisungsplanung begann, mündete 1970 in die erste komplette Saison des Beobachtungsprogramms **BernClim** und bildet heute zusammen mit dem Datenschatz des **Schweizer Phänologie Beobachtungs-**

netzes von MeteoSchweiz das Rückgrat für raum-zeitliche Beschreibungen seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Beobachtungen seit dem Spätmittelalter bieten darüber hinaus die einmalige Möglichkeit, auch langfristige Veränderungen des Klimas zu zeigen.

Zum 50-jährigen Bestehen des Beobachtungsprogramms **BernClim** entstand die vorliegende Broschüre. Über die Aktivitäten in Bern hinaus kommen auch Forschende zu Wort, die sich mit ebensoviel Herzblut und Ausdauer für die phänologischen Beobachtungen und Auswertungen an anderen Institutionen engagieren. Sie forschen mit Pflanzen- und Tierbeobachtungen, im Wald und auf dem Feld und ziehen Schlüsse aus Wetterdaten, Schnee- und Gewässermessungen.

Die Grundlage für viele der hier präsentierten Jahreszeiten-Geschichten bilden Beobachtungen, die zum grossen Teil von Freiwilligen und oft über Jahre und Jahrzehnte gemacht wurden. Phänologie ist ohne dieses Engagement nicht möglich und bringt die Herausforderung mit sich, aus vielen individuellen Beobachtungen ein systematisches, grösseres Bild zu zeichnen.

Die Publikation dieser Broschüre wurde durch die **Sebastiana-Stiftung**, das **Oeschger-Zentrum für Klimaforschung (OCCR)** und die **Kommission für Phänologie und Saisonalität (KPS)** der **Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)** unterstützt. Gewidmet ist sie allen, die sich dafür einsetzen, das Zusammenspiel zwischen Mensch und Natur aus jahreszeitlicher Perspektive zu dokumentieren und besser zu verstehen.



Beobachtungsnetz BernClim in der Region Bern um 1974¹.

Pflanzenkalender dokumentieren den Rhythmus der Jahreszeiten

Die Phänologie der Pflanzen wird in verschiedenen Beobachtungsnetzen in der Schweiz erfasst. Sie ist stark von Umwelteinflüssen abhängig, wie der schnelle Klimawandel immer deutlicher zeigt. Die Reaktionen vieler Waldbaumarten über verschiedene Höhenstufen und über die Zeit sind grossen Veränderungen ausgesetzt. Bekannte Gesetzmässigkeiten der vergangenen Jahrzehnte verändern sich, was die Projektionen in die Zukunft erschwert.

Regula Gehrig, Barbara Pietragalla, Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser

Die Beobachtung verschiedener Entwicklungsstadien von Pflanzen hat eine jahrtausendelange Tradition. Zur Zeit der frühen Agrargesellschaften hing die Nahrungssicherheit stark von der wetterbedingten Entwicklung der Pflanzen ab. Zeitliche Abfolgen spielen in natürlichen Pflanzengemeinschaften aber auch für das Zusammenleben von Pflanzen, Tieren und Menschen eine zentrale Rolle.

Jahreszeitlich wiederkehrende Erscheinungen wie der Blattaustrieb oder die Blüte erfassen Veränderungen im Klimasystem in ihrer Gesamtheit. Im Frühling sind die steigende Temperatur und die zunehmende Tageslänge die treibenden Kräfte, die von Wassermangel und extremen Witterungsverhältnissen wie Frost und Stürmen gebremst werden können (Abb. 1). Längere Tage und steigende Temperaturen regen das Wachstum an. Ebenso wichtig für mehrjährige Pflanzen sind kalte Wintertemperaturen, die die Ruhephase einleiten und prägen. Die Erforschung der Prozesse in dieser Phase weisen noch Lücken auf.



Abb. 1: Entwicklungsstufen von Pflanzen im Jahresverlauf.

Das Klima ist neben dem Boden, der Bodenflora und -fauna, der aktuellen Witterung und den pflanzenindividuellen Einflüssen nur einer der bestimmenden Faktoren. Im Frühling ist es in den mittleren Breiten jedoch der dominante Faktor. Die enge Verbindung mit der Temperatur macht phänologische Beobachtungen heute auch zu einem wichtigen Impakt-Indikator. Für den Herbst und die Blattverfärbung sind Tageslänge und Sommertrockenheit mitbestimmend. Die Beobachtungen bei Buchen und Rosskastanien seit 1951 veränderten sich kaum. Tendenziell verspätet sich der Herbsteintritt unterhalb von 800m ü.M. leicht, während er sich in der Höhe leicht verfrüht. Sehr frühe Blattverfärbungen wurden während der Hitzesommer 2003, 2015 und 2018 beobachtet. Bereits Ende Juli und im August färbten sich Buchenblätter an trockenen Standorten braun.

Grosse räumliche Unterschiede

Mit phänologischen Beobachtungsnetzen werden Daten nach Anleitung systematisch gesammelt, damit räumliche Vergleiche möglich werden. Alle Beobachtungen beinhalten individuelle Unschärfen, die in der subjektiv geprägten Methodik der Beobachterinnen wurzelt, aber auch in genotypischen, pflanzenindividuellen Unterschieden und in standortspezifischen Eigenheiten der Umwelteinflüsse. Je mehr Daten vorliegen, umso deutlicher werden die Unterschiede der Pflanzentwicklung sichtbar.

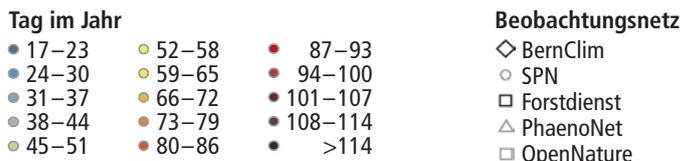
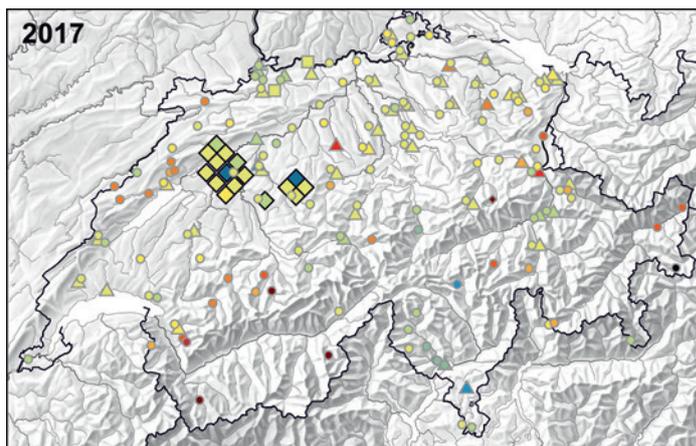
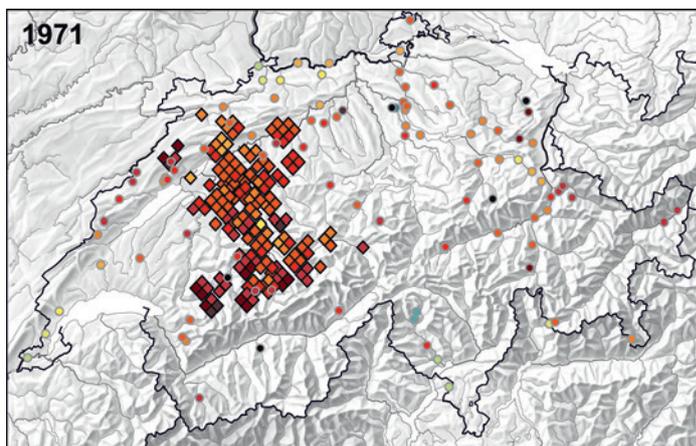
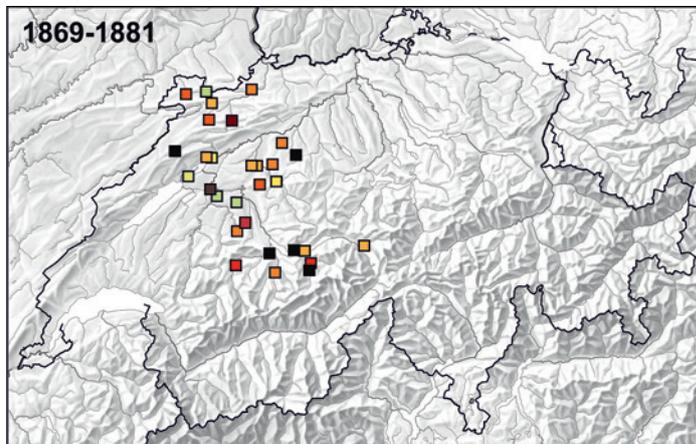


Abb. 2: Daten der allgemeinen Haselblüte von phänologischen Beobachtungsnetzen der Schweiz im 19. Jahrhundert (Forstdienst Kanton Bern), im 20. Jahrhundert (BernClim¹, MeteoSchweiz/SPN²) und im 21. Jahrhundert (BernClim, MeteoSchweiz/SPN, PhaenoNet³, OpenNature⁴). Tag 61 = 1. März.

Rückgrat der Beobachtungsnetze

Das **Schweizer Phänologie Beobachtungsnetz (SPN)**², das 1951 von Bernard Primault gegründet wurde, wird vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz geführt. Heute umfasst das Netz rund 160 Stationen im ganzen Land in Höhenlagen von 200 bis 1933 Metern über Meer. Die Vegetationsentwicklung wird anhand von 26 Pflanzenarten verfolgt. Dazu notieren die ehrenamtlichen Beobachterinnen und Beobachter pro Jahr bis zu 69 phänologische Ereignisse. Ein grosser Teil dieser Daten wird elektronisch übermittelt, sodass sie für Auskünfte und Auswertungen schnell zur Verfügung stehen.

Im 19. Jahrhundert dokumentierten Förster vom Oberland bis in den Berner Jura die Entwicklung im Wald und an teils stark exponierten Standorten (Abb. 2)⁵. Die Resultate zeigen deutlich, dass die Standortauswahl einen grossen Einfluss hat und zu einer hohen Variabilität führt. Im Durchschnitt blühte die Hasel in den 1870er-Jahren von Mitte Februar bis Ende März, an einzelnen Stationen auch erst nach Mitte April. Für die 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts liegen viel mehr Beobachtungen vor. Die grössere Stationsdichte der beiden Netzwerke **BernClim**¹ und **Schweizer Phänologie Beobachtungsnetz (SPN)**² von MeteoSchweiz⁶⁻⁸ ermöglicht differenzierte Aussagen auch zu Höhenunterschieden. Dominante rötliche Farben zeigen das mittlere Blühdatum Ende März mit früheren Daten am Juranordfuss, am Genfersee und im Tessin. Die Karte von 2017 zeigt die kleiner gewordene Zahl der **BernClim**-Beobachtungen. Neu dazugekommen sind Daten der beiden Citizen-Science-Plattformen **PhaenoNet**³ und **OpenNature**⁴ sowie eine grössere Zahl an **SPN**-Stationen⁹. Das Blühdatum hat sich mit gelb-grünen Schattierungen um einen knappen Monat auf Anfang März vorverschoben. Das **SPN** liefert räumlich hochaufgelöste Informationen für 26 Pflanzenarten an rund 160 Stationen.

Mit statistischen Methoden publiziert MeteoSchweiz jährlich aus den heterogenen und räumlich hochaufgelösten Beobachtungen einen Mittelwert für die phänologische Entwicklung in der Schweiz. In diesen Frühlingsindex¹⁰ fliessen das Datum von Blüte und/oder Blattentfaltung von neun verschiedenen Pflanzenarten an rund 80 Standorten mit langen Datenreihen ein (Abb. 3). Der Index macht starke jährliche Schwankungen sichtbar und verdeutlicht den allgemeinen Trend zu früherer Blüte und Blattentfaltung. Bis 1988 veränderte sich der Zeitpunkt des Frühlings nicht. Seit 1989 ist eine deutliche Verfrühung des Frühlings erkennbar.

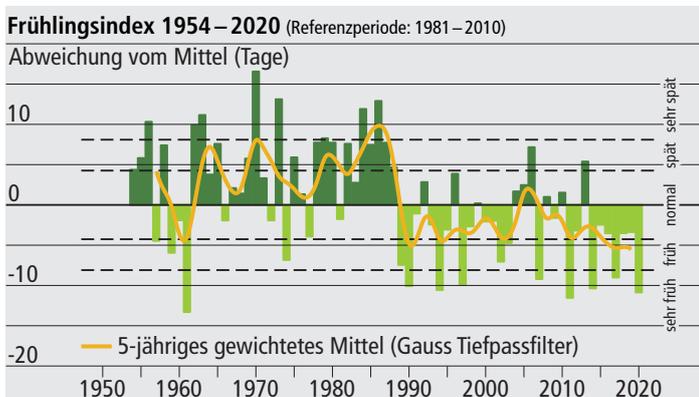


Abb. 3: Der Frühlingsindex¹⁰ zeigt den Zeitpunkt der Vegetationsentwicklung im Frühling im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981–2010. Dunkelgrüne Farben zeigen eine spätere und hellgrüne Farben eine frühere Vegetationsentwicklung als im Mittel.

Räumlich hochaufgelöste Klimainformationen

2020 feiert das Klimabeobachtungsprogramm **BernClim**¹ sein 50-jähriges Bestehen. 1970 startete Bruno Messerli das mesoklimatische Beobachtungsnetz am Geographischen Institut der Universität Bern. Das Ziel war und ist bis heute, Jahreszeiteninformationen, die im zeitlichen Auftreten von Pflanzenwachstumsstadien, Nebel und Schnee stecken, mit hoher räumlicher Auflösung für den Kanton Bern zu dokumentieren. Ursprünglich wurden die Daten für die Raumplanung erhoben. Heute sind sie wertvolle Dokumente für Klimaveränderungen. Freiwillige erfassen Entwicklungsstadien von Pflanzen im Sommer sowie Auftreten und Dauer von Schnee und Nebel im Winter. Die Blüten von Hasel, Löwenzahn und Apfelbaum, die Getreideernte und die Blattverfärbung der Buche sind die Pflanzenstadien im **BernClim**-Programm. Die grösste Anzahl Stationen war 200 zu Beginn des Projekts.

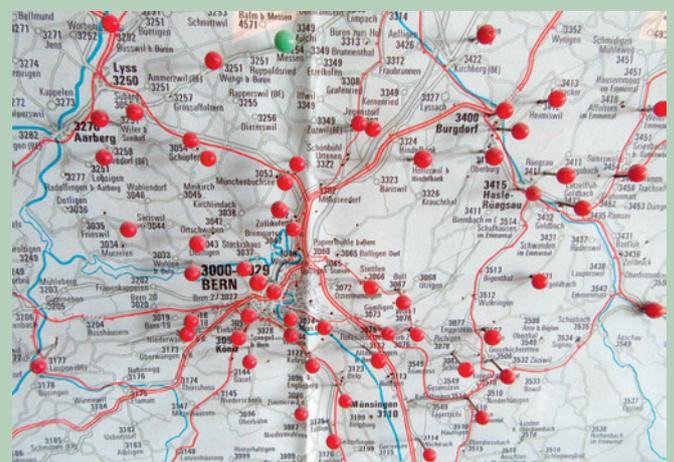


Abb. 4: Beobachtungsnetz BernClim in der Region Bern¹.

UNIVERSITÄT BERN GEOGRAPHISCHES INSTITUT Feldforschung		UNIVERSITÉ DE BERNE INSTITUT GÉOGRAPHIQUE Recherche climatologique		Beobachtungsstation Nr. 4991 Poste d'observation no	
MELDEBLATT FÜR PHÄNOLOGISCHE EREIGNISSE FORMULAIRE POUR PHÉNOMÈNE PHÉNOLOGIQUE				Apfelbaum Vollblüte Pommier pleine floraison 2004	
Standort Lieu	Koordinaten Coordonnées	Höhe Altitude	Exposition	Hangneigung Inclinaison	Sorte u. Bemerkungen Date et remarques
¹ Dorf / Korallen	629 1675 1214 1275	710	Flach	—	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 19.5.
² Mühlstein	629 1575 1214 1195	720	NE	33%	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 19.5.
³ Löh	629 1290 1214 1350	750	NE	20%	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 19.5.
⁴ Bergli	629 1700 1214 1725	760	S	40%	von Kanton / Bernerli. / Dabak 17.5.
⁵ Biedli	629 1700 1214 1350	720	S	40%	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 17.5.
⁶ Ofen	629 1730 1214 1515	750	WSW	20%	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 17.5.
⁷ Lago, Garten	629 1825 1214 1260	740	W	20%	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 17.5.
⁸ Puchhaus	629 1830 1214 1160	740	W	25%	Jauergl. / Bernerli. / Dabak 17.5.

ORIGINAL bitte bis am 1. Dezember an
das Institut zurücksenden
à retourner à l'Institut
jusqu'au 1er décembre

Ort und Datum
Lieu et date **Wylsachen, 19.5.04**

Unterschrift / Signature **A. Bommacher**

Abb. 5: Beispiel eines Beobachtungsformulars für phänologische Beobachtungen einer Pflanzenart des BernClim Beobachtungsnetzes¹.

Jahrzehnte im Blick

Zwei lange, jährlich aktualisierte Beobachtungsreihen aus dem ländlichen und städtischen Raum reichen lückenlos bis ins 19. Jahrhundert zurück⁶. In der Nähe von Liestal wird seit 1894 der Blühzeitpunkt eines wilden Kirschaums an einem Waldrand beobachtet (Abb. 6, Kirsche Liestal). Bis Ende der 1980er-Jahre wechselten sich Phasen mit früher

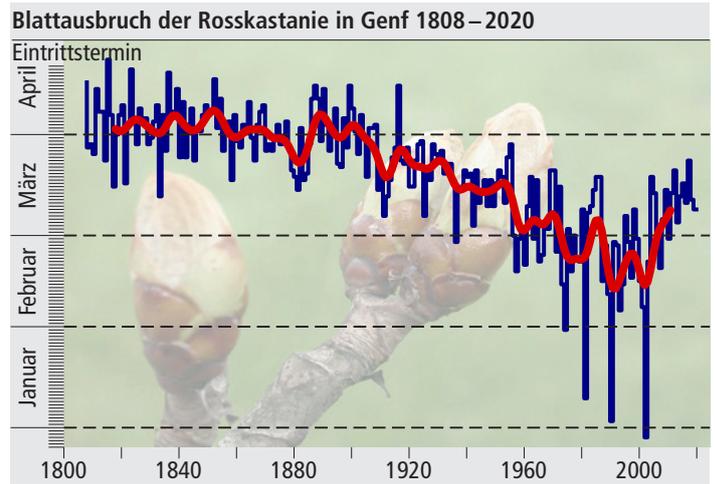
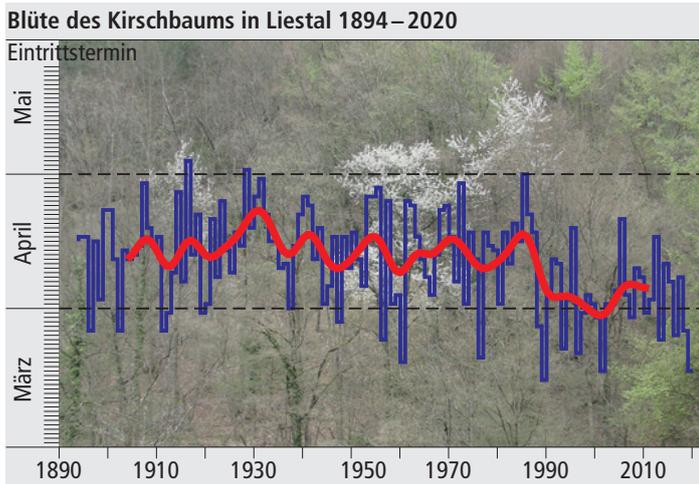


Abb. 6: Blüte des Kirschbaums bei Liestal 1894–2020 (links) und Blattaussbruch der Rosskastanie in Genf 1808–2020 (rechts)⁶.

oder später Blüte um den 14. April ab, ohne eine langfristige Änderung aufzuweisen. Seit 1989 blüht der Kirschbaum jedoch häufig deutlich früher, im Schnitt am 2. April, also rund zwei Wochen früher.

In Genf wurde das Datum des Blattausschlags der ersten Knospe einer Rosskastanie seit 1808 im Register notiert (Abb. 6 Rosskastanie rechts). Während der über 200-jährigen Periode musste am Standort an der **Promenade de la Treille** viermal ein neuer Baum gesucht werden, weil der alte abgestorben war, das letzte Mal 2015. Nicht nur das Klima, sondern auch Veränderungen in der Stadt trugen zu einer stärkeren Verfrühung als in Liestal bei. Durch die Bebauung vieler Grünflächen erwärmte sich die wachsende Stadt stärker als das Umland. Man spricht dabei von der städtischen Wärmeinsel. Seit einigen Jahren hat sich der Trend des Blattausschlags umgekehrt. Die Gründe dafür sind noch nicht bekannt. Es könnte am Baum selber, an Veränderungen der Umgebung oder an einer geänderten Reaktion auf die Temperaturen liegen.

Schutzmechanismen am Limit

Die Langzeitbeobachtungen in der Schweiz reflektieren die kontinuierliche Erwärmung mit einer Verfrühung der Vegetationsentwicklung^{7,12}. Viele Pflanzen reagieren auf die steigenden Temperaturen, indem sie früher blühen und auch früher ihre Blätter entfalten. Viele Pflanzen haben Schutzmechanismen, damit sie an warmen Wintertagen nicht schon blühen oder austreiben. Damit Pflanzen auf höhere Temperaturen mit Wachstum reagieren, muss eine bestimmte Summe an kalten Temperaturen im Winter erfüllt sein (chilling, Vernalisation). Einige Pflanzen starten ihre Entwicklung erst, wenn die Tage genügend lang sind: Bei der Buche veränderte sich deshalb der Zeitpunkt der Blattentfaltung seit 1951 kaum und ist heute nur fünf Tage frü-

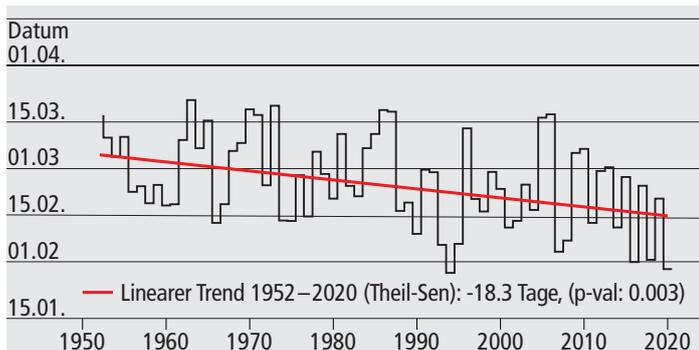


Abb. 7: Trend der Blüte des Haselstrauchs für SPN-Stationen des Phänologischen Beobachtungsnetzes, die unterhalb von 800m ü.M. liegen.

her. Die Hasel hingegen hat keine Schutzmechanismen und reagiert hauptsächlich auf die Temperatur (Abb. 7). Ihre Blüte verfrühte sich im Vergleich zu 1952 an **SPN**-Stationen unter 800 Metern über Meer um ganze 18 Tage, etwas mehr als die Blüte des Löwenzahns (14 Tage) oder des Kirschbaums (11 Tage).

Ändernde Gesetzmässigkeiten im Klimawandel

Bereits 1920 formulierte der amerikanische Insektenforscher Andrew D. Hopkins¹³, dass sich phänologische Phasen über Längen- und Breitengrade sowie mit der Höhe nach bestimmten Gesetzen und Gradienten verändern. So treiben Laubbäume in der Höhe wegen tieferer Temperaturen durchschnittlich später aus. Beobachtungen aus den Schweizer Alpen zeigen aber, dass sich das «Hopkinsche Gesetz» über die Zeit verändert und mit ihm die Gradienten. In den 1960er-Jahren trieben vier Baumarten an 128 Stationen Europas im Durchschnitt 34 Tage später aus mit 1000 Meter zunehmender Höhe. 2016 betrug die Verzögerung pro 1000 Höhenmeter nur noch 22 Tage¹⁴. Die stärkere Verfrühung in höheren Lagen hängt höchstwahrscheinlich mit einer stärkeren Erwärmung im späten Frühjahr sowie mit wärmeren Wintertemperaturen zusammen.

Auch über die Zeit verändern sich die Einflüsse steigender Temperaturen auf viele Waldbaumarten. Mit jedem Grad Erwärmung reagieren Baumarten mit früherem Blattaustrieb. Diese Temperatursensitivität ist über die Zeit nicht gleich. Im Durchschnitt über sieben Baumarten nahm die Temperatursensitivität seit den 1980er-Jahren von knapp vier Tagen pro Grad Erwärmung auf noch rund 2,5 Tage pro Grad in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts (Abb. 8)¹⁵. Beide Studien mit phänologischen Beobachtungsdaten zeigen, wie schwierig die Projektion von Veränderungen in die Zukunft ist, wenn sich grundlegende Gesetze und Zusammenhänge über die Zeit verändern.

Technische Entwicklungen mit Satellitensensoren und Bildauswertungen eröffnen immer neue Beobachtungsmöglichkeiten von Pflanzen. Sie ergänzen die langfristigen Beobachtungen, die Grundlage für die Einordnung von Veränderungen sind.

Die klimatischen Veränderungen werden zeigen, welche Wechselwirkung von Faktoren die zukünftigen Jahreszeiten in der Pflanzenwelt am stärksten beeinflussen. Sicher ist, dass die landwirtschaftliche Produktion und die ökologischen Grundlagen auch zukünftig von der Entwicklung der Pflanzen bestimmt werden. Phänologische Beobachtungen sind sehr eng mit dem Leben der Menschen verbunden.

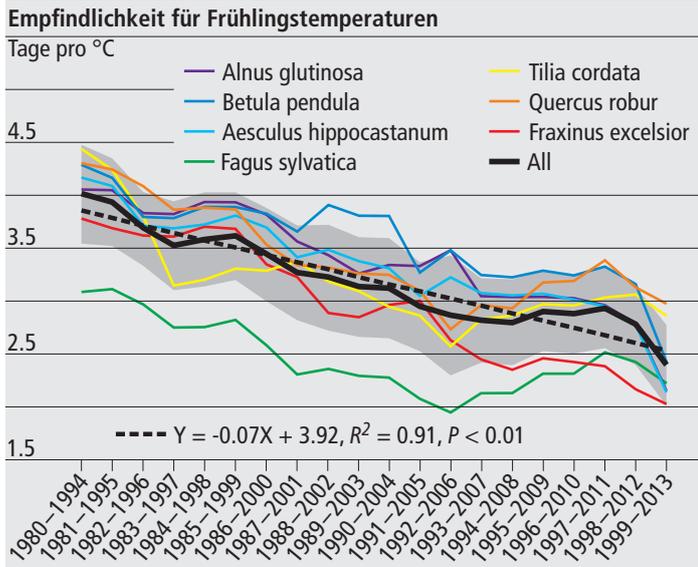


Abb. 8: Temperatursensitivität zeigt die Reaktion der Pflanzen auf Temperaturänderungen. Der Blattaustrieb von sieben Baumarten nimmt von ca 3,5 Tage pro Grad Erwärmung von 1980–1994 ab auf 2,5 Tage pro Grad Erwärmung von 1999–2013.¹⁵

Extremfrühling 2020

Im Jahr 2020 entwickelte sich die Vegetation nach einem der schneeärmsten Winter im Mittelland ausserordentlich früh. Nur 1961 und 2011 erwachte der Frühling noch früher, wie die Beobachtungen von MeteoSchweiz und **BernClim** zeigen. Die Hasel blühte im Januar und Februar mit einem Vorsprung von einem Monat auf das Mittel der Periode 1981–2010. Im März blühten Huflattich und Buschwindröschen mit drei Wochen Vorsprung. Trotz Kälteeinbruch im März setzte die Obstbaumblüte bereits Anfang April ein. Damit ist das Jahr 2020 Spitzenreiter gegenüber vergleichbaren Jahren, mit einem Vorsprung von zwei Wochen bei der Obstbaumblüte. Ab dem 10. April wurden die Wälder sehr schnell grün. Auch die Buchenblätter entfalteten sich elf Tage früher als im Mittel. Bereits Ende Mai waren reife Kirschen und Erdbeeren zu finden, was sonst erst im Sommer – ab Juni – der Fall ist.¹⁶



Abb. 8.1: Frühling mit blühenden Kirschbäumen und Löwenzahn.

Waldphänologie – Wie sich Klimaänderungen im Wald bemerkbar machen

Im Wald treiben und blühen Pflanzen in unterschiedlichen Schichten. Das Zusammenleben der Arten auf kleinem Raum und in verschiedenen Höhen ist eingespielt, wird aber von Änderungen des Klimas neu herausgefordert.

Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser

Kaum eine andere Reaktion der Waldbäume zeigt gegenwärtig die Wirkung der Klimaerwärmung so deutlich wie die Verschiebung der phänologischen Phasen. Besonders im Frühling verschieben sich Austrieb und Blüte näher zum Winter. In unseren gemäßigten Breiten sind die Entwicklungsprozesse der Pflanzen in hohem Masse temperaturabhängig, sodass phänologische Beobachtungen auch für den Wald sensitive Indikatoren des Klimawandels sind.

Die Wahl einer günstigen zeitlichen Abfolge dieser wichtigen Entwicklungsphasen ist für das Überleben und die Fortpflanzung von Pflanzenarten essenziell. Evolutionsprozesse haben die Lebensweise in den Wäldern bestmöglich an die naturräumlichen und klimatischen Bedingungen angepasst. Der Blattaustrieb ist zeitlich so auf die Umweltbedingungen abgestimmt, dass die Pflanzen Licht, Nährstoffe und Wasser optimal ausnützen können, ohne dass sie von Frostereignissen (siehe Kapitel Frost) beschädigt werden. Entsprechend sind auch Entwicklungsprozesse zwischen Arten synchronisiert, sodass die verfügbaren Ressourcen optimal (z.B. zeitlich versetzt) genutzt werden können. Dies ist nicht nur unter den Pflanzen entscheidend, sondern für alle Lebewesen im Nahrungsnetz des Ökosystems Wald – von Pilzen über Insekten bis zu Vögeln und Säugetieren (siehe Kapitel Tiere).

Innerhalb einer Pflanzenart reagieren Individuen mit einer Bandbreite an verschiedenen Austriebszeiten auf den Klimawandel. Dies widerspiegelt die Spannweite von Erbanlagen innerhalb einer Art (Variabilität der Genotypen, Abb. 9) und vermindert, wenn man das Kollektiv betrachtet, die Anfälligkeit auf Stressfaktoren wie Trockenheit oder Frost. Pflanzen verfolgen seit jeher unterschiedliche Strategien, die es ihnen ermöglichen, unterschiedliche Nischen im Lebensraum zu bewohnen. Die moderne Forstwirtschaft steht vor der grossen Herausforderung, Anpassungen an ein trockeneres und wärmeres Klima zu begünstigen, um die Ökosystemleistungen des Waldes langfristig bewahren zu können.

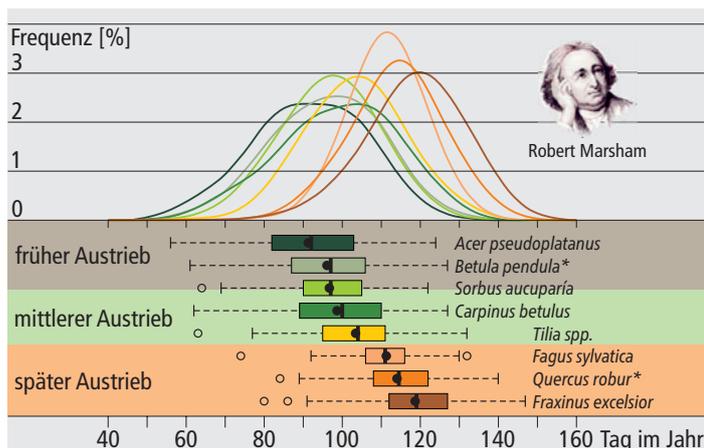


Abb. 9: Phänologische Aufzeichnungen der Marsham-Familie für acht temperate Baumarten von 1736 bis 1958 und die Verteilung der Austriebsdaten in Norfolk (UK)^{14,17}. Die Boxplots zeigen Mittelwert (schwarzer Kreis), Median, die Quartile und die Extreme.

Wachsen in verschiedenen Schichten

Wälder sind aus phänologischer Sicht spezielle Ökosysteme, weil in ihnen die Entwicklungsphasen auf unterschiedlichen Höhen über Grund sichtbar werden. Im Wald konkurrieren Pflanzen in der Boden-,



Abb. 10: Pflanzenteppich vor dem Austrieb der Kronenschicht: Die kurze Vegetationszeit des Buschwindröschens ermöglicht das Überleben auf dem später schattigen Sommerwaldboden.

Kraut- und Kronenschicht um die Verfügbarkeit von Licht, Nährstoffen und Wasser. Entsprechend entwickelt sich das Bild des Waldes mit den Jahreszeiten. Die Krautschicht auf dem Waldboden entwickelt sich als erste und nutzt das kurze Zeitfenster, bis das austreibende Laub der Bäume den Boden in den Schatten stellt und ihre Photosyntheseleistung drastisch beeinträchtigt (Abb. 10). Buschwindröschen und Bärlauch sind zwei weit verbreitete Arten, die ihre Entwicklung in dieses kurze Zeitfenster pressen. Solche Frühlingsgeophyten schöpfen die Kraft aus unterirdischen Speicherorganen und können schnell auf günstige Veränderungen im Frühling reagieren. Teppichartig breiten sie sich aus, gut sichtbar mit dem saftigen grün auf dem oft noch frisch ausgeparten Waldboden.

Experimentelle Forschung hat die Phänologie verschiedener Altersklassen der gleichen Art untersucht. Es zeigte sich, dass jüngere Individuen von Waldbäumen eine riskantere Strategie verfolgen und wesentlich früher austreiben, um genügend Licht zu bekommen (je nach Art zwei bis vier Wochen, Abb. 11). Je älter ein Individuum wird, desto mehr hat es sich «den Platz am Licht» erobert und reduziert wieder das Risiko, von einem Spätfröhen getroffen zu werden. Setz-

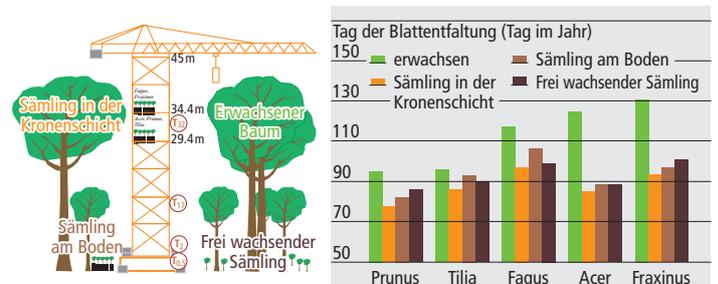


Abb. 11: Links: Experimentelles Setup bei dem der Blattaustrieb von Sämlingen, Setzlingen und ausgewachsenen Bäumen derselben Art untersucht wurde. Sämlinge wurden zusätzlich an einem Kran in die Höhe verpflanzt, um das Mikroklima zu verändern. Die Kreise bezeichnen unterschiedliche Temperaturen je nach Höhe. Rechts: Sämlinge entfalten ihre Blätter eine Woche (Kirschaum, Linde) bis über einen Monat (Ahorn, Esche) früher als ausgewachsene Bäume.¹⁸

linge, die auf die Höhe der Baumkrone gebracht wurden, verspäteten ihren Blattaustrieb leicht aufgrund des kühleren Mikroklimas (Abb. 11). Um Reaktionen von adulten Bäumen experimentell untersuchen zu können, ist es möglich, nur deren Zweige zu verwenden. Anders als bei Setzlingen treiben diese nicht früher aus, sondern widerspiegeln tatsächlich den Blattaustrieb ihres Mutterbaumes.

Abrupter Klimawandel: Verändertes Zusammenspiel und extreme Ereignisse

Das sich schnell verändernde Klima bringt das fragil abgestimmte Miteinander der Pflanzen im Wald durcheinander. Reagieren ausgewachsene Laubbäume mit früherem Blattaustrieb schneller auf eine stärkere Erwärmung im Frühling und schliesst sich die Kronenschicht früher, steht Pflanzen in unteren Schichten früher weniger Licht zur Verfügung. Die zugrunde liegenden Prozesse sind nicht augenfällig, gehen langsam vor sich und sind noch nicht soweit bekannt, als dass Forschende die Veränderungen und Verschiebungen erklären könnten.

Weit offensichtlicher sind die Einflüsse von Extremereignissen. Die lange und intensive Trockenheit im Sommer 2018 hat in der Schweiz weit verbreitet Spuren hinterlassen¹⁹. Die vorzeitigen Laubverfärbungen in einigen Kantonen (z.B. Jura, Basel-Land, Schaffhausen) sind ein klares Zeichen für akuten Wassermangel und ein Selbstschutz vieler Bäume (Abb. 12 und 13).



Abb. 12: Nach dem trockenen Sommer 2018 reagierten viele Laubbäume mit einer frühen Verfärbung.¹⁹

Seit 2018 beobachtet die Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft 1000 Buchen in der Schweiz, um die Prozesse besser verstehen zu können und konkrete Empfehlungen für die Forstwirtschaft zu formulieren, wie die Artenzusammensetzung und Waldpflege zukünftig gestaltet werden sollen. In weiteren Projekten werden verschiedene Baumarten an grossen Umweltgradienten in der Schweiz gepflanzt, um die Zukunftsfähigkeit von Arten zu testen²⁰.



Abb. 13: Beispiel eines vorzeitigen Laubfalls der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) im August 2018 (links), gefolgt von einem ausbleibenden Austrieb im nächsten Frühjahr im Hardwald bei Basel.

Eine weitere Konsequenz eines verfrühten, temperaturbedingten Austriebs sind Frostschäden, die zu dieser Zeit im Frühjahr immer noch wahrscheinlich sind. Am 11. Mai 2020 brachte ein Tief Luftmassen aus dem Norden und liess die Temperatur oberhalb von 1100 Metern über Meer nochmals unter den Gefrierpunkt fallen. Als Folge davon verlor die Rotbuche in den höheren Lagen des Juraabogens teilweise sämtliche neu ausgetriebenen Blätter (Abb. 14).



Abb. 14: Buchen nach einem Frostereignis am 11. Mai 2020 auf dem Weissenstein auf 1380 Metern bleiben bis im Hochsommer ohne grüne Blätter.

Berner Waldphänologie im 19. Jahrhundert

Von 1869 bis 1882 betrieb der Bernische Forstdienst ein klimatologisches und phänologisches Beobachtungsnetz. An rund 70 Beobachtungsstationen wurden – allerdings nicht lückenlos – 48 Arten erfasst. Forstwarden sollten meteorologische Messungen im Wald machen, um den Witterungseinfluss auf den Wald, aber auch den Einfluss des Waldes auf den Klimawandel besser zu verstehen. Nebst den Messungen sollten die Förster auch die Witterung und die Phänologie verschiedener Pflanzenarten beobachten. Die Daten wurden monatlich in der **Schweizerischen Zeitschrift für das Forstwesen** und jährlich von der Forstdirektion publiziert. Heute sind sie digital zugänglich.

Die Karte zeigt das durchschnittliche Blühdatum der Hasel an 30 Standorten vom Oberland über das Emmental und das Mittelland bis in den Jura. Die Standorte haben unterschiedliche Neigung und Distanz zum Waldrand, was einen Teil der grossen Variabilität erklärt.

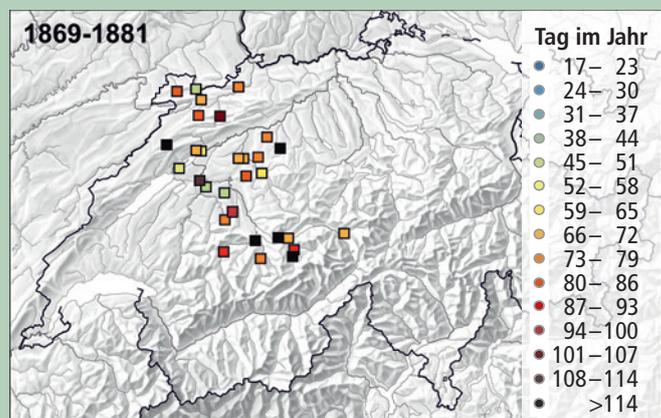


Abb. 15: Durchschnittliche Blühdatum der Hasel 1869–1881 im Beobachtungsnetz des Bernischen Forstdienstes.⁵

Timing in der Tierwelt

Die biologischen Uhren von Tieren sind auf Umwelteinflüsse abgestimmt. Die individuellen Reaktionen auf Klimaveränderungen fallen entsprechend sehr unterschiedlich aus. Wie sich die unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten auf ökologische Zusammenhänge auswirken, ist eine grosse Herausforderung für die Forschung.

Sibylle Stöckli, This Rutishauser

Die jahreszeitliche Entwicklung von Tieren wird durch das Wetter und das Klima beeinflusst²¹. Bestimmte Signale wie die Tageslänge lösen bei Tieren eine Verhaltensänderung zur Anpassung an die ungünstigen Bedingungen im Winter aus. So wissen Tiere im Herbst instinktiv, wann es für sie Zeit ist, in den Süden zu fliegen, die Entwicklung zu stoppen, in Winterruhe zu gehen oder sich einen Futtervorrat anzulegen. Das saisonale Verhalten haben aufmerksame Beobachter schon lange erfasst. Dazu gehört der Beginn des Bienenflugs oder die erste Sichtung einer Rauchschnalbe. In der Landwirtschaft sind saisonale Beobachtungen relevanter Entwicklungsstadien von Schadinsekten ein wichtiger Bestandteil eines nachhaltigen Pflanzenschutzes. Diese Beobachtungen fliessen auch in Beratungsbulletins für den Pflanzenschutz ein²². Zusätzlich gibt es auch Prognosemodelle, die bereits frühzeitig das potenzielle Aufkommen solcher Stadien simulieren²³.

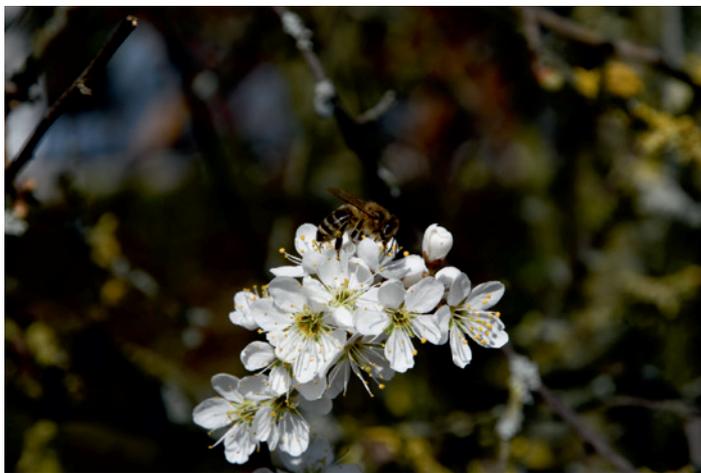


Abb. 16: Schwarzdorn und Bienenflug sind aufeinander abgestimmt.

Fingerabdruck des Klimawandels

Phänologische Anpassungen an den beobachteten Klimawandel zeigen sich auch in der Tierwelt²⁴⁻²⁸ und haben in Zeiten des beschleunigten Klimawandels nur an Aktualität gewonnen. Das bekannteste

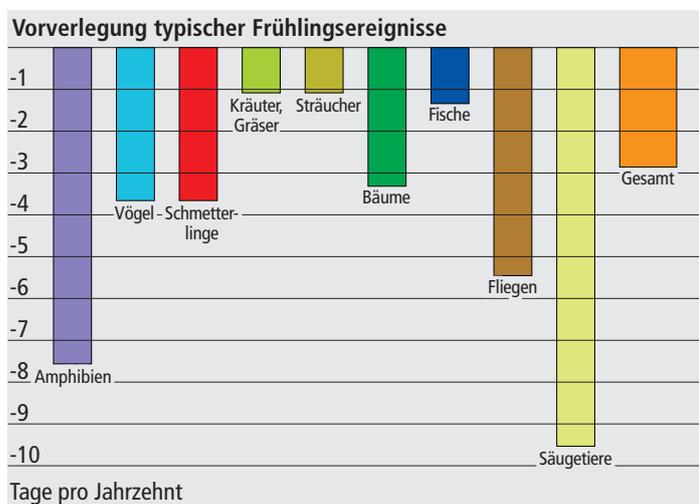


Abb. 17: Vorverlegung typischer Frühlingseignisse bei Pflanzen und Tieren auf der Nordhalbkugel in Tagen pro Jahrzehnt²⁴.

Beispiel sind die An- und Abflugzeiten von Zugvögeln. Die jährliche Migration ist eine ökologische Notwendigkeit für die Vögel, aber auch für die Menschen hat sie eine symbolische Bedeutung im Jahreskalender. Die längere Vegetationsperiode ermöglicht eine frühere Ankunft. Oft verschieben sich die Abflugzeiten kaum, weil sich die Vögel stärker nach der Tageslänge und weniger nach Klimaveränderungen richten. Im Frühling verändern sich ausserdem die Legedaten vieler Vögel. Auch bei anderen Tierarten zeigen Beobachtungen ein früheres Auftreten im Frühling (Tabelle 3.1 in³²). Die Veränderungen sind jedoch je nach Art und Standort variabel²⁹. Einige Arten reagieren auch gar nicht. So ist die Vorverlegung typischer Frühlingsaktivitäten bei Amphibien zweimal so stark wie bei Vögeln oder Schmetterlingen (Abb. 17). Zusätzlich reagieren auch die Amphibienarten untereinander sehr unterschiedlich. Viele Schmetterlingsarten in Grossbritannien, Spanien und Kalifornien haben ihren ersten Flug des Jahres vorverlegt. Zudem zeigt sich, dass gebietsfremde Arten sich oft schneller an die geänderten klimatischen Bedingungen anpassen können. Verallgemeinernd legen Beobachtungen nahe, dass die Unterschiede verschiedener Arten im gleichen Untersuchungsgebiet oft grösser sind als die mittleren Unterschiede dieser Arten zwischen verschiedenen Regionen. Da nicht alle Arten gleich auf die veränderten klimatischen Bedingungen reagieren, kommt es zu Änderungen in ökologischen Beziehungen³⁰. In der Landwirtschaft ist die Bestäubung eine der wichtigsten ökologischen Funktionen. Die Häufigkeit von Bestäubern wie Bienen und deren Futterpflanzen nimmt ab, und der Klimawandel ist neben der Änderung der Landnutzung eine wichtige Ursache dafür^{31,32}.

Grosse Räume, kleine Lebenswelten

Wie sich über Jahrhunderte grossräumige Witterungslagen auf den Bruterfolg der Kohlmeise auswirken, ist ein Beispiel von unzähligen, welches die Einflüsse verdeutlicht (Abb. 18)³³. Klimaindikatoren liefern in einem ersten Schritt grossräumige Zirkulationsmuster in der Atmosphäre, die in verschiedenen Indizes Stärke und Richtung von vorherrschenden Winden über dem Atlantik und Südosteuropa beschreiben. Die atmosphärische Zirkulation ihrerseits hängt eng mit dem lokalen Klima im Frühling zusammen, das in Temperatur und Niederschlag gemessen wird. Diese Faktoren haben wiederum einen Einfluss darauf, wann die Kohlmeisen ihre Nester bauen und Eier legen. Zudem sind die Witterungsbedingungen ausschlaggebend dafür, wie viele Eier in einem Nest liegen und wie viele Jungtiere schlüpfen. Am Schluss der Kette – und auch wichtig für viele weitere Zusammenhänge in der Nahrungskette – ist die Zahl der Jungen, die das Nest verlassen (Abb. 18).

Folgen des zukünftigen Klimawandels auf Schadinsekten

Durch die globale Erwärmung setzt die phänologische Entwicklung von Schadinsekten früher im Jahr ein und vollzieht sich schneller. Zudem finden gebietsfremde Schadinsekten neue, geeignete Gebiete und können sich ausbreiten und etablieren^{31,34}. Beim Apfelwickler begünstigt dies die Entwicklung von zusätzlichen Generationen (Abb. 19)²⁷. Das Risiko für Schäden durch den Apfelwickler unter zukünftigen Klimabedingungen wird grösser. Er wird in Zukunft zahlreicher

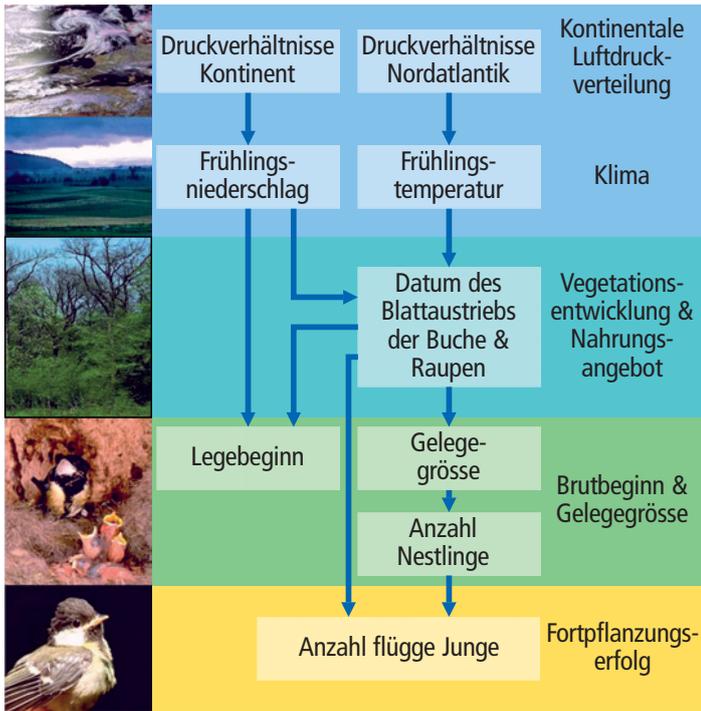


Abb. 18: Globale Klimafaktoren beeinflussen den Brutserfolg von Kohlmeisen über eine komplexe Wirkungskette³³.

und länger in den Obstanlagen anzutreffen sein. Der Apfelwickler und andere Schadinsekten müssen also zukünftig länger im Jahr beobachtet und bekämpft werden. Unter den heutigen Bedingungen treten Eier und Larven ab Ende Mai bis Anfang September in den Anlagen

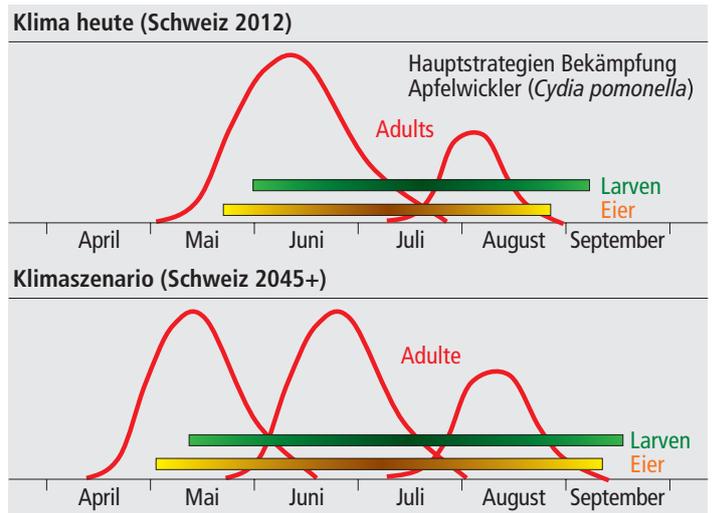


Abb. 19: Apfelwicklerpopulation heute und in Zukunft und die wichtigsten Strategien zur Bekämpfung²⁷.

auf. Unter den zu erwartenden Klimaveränderungen beginnt die Saison ab 2045 rund zwei Wochen früher und dauert im Herbst rund drei Wochen länger. Gleichzeitig werden neu drei Generationen von ausgewachsenen Apfelwicklern zu beobachten sein.

Allerdings zeigen sich auch Chancen des Klimawandels für den Pflanzenschutz. Die erwartete Hitze während der Sommermonate dürfte einigen Schadinsekten wie der Marmorierten Baumwanze zu schaffen machen²⁶. Es ist deshalb wichtig, schon jetzt nachhaltige Bekämpfungsstrategien für zukünftige Klimaszenarien zu entwickeln.



Abb. 19.1: Schwalben ziehen gemeinsam los.

Meteophile Chronisten und die Jahreszeiten der letzten 1000 Jahre

Phänologische Daten dokumentieren kalte und warme Witterungsextreme seit dem Hochmittelalter, die eine zuverlässige saisongenaue Temperaturschätzung erlauben. Anhand einer 664 Jahre langen Reihe von Weinlesedaten aus Beaune (Burgund) lässt sich zeigen, dass die zwischen 1354 und 1987 nachgewiesenen warmen Extreme mittlerweile normal geworden sind.

Christian Pfister

Im mittelalterlichen Europa wurden Witterungserscheinungen lange Zeit als Auswirkung magischer Kräfte gedeutet. Grundlagen für eine empirische Naturbeobachtung schufen erst die lange verschollenen Schriften der antiken griechischen Philosophen und Naturwissenschaftler. Im 8. und 9. Jahrhundert waren sie im Rahmen eines gross angelegten Forschungsprogramms in Bagdad ins Arabische übersetzt worden. Vom 12. Jahrhundert an wurden sie im islamischen Spanien ins Lateinische und ins Griechische übersetzt³⁵. Sie leiteten in West- und Mitteleuropa eine fundamentale intellektuelle Neuorientierung ein, die sich auch in der Wetterchronistik deutlich niederschlug. Während sich die meisten älteren Schilderungen auf lakonische Aussagen wie «warmer Sommer» beschränkten, strebten meteophile Chronisten ab dem ausgehenden 12. Jahrhundert danach, ihre ausführlicheren Beschreibungen von extremen Wetterereignissen durch Verweis auf quasi-objektive Naturerscheinungen überzeitlich vergleichbar zu machen. Phänologische Beobachtungen der wichtigsten Kulturpflanzen, namentlich von Getreide und Wein, boten sich dabei als Massstab an. Mehr als 400 entsprechende Textpassagen sind in hoch- und spätmittelalterlichen Chroniken nachgewiesen³⁶.

Pioniere und Bürokraten

Im 18. Jahrhundert gingen Pioniere zu systematischen Beobachtungen über. Allen voran der Winterthurer Bäcker und Winzer Hans Rudolf Rietter. Von 1721 bis 1738 protokollierte er den Witterungsverlauf und seine Auswirkungen und hielt den Zeitpunkt von 19 phänologischen Phasen fest, unter anderem die Vollblüte der Kirschbäume, die ersten Roggenähren und die Rotfärbung der Trauben. Noch umfangreicher war das Programm des Berner Pfarrers Johann Jakob Sprüngli im Zeitraum von 1760 bis 1802. Es umfasste rund 4000 pflanzen- und tierphänologische Einzelbeobachtungen, unter anderem in tabellarischer Form³⁷.

Die internationale Vereinheitlichung der nationalen meteorologischen Netzwerke im späten 19. Jahrhundert legte fest, dass in den offiziellen Jahrbüchern nur noch bloss Messdaten publiziert werden sollten. Die Meteo-Bürokraten schlossen Begleiterscheinungen der Witterung wie die Vegetationsentwicklung und die Schneebedeckung von der Publikation aus. Doch führten motivierte Beobachter, zumeist Lehrer, an drei meteorologischen Stationen im Kanton Schaffhausen ihre phänologischen Beobachtungen von 1876 an weiter, wobei sie diese bis 1950 im kantonalen Amtsblatt veröffentlichen konnten³⁸. Von diesem Zeitpunkt an gleiste die heutige MeteoSchweiz ein eigenes phänologisches Beobachtungsprogramm auf.

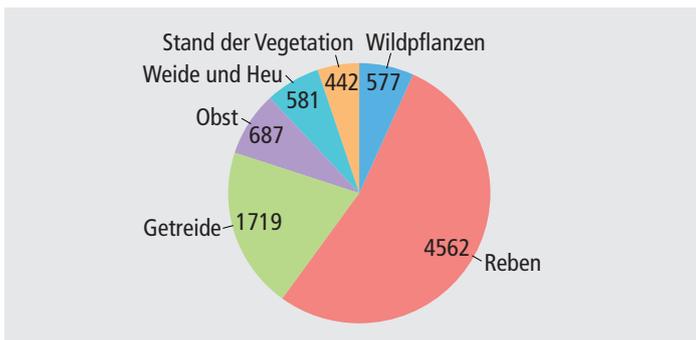


Abb. 20: Euro-Climhist enthält primär Blüte und Ernte der Rebe und des Getreides, ferner die Blüte von Obstbäumen.³⁹

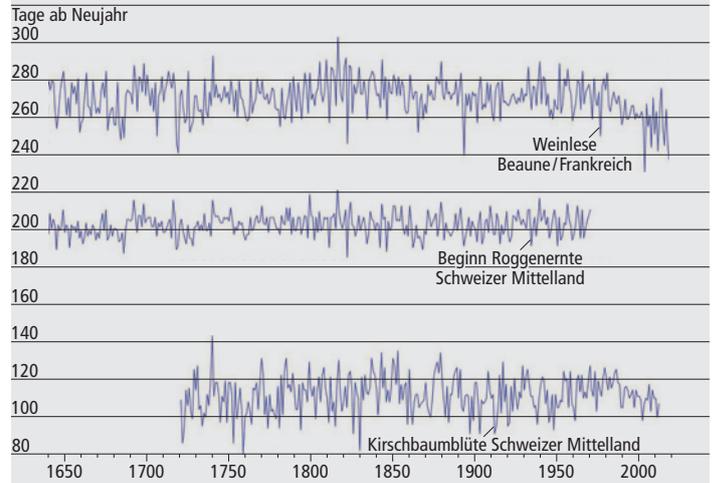


Abb. 21: Der Vergleich von mehreren phänologischen Zeitreihen erweitert die langfristigen Erkenntnisse zum Klimawandel.

In der Datenbank **Euro-Climhist** können zurzeit 8568 phänologische Einzeldaten abgerufen werden, wobei die meisten aus der Schweiz stammen und bis ins Jahr 1500 zurückreichen³⁹. Am häufigsten festgehalten wurden Daten zur Entwicklung der Reben (Blüte, Rotfärbung, Ernte), gefolgt von Daten zur Entwicklung des (Winter-)getreides (Ähren, Blüte, Erntebeginn). Beim Obst handelt es sich meist um den Zeitpunkt der Kirschenblüte, gefolgt von Beobachtungen zum Beginn der Rohfuttermaterie und der Frühjahrswaide sowie Beobachtungen von Wildpflanzen, wobei es sich zur Hauptsache um blühende Blumen in warmen Wintern sowie um die Blattentfaltung der Buche handelt (Abb. 20). Viele greifbare Daten warten noch darauf, in **Euro-Climhist** aufgenommen und ausgewertet zu werden.

Erst wenige phänologische Daten können in Form von langen Zeitreihen abgerufen und dargestellt werden (Abb. 21). Die meisten stammen aus der Buchhaltung von Klöstern, Spitälern und Gemeinden und beziehen sich auf den Beginn der Getreideernte und der Weinlese.

Eine 664-jährige Reihe von Weinlesedaten

Das Datum des Weinlesebeginns ist in Buchhaltungen grosser Weingüter schon im Mittelalter systematisch aufgezeichnet worden. Die Verwalter des Stifts von Beaune, der Weinmetropole des Burgunds, zahlten ihre Tagelöhner beispielsweise jeden Abend aus und hielten fest, welche Arbeit diese in den Rebbergen verrichtet hatten. Daraus lässt sich der jeweilige Beginn der Weinlese herleiten (Abb. 23). Später wechselte die Buchungspraxis, doch wissen wir, wann die Domherren mit den aufwändigen Vorbereitungen für die Weinlese begannen. Schliesslich legten die Gemeindebehörden den offiziellen Zeitpunkt der Weinlese nach Absprache mit den Winzern fest. Ein Wächter mit einer Flinte sorgte für die Einhaltung des sogenannten Weinlesebanns. Niemand, auch nicht die Winzer, durfte zu Lasten der Abgaben für die Kirche und die Besitzer grosser Rebgrüter vor der Aufhebung des Banns mit der Lese beginnen.⁴⁰ Aus der Verknüpfung dieser Angaben lassen sich jahrhundertlange Zeitreihen von Weinlesedaten gewinnen, die auf die Schwankungen der Sommertemperaturen verweisen.

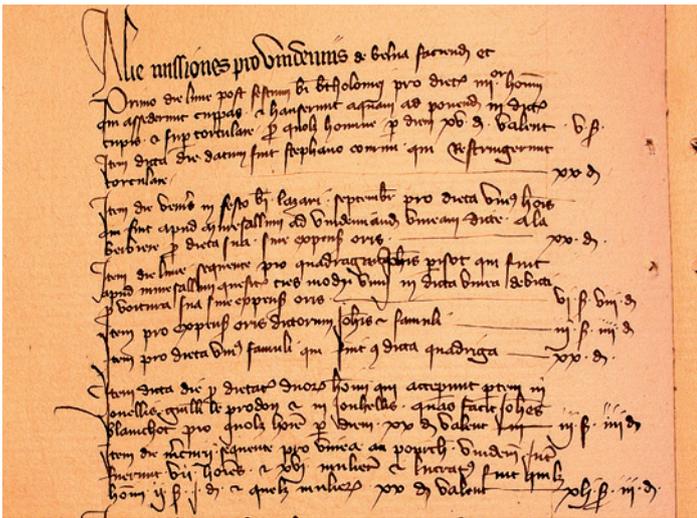


Abb. 22: Tagesscharfe Daten des Lesebeginns im Jahre 1506 lieferte die Buchhaltung des Domkapitels in Beaune anhand der Lohnzahlung an Traubenpflücker.

Abgesehen von der Kenntnis der alten Schriften bedarf es jedoch einer Fülle von Detailkenntnissen, um hieb- und stichfeste Daten zu gewinnen. Dies erfuhr ein Autorenkollektiv, das 2004 in der prestigeträchtigen Zeitschrift «Nature» verkündete, der Sommer 2003 sei mit Abstand der heissteste seit dem Mittelalter gewesen. Die Forscher stützten sich auf eine im 19. Jahrhundert publizierte, lange Reihe von Weinlesedaten aus Dijon, die sie mit Angaben aus anderen Teilen Burgunds ergänzten⁴¹. Zwei Historiker, Thomas Labbé und Fabien Gaveau, wiesen anhand von akribischen Recherchen in den Archiven nach, dass die «Dijon-Reihe» mit 132 Druck- und Kopierfehlern gespickt war. In sieben Jahren überstiegen die Diskrepanzen zu den tatsächlichen Daten 20 Tage, im Jahrtausendssommer 1540 sogar 30 Tage. Dazu hatten die Forscher die Reihe durch Daten aus dem südlichen Burgund ergänzt, allerdings ohne die nötigen Korrekturen vorzunehmen⁴². Labbé stellte stattdessen eine neue Reihe für Beaune zusammen, die von 1354 bis 2018 reichte. Beim Vergleich mit der langen Temperaturreihe von Paris zeigte sich, dass die Stiftsverwalter von Beaune ihre Trauben von den 1720er-Jahren an sieben Tage länger hängen liessen, um die Qualität zu verbessern und der Konkurrenz durch billige Massenweine zu begegnen.

Die lange, homogenisierte Beaune-Reihe stimmt mit den Temperaturen zwischen April und August gut überein (Abb. 23)⁴⁰. Sie gliedert sich in zwei Teile. Von 1354 bis 1987 wurden die Trauben am 28. September gelesen, in den letzten 31 Jahren dagegen 13 Tage früher. Unverkennbar äussert sich darin der Temperatursprung in den späten 1980er-Jahren und die seitherige Beschleunigung des anthropogenen Klimawandels: Unter den 33 frühesten Ernten der letzten 664 Jahre entfallen acht auf die Zeit seit 1988, fünf auf die Zeit seit 2011. Die wärmsten und trockensten Vegetationsperioden

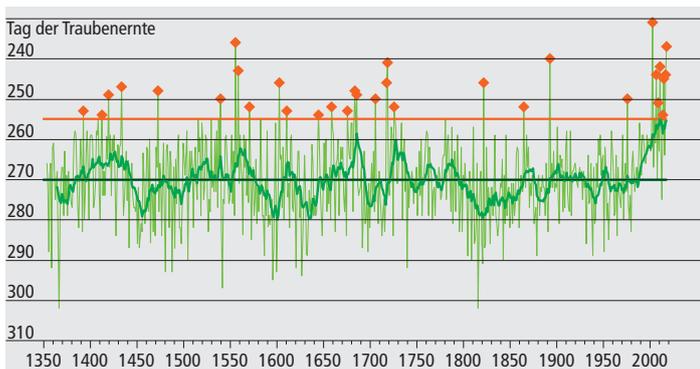


Abb. 23: Seit 1988 wird der Wein in Burgund 13 Tage früher gelesen als in den vorangehenden sechs Jahrhunderten.⁴⁰

der Vergangenheit sind in der Gegenwart zur Norm geworden. Die Megadürren der Jahre 1473 und 1540 vermitteln eine Vorstellung davon, wie die Extremwerte der Zukunft aussehen könnten^{43,44}. Bei der fortschreitenden globalen Erwärmung werden die Weinproduzenten neue, wärmeliebendere Sorten anbauen, in höhere Lagen ausweichen und die Stöcke in zunehmendem Masse bewässern müssen.



Abb. 24: Weintrauben in Franken.

Wo sind die Weinanbauregionen der Zukunft?

Klimasimulationen ermöglichen Szenarien, wie sich Weinbauregionen bis zur Jahrhundertmitte verschieben könnten. In den Modellierungen sind die Termine von Blüte und Fruchtreife wichtig zur Berechnung der räumlichen Veränderungen. Einige der bisherigen Weinbaugebiete wie die Regionen um Bordeaux und an der Rhone werden nicht mehr günstig für Weinanbau sein. Weniger betroffen sind höhere Lagen. Umgekehrt wird sich die Klimagunst für Weinbau nach Norden und Osten ausdehnen.

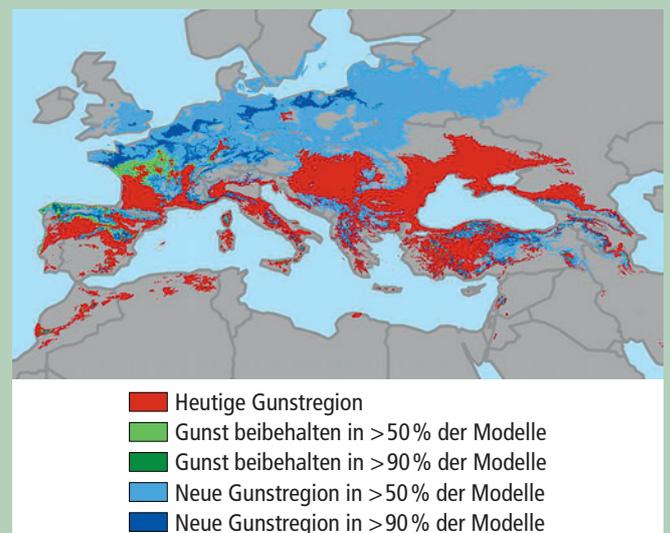


Abb. 25: Eignung für Weinbau im heutigen und zukünftigen Klima der Jahrhundertmitte (rot = in Zukunft nicht mehr günstig, grün = heute und in der Zukunft günstig, blau = potenzielle neue Weinbaugebiete).¹²

Kurze Winter, lange Sommer in Temperaturmessungen

Meteorologisch definierte Jahreszeiten zeigen, wie in den letzten 50 Jahren in der Schweiz die Wachstumsperiode länger und die Winter kürzer geworden sind. Dieser Trend wird sich in den nächsten 50 Jahren noch beschleunigen.

Stefan Brönnimann

Mit dem Klimawandel verschiebt sich der Frühlingsanfang, Pflanzen treiben früher aus und blühen früher. Veränderungen der Saisonalität finden sich auch in meteorologischen Ereignissen wie dem ersten Schneefall oder dem letzten Frost. Für die Schweiz liegen rekonstruierte Temperatur- und Niederschlagsdaten bis zum Jahr 1864 und Szenarien des zukünftigen Klimas bis Ende des 21. Jahrhunderts vor. Aus diesen täglichen Informationen lassen sich verschiedene Indikatoren berechnen und deren Veränderung beurteilen.

Meteorologisch definierte Wachstumsphasen

Aus meteorologischen Daten lassen sich Indikatoren des Pflanzenwachstums bestimmen. Ein oft verwendetes Mass dafür sind die Wärmegradtage (oder Englisch «growing degree days»). Dabei werden die Temperaturüberschüsse der Tagesmitteltemperaturen oberhalb einer gewissen Schwelle von beispielsweise 4°C ab Jahresbeginn aufsummiert. In die Berechnungen gehen nur positive Abweichungen von diesem Schwellenwert ein. Als Indikator für Verschiebungen im Jahresgang können wir beispielsweise betrachten, an welchem Tag eine Schwelle von 100 oder

von 1000 Wärmegradtagen erreicht wird. Ersteres entspricht ungefähr dem Blühdatum, letzteres dem Reifestadium vieler Pflanzen. Diese Daten, berechnet für jedes Jahr, wurden hier über die folgenden vier Perioden gemittelt: 1869–1878, 1969–1978, 2010–2019 und 2069–2078. Oder anders gesagt: Wir betrachten die Situation von vor 150 Jahren, vor 50 Jahren, heute und in 50 Jahren (vgl. Kasten «Tägliche gegitterte Daten für die Schweiz» und «Klimaszenarien für die Schweiz»).

Die Ergebnisse (Abb. 26) zeigen, dass die Schwelle von 100 Wärmegradtagen (oberste Reihe) in der Vergangenheit im Mittelland Ende April und in höheren Lagen im Mai oder Juni erreicht wurde. Zwischen den Perioden vor 150 Jahren und vor 50 Jahren zeigt sich kaum ein Unterschied. Seither hat sich dieser Zeitpunkt aber klar nach vorne verschoben und liegt heute Ende März bis Anfang April. In 50 Jahren wird dieser Zeitpunkt im ganzen Mittelland vor Ende März erreicht sein. Ähnliche Resultate zeigen sich für die Schwelle von 1000 Tagen (zweite Reihe), welche früher Ende Juli erreicht wurde, heute Anfang Juli und in 50 Jahren im gesamten Mittelland bereits im Juni. Gleichzeitig steigt die Obergrenze der Höhe an, bis zu der 1000 Wärmegradtage überhaupt erreicht werden.

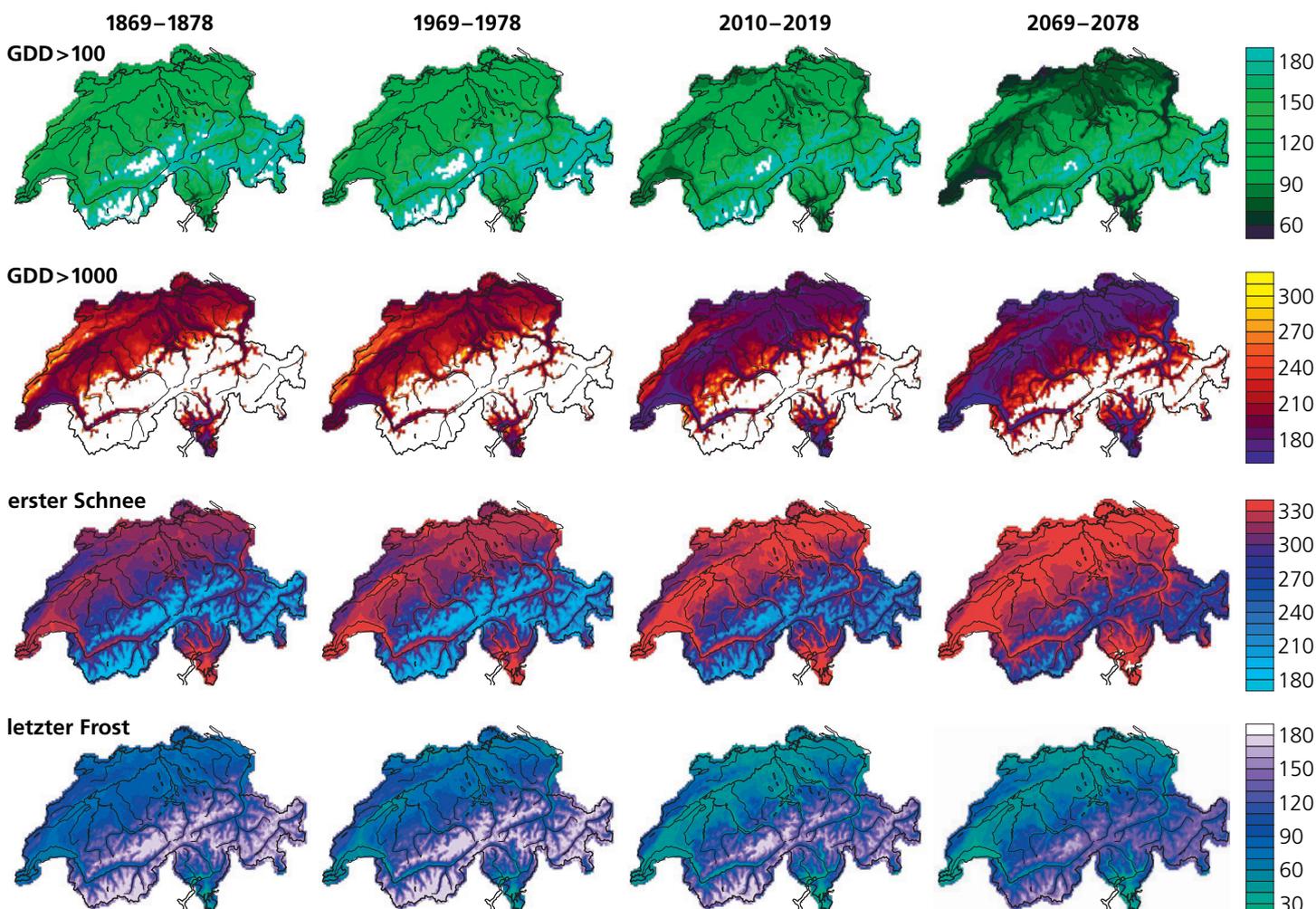


Abb. 26: Verschiebung meteorologisch definierter Jahreszeiten: Tag im Jahr des Erreichens von 100 (oben) respektive 1000 (zweite Reihe) Wärmegradtage (aufsummierte Temperaturüberschüsse über 4°C) sowie Mittel der ersten drei Schneetage (zweitunterste Reihe) und der letzten drei Frosttage (unten) für die Zeitspannen 1869–1878, 1969–1978, 2010–2019 und 2069–2078. Für die letzte Periode ist der Mittelwert aus allen Modellkombinationen aus EUROCORDEX-11 für das RCP45-Szenario gezeigt.^{46,47}

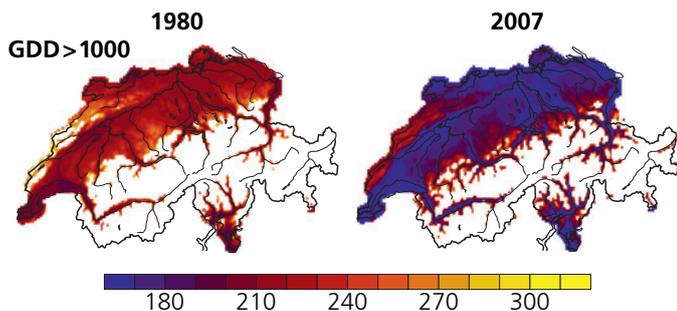


Abb. 27: Tag im Jahr des Erreichens von 1000 Wärmegradtagen (aufsummierte Temperaturüberschüsse über 4°C) für die Jahre 1980 und 2007.

Einzelne Jahre erreichen die Schwelle zu sehr unterschiedlicher Zeit. In Abbildung 27 sind als Beispiele die Sommer 1980 und 2007 gezeigt. Im Sommer 1980 wurde die Schwelle von 1000 Wärmegradtagen im Mittelland erst Ende Juli erreicht, wie es einem typischen Jahr im 19. Jahrhundert entsprochen hätte. Dagegen wurde die Schwelle 2007 bereits Mitte Juni erreicht, wie das gegen Ende dieses Jahrhunderts in einem normalen Jahr zu erwarten sein wird.

Kürzere Winter – oder gar keine Winter mehr

Für die jahreszeitliche Verschiebung des Winters sind in Abb. 26 zwei Indikatoren dargestellt: das Datum des ersten Schnees (zweitunterste Reihe) und dasjenige des letzten Frosts (unterste Reihe). Da aus den gegitterten Temperatur- und Niederschlagsdaten nicht hervorgeht, ob der Niederschlag als Schnee oder als Regen gefallen war, wurde hier angenommen, dass Schnee dann fällt, wenn der Niederschlag mindestens 0,1 mm beträgt und die Tagesmitteltemperatur unter 2°C liegt.⁴⁹ Frost bezeichnet hier Tagesmitteltemperaturen unter 0°C. Da die Schwankungen in diesen beiden Indikatoren sehr gross sind, wurde zusätzlich über die ersten drei Schneetage respektive die letzten drei Frosttage gemittelt und das mittlere Datum davon betrachtet.

Bei Schnee und Frost zeigen sich, im Gegensatz zu den Wachstumsindizes, Änderungen zwischen der Periode vor 150 Jahren und derjenigen vor 50 Jahren. Aber auch bei diesen Indikatoren beschleunigte sich die Veränderung vor allem in den letzten 50 Jahren und sie wird sich in der Zukunft sogar noch weiter beschleunigen.

Wird es Ende Jahrhundert überhaupt noch einen Winter geben? Im Mittelland wird in 50 Jahren vor Jahresende oft gar kein Schnee mehr fallen, und Frost ist bereits im Februar vorbei. Von einem Winter kann man dann kaum mehr sprechen und die Indikatoren sind kaum mehr aussagekräftig. In höheren Lagen geht die Veränderung aber selbst dann ungebremst weiter.



Abb. 28: Je nach Wärmegradtagen lassen blühende Rapsfelder ganze Landstriche bereits im Mai oder erst im Juni gelb leuchten.

Tägliche gegitterte Daten für die Schweiz

Tägliche gegitterte Daten für Temperatur (TabsD) und Niederschlag (RHiresD) auf einem 2x2-Kilometer-Gitter reichen zurück bis 1961⁴⁶. Sie beruhen auf interpolierten Stationsdaten. Um diese Gitterdaten weiter zurück auszudehnen, wurde eine Analogmethode gewählt⁴⁷. Für jeden Tag in der Vergangenheit wurde aus allen Tagen der Zeit seit 1961 der jeweils ähnlichste Tag gewählt. Dies geschah anhand des Vergleichs von historischen Stationsdaten und heutigen Temperatur-, Druck- und Niederschlagsmessungen. Die gegitterten Felder dieses «Analogtages» wurden danach aufgrund der historischen Messungen weiter korrigiert. Das Resultat sind tägliche Wetterrekonstruktionen für die Schweiz bis 1864.

Klimaszenarien für die Schweiz

Im Herbst 2018 wurden die neuen Schweizer Klimaszenarien **CH2018** vorgestellt.⁴⁸ Sie beruhen auf einer Modellkette: Globale Modellsimulationen dienten als Randbedingungen, mit welchen regionale Klimamodelle die Veränderungen über Europa simulierten. Der letzte Schritt – das Herunterskalieren auf ein 2x2-Kilometer-Gitter für die Schweiz, erfolgte dann mit statistischen Methoden. Zum Vergleich wurden zahlreiche Kombinationen von globalen und regionalen Modellen verwendet.⁴⁸ Im Beispiel in Abbildung 26 wurde der Mittelwert aus allen Modellkombinationen des Setups **EUR11** von **EUROCORDEX** ausgewählt. Dies entspricht einer Auflösung des regionalen Modells von ca. 12,5 km. Das gewählte Klimaszenario ist **RCP45**, ein mittleres Szenario. Da es sich hier um Simulationsdaten handelt, muss beachtet werden, dass systematische Abweichungen vorkommen können, wie im Bericht **CH2018** diskutiert. In diesem Bericht finden sich auch entsprechende Grafiken für weitere Indizes wie Tropennächte, Sommertage, Eistage, Frosttage, maximale jährliche Tagesniederschläge, Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage und andere.⁴⁸

Saisonalitätsänderungen und ihre Folgen für die Landwirtschaft

Steigende Temperaturen beschleunigen die phänologische Entwicklung von Kulturpflanzen. Dies führt dazu, dass diese früher austreiben oder blühen, was das Risiko von Frostschäden erhöht. Andererseits bietet die beschleunigte phänologische Entwicklung eine Möglichkeit, Hitze und extremer Trockenheit in den Sommermonaten auszuweichen. Kulturen und Sorten können sich bezüglich des «Timings» kritischer Phasen stark unterscheiden. Im Wettlauf um den Erhalt der Ertragsstabilität im Zuge des Klimawandels kommt einer angepassten Kultur- und Sortenwahl, die den Wachstumszyklus betreffen, eine entscheidende Bedeutung zu.

Annelie Holzkämper, Andreas Hund, Dario Fossati

Der Wachstumszyklus landwirtschaftlicher Kulturen weist Perioden mit unterschiedlicher Empfindlichkeit gegenüber der vorherrschenden Witterung auf. Als besonders «kritisch» gelten jene Abschnitte in der Entwicklung, in denen extreme Klimaereignisse eine besonders gravierende Auswirkung auf Pflanzenwachstum und Ertragsbildung haben. Die Schwellenwerte für klimatische Einflussfaktoren und die Länge der kritischen Phasen sind von Art zu Art sehr unterschiedlich.

Dauerkulturen wie Reben sind in der Überwinterungsperiode relativ unempfindlich gegenüber Frosteinflüssen. Tritt ein Frostereignis hingegen zum Zeitpunkt des Knospenaufbruchs oder danach auf, können die Pflanzen stark geschädigt werden^{50,51}. Dann drohen Ertragsausfälle, weil die Blütenanlage irreversibel geschädigt wird. Spätfrostereignisse in Verbindung mit Sommerhitze und Hagelschlag führten so im April 2017 zu erheblichen Ertragseinbrüchen im Reb- bau. In der Westschweiz konnten durch die extremen klimatischen Bedingungen im April nur 72 Prozent der Vorjahresmenge geerntet werden. In der Deutschschweiz waren es immerhin 81 Prozent, in der italienischen Schweiz 77 Prozent⁵².

Frostschäden und Hitzestress führen zu Wachstumsschäden und Ertragsminderung

Ackerkulturen wie Mais und Weizen sind mit Beginn des Streckenwachstums, des Schossens, ebenfalls sehr anfällig gegenüber Frost. Davor liegen der Vegetationspunkt und der Bereich, aus dem sich der Spross entwickelt, nahe am Boden. Damit können Ackerkulturen Frostschäden grösstenteils vermeiden. Es ist deshalb vorteilhaft, wenn das Streckenwachstum erst dann einsetzt, wenn das Frostrisiko gering ist. Weizen etwa beginnt zu schossen, wenn die Wahrscheinlichkeit von längeren Perioden mit Temperaturen unter -4°C , gering ist⁵³. Bei Mais kann ein Frostereignis ab dem Schossen im Extremfall die gesamte Kultur zerstören.

Die meisten Kulturpflanzen reagieren zur Zeit der Blütenbildung besonders empfindlich auf Stress. Darum liegt diese empfindliche Phase in der Regel in einem Zeitfenster, in dem das Risiko von Extremtemperaturen minimal ist (Abb. 29). Zum Beispiel wird eine empfindliche Phase bei Weizen mit der Reifeteilung (Meiose) eingeleitet. Die Reifeteilung beginnt in etwa, wenn sich das letzte Blatt entfaltet und noch lange bevor man die Ähre sieht. In dieser Zeit liegen die Temperaturen meist zwischen 0°C und 25°C (Abb. 29). Zur Zeit der Blüte und in der frühen Kornfüllungsphase kann sich das Auftreten von Klimaextremen stark auf die Ertragsbildung auswirken.^{54–58} Optimale Temperaturen während der Blüte liegen um die 21°C , maximal tolerierbare Temperaturen um 31°C ⁵⁷. Weizen blüht in der Regel, bevor das Risiko für Hitzestress zu gross wird. Dieser führt zu Ertragsreduktionen⁵⁹. Allein Temperaturen von 35°C während der Blühphase können das Korngewicht um 45 Prozent reduzieren⁶⁰. Während der Meiose kann Hitze im Extremfall sogar Pollensterilität verursachen. Dabei verkümmern die Staubbeutel und die Pflanze verliert die männliche Fruchtbarkeit⁶¹. Tritt extreme Hitze während der Kornfüllungsphase auf, führt dies zu geschrumpften Körnern und so zu geringerem Ertrag und verminderter Körnerqualität⁶².

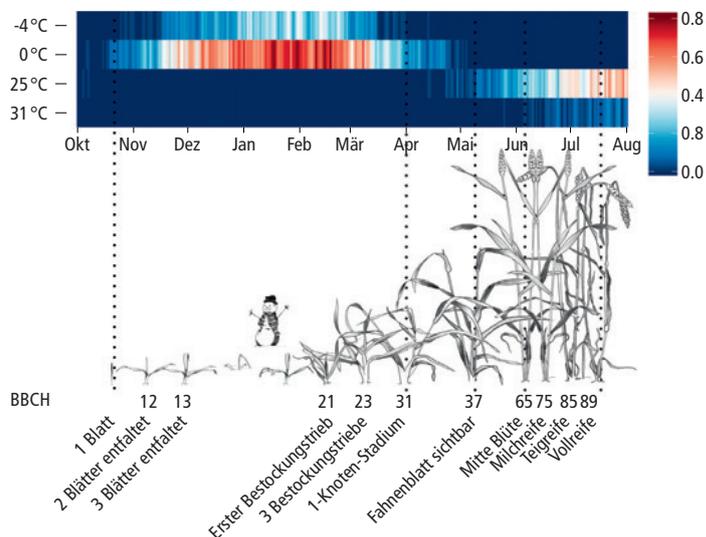


Abb. 29: Temperaturextreme im Zusammenspiel mit Weizenphänologie. Die Farbbalken (Skala rechts) geben den Anteil der Tage an, an denen der kritische Temperaturbereich (Extremtemperatur) für Weizen von $\leq -4^{\circ}\text{C}$, $\leq 0^{\circ}\text{C}$, $\geq 25^{\circ}\text{C}$, $\geq 31^{\circ}\text{C}$ während mindestens einer Stunde unter- oder überschritten wurden. Die Temperaturmessungen stammen vom Standort Zürich-Affoltern für die Jahre 1981 bis 2018 (MeteoSchweiz, Station REH). Jeder vertikale Balken repräsentiert einen Tag. Ein Wert von 1 (rot) bedeutet, dass der entsprechende Tag in allen Jahren im Messzeitraum an mindestens einem Stundenmittel die entsprechende Extremtemperatur aufwies.

Die Zeichnung illustriert die phänologischen Stadien von Winterweizen mit einem Saatdatum im Oktober nach der BBCH-Skala⁶³ vom ersten Blatt über den ersten sichtbaren Bestockungstrieb zur Blüte und verschiedenen Reifestadien. Die gepunkteten Linien signalisieren die ungefähre Lage der wichtigsten Abschnitte im Lebenszyklus für den Standort Eschikon im Schweizer Mittelland (Abbildung verändert)⁶⁴.

Beschleunigung, Verfrühung und veränderte Zuchtziele

Die phänologische Entwicklung aller Pflanzen ist zu einem grossen Teil durch die Temperatur gesteuert. Mit zunehmender Erderwärmung ist grundsätzlich mit einer Beschleunigung der phänologischen Entwicklung zu rechnen. Damit erreichen Pflanzenkulturen einzelne phänologische Stadien früher. Die gesamte Wachstumsperiode bis zur Reife wird insgesamt verkürzt. Durch die Verfrühung des Knospenaufbruchs bei Reben kann sich das Risiko von Spätfrostschäden im Zuge des Klimawandels erhöhen. Für viele Ackerkulturen bringt die Verkürzung der Kornfüllungsphase eine Ertragsreduktion mit sich. Ein positiver Nebeneffekt der Verfrühung kritischer Phasen kann dabei aber sein, dass Klimaextreme in der früheren Periode des Jahres weniger wahrscheinlich sind.

Ein sich änderndes Klima erfordert daher einerseits eine Anpassung der Phänologie der Pflanzen wie früheres Schossen und eine frühere Blüte. Andererseits brauchen Kulturen neue Stresstoleranzen etwa gegenüber Hitze. Dabei mag das Zuchtziel «Winterhärte» an Bedeutung

verlieren, das Risiko von Spätfrost bei beschleunigter Phänologie muss aber nach wie vor berücksichtigt werden. Im Folgenden werden wir auf die Strategien näher eingehen.

Möglichkeiten der Anpassung in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung

Aktuell angepflanzte Sorten sind in der Regel gut an die in einer Produktionsumwelt vorherrschenden klimatischen Bedingungen angepasst. Ihre phasenabhängigen Temperatur- und Feuchtebedürfnisse stehen im Einklang mit der saisonalen Temperaturentwicklung und der Niederschlagsverteilung am Anbaustandort, wie in Abb. 29 veranschaulicht. Dies wird auch deutlich, wenn man die Verbreitung der Weizentypen in Europa betrachtet^{65–67}. Die Winterhärte der Brotweizentypen im Winteranbau nimmt von Südwesten nach Nordosten zu: Die angebauten Typen sind entsprechend Sommerweizen (Spanien), Wechselweizen⁶⁸ (Nordspanien, Südwestfrankreich) und Winterweizen (Schweiz, Nordfrankreich und Deutschland). Noch weiter im Norden lässt sich Weizen nicht mehr überwintern. Deshalb werden in nördlichen Teilen Finnlands und Russlands Sommerweizensorten mit kurzer Vegetationszeit im Frühjahr gesät.

Mit den sich ändernden Klimabedingungen werden sich die Grenzen dieser Anbauggebiete verschieben. In der Schweiz wird dadurch Wechselweizen interessant. Mit den Veränderungen kann es aber auch zu ungünstigen Verschiebungen sensibler Phasen kommen, sodass für Sorten, die bislang eine gute Standortanpassung aufwiesen, mit verringerten Ertragspotenzialen oder erhöhter Ertragsvariabilität zu rechnen ist. Zwar haben Pflanzen die Möglichkeit, sich in gewissem Mass an sich ändernde klimatische Bedingungen anzupassen, indem sie sich an Kältestress und Hitzestress akklimatisieren. Darüber hinaus werden aber Anpassungen in der Sortenwahl nötig, um negativen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Agrarproduktivität entgegenwirken zu können.

Eine sinnvolle Anpassungsstrategie kann die Wahl einer späteren Sorte sein, um eine verlängerte Vegetationsperiode besser zu nutzen. Diese Sorten können über einen längeren Zeitraum mehr Strahlung absorbieren und haben daher ein höheres Ertragspotenzial^{69,70}. Allerdings kann bei vielen dieser Kulturen die Blüte häufiger während Trockenheits- und Hitzeextremen auftreten. Mit eher früheren Sorten können Landwirte den Stresseinflüssen häufiger auftretender Klimaextreme ausweichen⁷¹. Solche Entwicklungen sind im Gang, wie Beobachtungen an Weizen in Deutschland belegen⁷². Auch Auswertungen von Sortenversuchsdaten für Weizen aus der Schweiz bestätigen diese Trends.

Landwirte verschieben Saattermine

Im Zusammenhang mit der Wahl unterschiedlicher spät- bzw. frühreiferer Sorten zur Anpassung des Wachstumszyklus an sich ändernde Klimabedingungen spielen auch Verschiebungen von Saatterminen eine Rolle. Für Sommerkulturen bietet sich durch die verlängerte Vegetationsperiode unter wärmeren Bedingungen die Möglichkeit einer früheren Aussaat an. Bei Winterkulturen ist eine spätere Aussaat sinnvoll, um ein zu schnelles Aufwachsen vor Wintereinbruch zu verhindern.

Über solche Anpassungen der Wachstumszyklen hinaus können Sortenanpassungen in Bezug auf Toleranzen gegenüber abiotischem Stress sinnvoll sein. Laut einer Analyse von Langzeitversuchsdaten variiert die Hitzetoleranz europäischer Weizensorten markant je nach An-

bauregion: Sorten aus südlichen Regionen Europas zeigen eine höhere Hitzetoleranz auf⁷³. Anpassungen an steigende Temperaturen können zumindest teilweise auf Basis der existierenden genetischen Variabilität erfolgen. Zukünftige Züchtungen müssen eine grössere Toleranz gegenüber abiotischen Stressfaktoren aufweisen.

Fazit

Landwirtschaftliche Kulturen unterscheiden sich in Bezug auf ihre Wachstumszyklen und phasenspezifischen Sensitivitäten gegenüber Klimaeinflüssen und -extremen. Das Risiko von Ertragsausfällen durch Klimaextreme hängt somit stark von der Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens eines Klimaextrems mit den kritischen phänologischen Phasen der Kulturen ab. Wenn steigende Temperaturen zu einer starken Verfrühung sensibler Phasen führen, erhöht sich das Schadenrisiko durch extreme Klimaereignisse wie Spätfrost. Eine Verfrühung phänologischer Phasen mit steigenden Temperaturen mindert gleichzeitig das Risiko schädigender Einflüsse von Extremen wie Hitze oder Trockenheit. Hier zeigen sich Möglichkeiten, wie sich die Landwirtschaft an die Klimaveränderungen anpassen kann. Die Wahl einer früheren Sorte kann sich durchaus vorteilhaft auf die Ertragsstabilität auswirken.



Abb. 30: Frostschutzberegnung 2016 in Südtirol.



Abb. 31: Spätfrostbekämpfung mit Frostkerzen im deutschen Weinbaugebiet Nahe.

Spätfröste und Klimawandel – Steigt oder sinkt das Schadenrisiko?

Klimawandel führt zu höheren Temperaturen – also auch seltener zu Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Dafür spriessen Pflanzen bereits früher im Jahr und erreichen früher ihre Blüte. Was bedeutet das für das Frostrisiko landwirtschaftlicher Kulturen?

Stefan Brönnimann, Annelie Holzkämper, Michael Meier

Spätfrost verursacht immer wieder grosse Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen. Jüngste Beispiele sind das Ereignis im April 2017⁷⁴, welchem ein grosser Teil der Aprikosenernte zum Opfer fiel, oder der Frost im Mai 2019, als die Bodentemperatur in Bern-Zollikofen auf $-7,7^{\circ}\text{C}$ sank. Gibt es einen Trend zu mehr Spätfrost? Angesichts der schnellen Klimaerwärmung scheint das erst einmal nicht intuitiv, denn mit der Erwärmung wird auch der letzte Frost früher im Jahr stattfinden (vgl. S. 14). Allerdings verschiebt sich auch der Frühlingsanfang in der Pflanzenentwicklung weiter vor (vgl. S. 4).

Spätfrostereignisse, definiert als Auftreten von Frost nach dem Frühlingsanfang, könnten daher durchaus häufiger auftreten. Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle, deren Zusammenspiel letztlich bestimmt, ob Spätfroste häufiger auftreten oder nicht.

Temperatureffekt: Mehr Spätfrost erwartet

Betrachten wir zunächst nur meteorologische Faktoren. In der Folge machen wir die einfache Annahme, dass der Frühling dann beginnt, wenn die geglättete Temperaturkurve einen bestimmten Wert, beispielsweise 4°C , überschreitet. Frostereignisse sind Unterschreitungen der Null-Grad-Marke. Abbildung 32 zeigt diese Situation in blau für Winter und Frühling in einem Jahr im bisherigen Klima. In diesem Fall wäre der Frühlingsbeginn (also da, wo die geglättete Temperaturkurve die schwarze Linie schneidet) Anfang Mai. Unmittelbar danach folgt ein Frostereignis, es handelt sich also um einen Spätfrost. Wenn wir jetzt die gesamte Temperaturkurve um einige Grade nach oben schieben und so das zukünftige Klima illustrieren, verschiebt sich der Frühlingsanfang (Schnittpunkt mit der schwarzen Linie) auf Anfang März. Im März und Anfang April wären dann aber insgesamt drei Spätfrostereignisse zu verzeichnen. Die Wahrscheinlichkeit von Spätfrost würde also bei exakt gleichem Temperaturverlauf zunehmen, obwohl Frostereignisse insgesamt seltener würden.

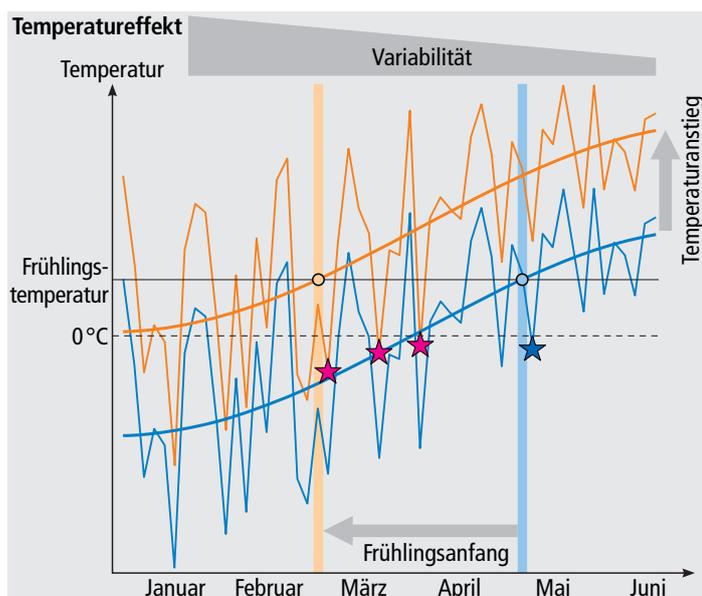


Abb. 32: Schematische Darstellung der Verschiebung von Frühlingsanfang und Spätfrost. Blau: heutiges Klima. Orange: zukünftiges Klima. Der Frühling beginnt, wenn die geglättete Temperaturkurve die Frühlings-temperatur (schwarze Linie) überschreitet. Sterne markieren Spätfrostereignisse.

Grund für diese Zunahme ist, dass die Tag-zu-Tag-Schwankungen der Temperatur im Winter grösser sind als im Sommer. Verschiebt sich also der Frühlingspunkt von einer Zeit mit kleiner Variabilität in eine Zeit mit grosser Variabilität, wird die Schwankung um den Mittelwert herum zunehmen. Bei gleichem Mittelwert (so wurde im obigen Beispiel der Frühlingsanfang definiert) wird damit auch die Häufigkeit der Unterschreitung von 0°C zunehmen. Tatsächlich zeigen Klimamodellsimulationen für die Schweiz diesen Effekt: Während sich der Frühlingsanfang je nach Szenario bis zum Jahrhundertende um drei bis sechs Wochen vorverschiebt, nimmt die Frosthäufigkeit vor allem gegen Ende des Jahrhunderts zu.

Mehr Frostschäden nach der «Enthärtung»

Diese rein temperaturbezogene Definition des Frühlingsanfangs stimmt aber nicht unbedingt mit dem phänologischen Frühling überein. Pflanzen sind je nach Art unterschiedlich anfällig gegenüber Spätfrostschäden. Verschiedene Faktoren spielen dabei eine wichtige Rolle. Pflanzen weisen unterschiedliche Frostresistenzen auf, um Temperaturen unter dem Gefrierpunkt schadlos zu überstehen. Die Anfälligkeit gegenüber Spätfrosteinflüssen variiert auch im Verlauf der phänologischen Entwicklung. Je weiter eine Pflanze im Frühling bereits entwickelt ist, umso grösser ist der Schaden, den ein Frostereignis hinterlässt. Dauerkulturen wie Obstbäume und Reben durchlaufen zu Beginn der Winterperiode, ausgelöst durch niedrige Temperaturen und kurze Tageslängen, den Prozess der Frosthärtung. Die so gehärteten Pflanzen können während der Winterperiode Temperaturen von bis zu -20°C überdauern.⁷⁵ Nach der «Enthärtung» im Frühling und insbesondere nach Knospenaufbruch ist die Resistenz der Pflanzen gegenüber Frostschäden sehr gering und auftretende Frostschäden an den Knospen können sich gravierend auf den späteren Ertrag auswirken.

Der Knospenaufbruch wie auch das Auftreten weiterer phänologischer Stadien wird zu einem wesentlichen Teil durch die Temperatur bestimmt. Je wärmer es ist, desto früher beobachtet man, dass Pflanzen knospen, blühen oder dass ihre Früchte reifen. Allerdings können auch verschiedene andere Faktoren wie Kältereize oder Pflanzenwasserversorgung dazu beitragen, die phänologische Entwicklung zu beschleunigen oder zu verzögern. Für viele Pflanzenarten ist auch die Tageslänge ein wichtiger Faktor, der der Verfrühung des Knospenaufbruchs mit steigenden Temperaturen Grenzen setzt. Je nach Sorte kann sich die Tageslängenabhängigkeit innerhalb einer Art stark unterscheiden.

Ob das Risiko von Spätfrostschäden in der Landwirtschaft im Zuge des Klimawandels zu- oder abnimmt, ist davon abhängig, inwieweit sich frostsensitive Stadien der Phänologie (z.B. Knospenaufbruch bei Reben) bei steigenden Temperaturen verfrühen. Als Treiber phänologischer Entwicklung spielt dabei neben der Temperatur auch die Tageslänge eine entscheidende, regulierende Rolle. So zeigte eine Analyse phänologischer Daten aus ganz Europa eine Zunahme des Spätfrostrisikos für Baumarten, deren Phänologie sehr sensitiv auf die Temperaturzunahme reagierte – insbesondere in küstennahen Regionen.⁷⁶ Für Laubbäume in Illinois (USA) stellte Augspurger⁷⁷ eine signifikante Zunahme der jährlichen Wahrscheinlichkeit von Frostschäden fest: Im Vergleich mit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stieg die Wahrscheinlichkeit in der Periode von 1980 bis 2012 um das Siebenfache. Bestand in der früheren Periode das Frostrisiko noch für drei von hundert Frühlingen, ist seit den 80er-Jahren einer von fünf Frühlingen betroffen.

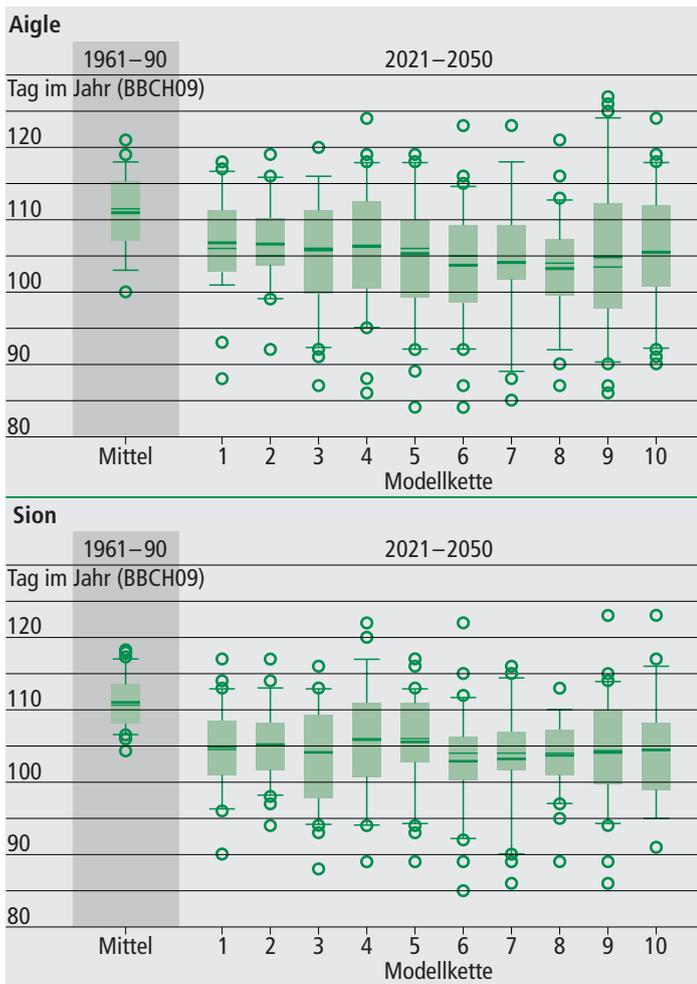


Abb. 33: Simulierter Tag des Austriebs der Rebe an den Standorten Aigle und Sion für die 30-jährige Referenzperiode 1961–1990 und die Szenarioperiode 2021–2050 für verschiedene Modellketten. Die Kästchen zeigen Mittelwert (dicke Linie), Median (dünne Linie), 25-/75-Perzentil, Linien mit Balken das 10-/90-Perzentil. Ausreisser sind als Kreise markiert⁷⁸.

Mehr Variabilität in der Zukunft

Je nach Klimaprojektionen, Phänologiemodellen, Pflanzenarten und untersuchten Regionen variieren die Einschätzungen zukünftiger Frostschadenrisiken stark. Für Chasselas-Reben im Schweizer Rhonetal kann das Frostschadenrisiko je nach Standort und Klimaprojektion bis 2050 zu- oder abnehmen⁷⁸ (Abb. 33). Im Durchschnitt verschiebt sich das Datum des Knospenaufbruchs bis zum Zeithorizont 2021–2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 um fünf bis zehn Tage nach vorne. Auffällig ist für die beiden Walliser Standorte in Sitten und Aigle, dass sich die Variabilität ab heute in fast allen Berechnungen mit unterschiedlichen Projektionen, Wachstumsmodellen und Rebensorten von Jahr zu Jahr erhöht. Nebst vermehrt frühen Jahren zeigen die Simulationen auch Jahre, die noch später sind als im zweiten Drittel des 20. Jahrhunderts.

Diese Einschätzung stimmt überein mit Ergebnissen aus Studien zum Spätfrostisiko für Obst- und Waldbaumarten. In tieferen Lagen der Schweiz blieb das Risiko über die letzten Dekaden unverändert, während es in höheren Lagen zugenommen hat.

Für Nordostdeutschland erwarten Hoffmann und Rath⁷⁹ eine Abnahme des Frostschadenrisikos für Äpfel. Pfeleider et al.⁸⁰ dagegen zeigen, dass das Frostschadenrisiko für Äpfel in Deutschland mit einer

2°C-Erwärmung um bis zu zehn Prozent zunehmen könnte – allerdings bei hoher räumlicher Heterogenität in den Trends und mit hoher Unsicherheit, resultierend aus den Klimaprojektionen.

Eisheilige

Bauernkalender nehmen oft Bezug auf das Landwirtschaftsjahr. Die «Eisheiligen» (heute vom 11.–15. Mai, im alten Kalender acht Tage später) stehen symbolisch für das Ende der Frostgefahr für die Landwirtschaft. Oft wurde argumentiert, dass um diese Zeit häufiger als sonst Kaltluftvorstösse erfolgen. In den Wetterdaten der Schweiz findet sich allerdings keine Zunahme von Frost um die Eisheiligen. Frost im Mai kann aber durchaus auftreten, wie beispielsweise im Mai 2019.

Spätfrost 1974

Im Rahmen des Berner Klimaprogramms (vgl. Kasten **BernClim**, S. 5) wurde die Schadensverteilung des Spätfrostereignisses 1974 im Detail untersucht und kartiert^{1,81}. Die Karte erlaubte eine geländeklimatische Interpretation, die zeigte, dass in verschiedenen Lagen unterschiedliche Prozesse (Kaltluftvorstoss, Abstrahlung) eine Rolle spielten. Auch der Kartenausschnitt zeigt, wie wichtig die lokalen topographischen Verhältnisse sind.

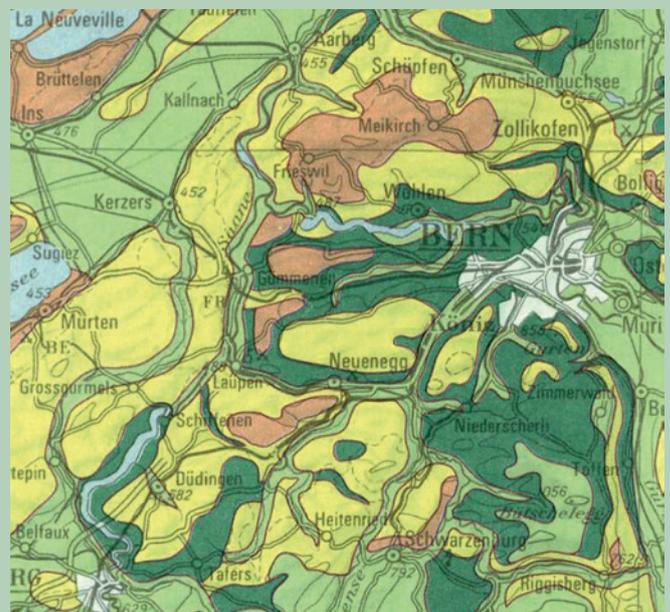


Abb. 34: Ausschnitt aus einer Karte der Verteilung von Spätfrostschäden 1974 anhand der Beobachtung von Nussbäumen.⁸¹ Orange: keine Schäden. Gelb: schwach geschädigt. Dunkelgrün: mittelmässig geschädigt. Hellgrün: stark geschädigt.

Saisonalität des Abflusses – ein charakteristisches Merkmal der Fließgewässer

Die Hydrologie der Schweiz ist stark geprägt von saisonalen Unterschieden in den Abflüssen. Sie führen zu regionaltypischen Ausprägungen und Abflussregimen, sowohl bei den mittleren monatlichen Abflüssen wie auch beim Niedrig- und Hochwasser.

Rolf Weingartner

Die saisonalen Schwankungen der mittleren monatlichen Abflüsse bezeichnen Hydrologinnen und Hydrologen als Abflussregime. Sie erlauben grundlegende Einblicke in das hydrologische Verhalten von unterschiedlichen Einzugsgebieten. Die nordalpinen Einzugsgebiete lassen sich aus der Sicht des Abflussregimes in die zwei Grundtypen «alpin» und «mittelländisch-jurassisch» gliedern. An den Beispielen des alpinen Einzugsgebiets der Kander im Berner Oberland und des jurassischen Einzugsgebiets der Ergolz im Kanton Basel-Land können wir zwei charakteristische Vertreter der beiden Grundtypen gut vergleichen. Dazu stellen wir den theoretischen, langjährigen mittleren Monatsabflüssen den tatsächlich beobachteten gegenüber (Abb. 35). Unter theoretischen

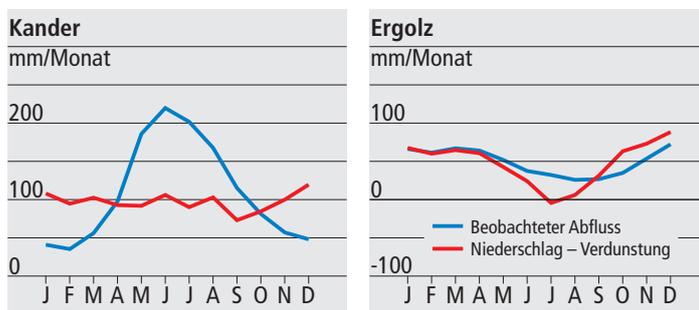


Abb. 35: Beobachteter und theoretischer (Niederschlag–Verdunstung) Abfluss der Kander und der Ergolz.

schem Abfluss versteht man die mögliche Wassermenge, wenn vom Niederschlag nur die Verdunstung subtrahiert wird (Niederschlag–Verdunstung). Alle weiteren abflussbildenden Prozesse wie Eis- und Schneeschmelze sowie Exfiltration aus dem Boden- und Grundwasser werden dabei nicht berücksichtigt.

Zwischenspeicher in Schnee und Eis

Im alpinen Einzugsgebiet der Kander mit einem Vergletscherungsgrad von rund fünf Prozent unterscheiden sich die beiden saisonalen

Regimetyp	a-glaciaire	b-glaciaire	a-glacio-nival
Regimekurve			
Rang	Jul./Aug./Jun./Sep.	Jul./Aug./Jun./Sep.	Jul./Jun./Aug./Mai
Räumliche Einordnung	$mH > 2400$ $Vgl. \geq 36$	$mH > 2100$ $22 \leq Vgl. < 36$	$mH > 2400$ $12 \leq Vgl. < 22$
Regimetyp	b-glacio-nival	nivo-glaciaire	nival
Regimekurve			
Rang	Jun./Jul./Aug./Mai	Jun./Jul./Mai/Aug.	Jun./Mai/Jul./Aug
Räumliche Einordnung	$1900 < mH < 2300$ $6 \leq Vgl. < 12$	$1550 < mH < 1900$ $3 \leq Vgl. < 6$	$1550 < mH < 1900$ $0 \leq Vgl. < 3$

Abb. 36: Alpine Abflussregimetypen. mH : mittlere Einzugsgebietshöhe [m ü.M.], $Vgl.$: Vergletscherungsgrad [%].⁸²

Ganglinien beträchtlich. Während die theoretische Ganglinie nur wenig schwankt, weisen die beobachteten Abflüsse einen ausgeprägten saisonalen Verlauf auf. Dafür ist die Speicherwirkung des Schnees und der Gletscher verantwortlich, also die Zwischenspeicherung des Schnees im Winter, die Schneeschmelze im Mai und Juni sowie die Gletscherschmelze von Juli bis September. Je nach Einfluss von Schnee und Gletscher lassen sich sechs alpine Abflussregimetypen unterscheiden (Abb. 36). Bei stark vergletscherten Einzugsgebieten treten die grössten mittleren Monatsabflüsse im Juli und August auf. Bei nahezu unvergletscherten, nivalen Gebieten liegt der grösste Monatsabfluss im Mai oder im Juni.

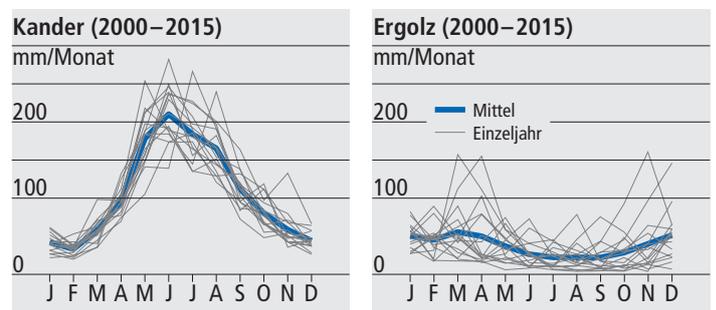


Abb. 37: Langjähriges mittleres Abflussregime im Vergleich mit den Abflussregimes einzelner Jahre.

Die Saisonalität alpiner Einzugsgebiete wird also durch den unterschiedlich starken Einfluss von Schnee und Gletscher geprägt. Diesen Einfluss können wir über die mittlere Gebietshöhe und den Vergletscherungsgrad abschätzen (Abb 36). Der dominante Einfluss von Schnee und Eis führt dazu, dass das langjährige mittlere saisonale Abflussmuster auch in den einzelnen Jahren reproduziert wird (Abb. 37). Diese zeitliche Stabilität des saisonalen Abflusses ist zusammen mit den grossen Abflussmengen und der hohen Reliefenergie dafür verantwortlich, dass sich die Alpen hervorragend zur Wasserkraftnutzung eignen und ihnen als «Wasserschloss» eine bedeutende Funktion im mitteleuropäischen Wasserhaushalt zukommt.

Grosse Unterschiede von Jahr zu Jahr

Ganz anders präsentiert sich die Saisonalität im Jura, wie das Beispiel des Einzugsgebiets der Ergolz zeigt. Die Abweichungen zwischen der theoretischen und der beobachteten saisonalen Ganglinie sind gering (Abb. 35). Die kleinen theoretischen Abflusshöhen im Sommer (Juni bis August) sind eine Folge der Verdunstung: Die mittlere Verdunstung im Sommer (315 mm) unterscheidet sich nur unwesentlich von der mittleren Niederschlagshöhe (340 mm)⁸³. Für den Abfluss steht also nur wenig Wasser zur Verfügung. Die beobachtete saisonale Ganglinie ist etwas ausgeglichener als die theoretische. Dies ist auf die dämpfende Wirkung des Grundwasserspeichers zurückzuführen, der sich im Herbst und im Winter füllt und im Frühling und Sommer entleert. Die einzeljährigen Abflussregimes weichen markant vom mittleren Verlauf ab, und zwar wegen des Niederschlags, dessen saisonaler Verlauf sich von Jahr zu Jahr ändert (Abb. 37). Insgesamt wird die Saisonalität mittelländisch-jurassischer Einzugsgebiete durch den zeitlich variablen Niederschlag und die zeitlich konstante Verdunstung im Sommerhalbjahr bestimmt.

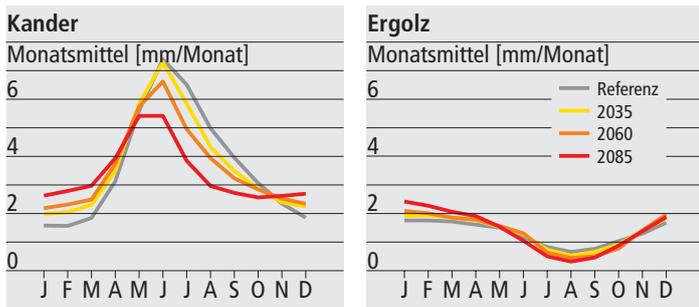


Abb. 38: Veränderung des saisonalen Abflussverhaltens bei einem Szenario ohne Klimaschutz; Median mehrerer Simulationen.⁸⁴

Mit dem Klimawandel verändert sich auch die Saisonalität des Abflusses. Die Erwärmung führt im Alpenraum zu einer Abnahme des Einflusses von Schnee und Gletscher bei gleichzeitiger Zunahme des flüssigen Niederschlags im Winter und einer Abnahme des Niederschlags im Sommer. In der Folge sinken die Abflusshöhen im Frühling und Sommer, steigen jedoch im Winter (Abb. 38). Die Jahresabflussmengen verändern sich dabei nur in geringem Masse. Während bei der alpinen Kander also eine saisonale Umverteilung des Abflusses stattfindet, wird bei der im Jura gelegenen Ergolz die bestehende Saisonalität durch den Klimawandel verstärkt: Die erwarteten Sommerniederschläge nehmen ab, die Winterniederschläge nehmen zu⁴⁸. Die Sommertrockenheit wird damit zunehmend zu einer Herausforderung (Abb. 38).

Niedrigwasser treten vermehrt früher im Jahr auf

Auch beim Niedrigwasser ist wiederum eine regional differenzierte Saisonalität erkennbar. Als Niedrigwasser bezeichnet man einen ungewöhnlich tiefen Abfluss. Zu seiner Charakterisierung dient die kleinste, über sieben Tage aufgetretene Abflussmenge innerhalb eines Kalenderjahres. Für die regionalen Unterschiede sind unterschiedliche Prozesse verantwortlich. Im Alpenraum entstehen Niedrigwasserperioden, wenn der Niederschlag in Form von Schnee zwischengespeichert wird. Somit ist der Winter die charakteristische Niedrigwassersaison. Im Mittelland und Jura entstehen Niedrigwasserperioden als Folge des Ausbleibens von Niederschlägen oft in Verbindung mit hoher Verdunstung. Solche Situationen treten gehäuft im (Spät-)Sommer und Herbst auf.

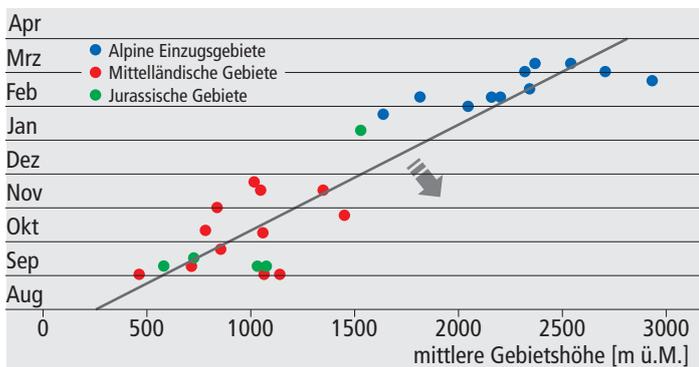


Abb. 39: Mittleres Auftreten (mD) des kleinsten jährlichen Abflusses über sieben Tage in Abhängigkeit der mittleren Gebietshöhe (mH). Pfeil: Veränderung des Zusammenhangs zwischen mD und mH durch die Klimaänderung.⁸⁵

Dank dieser Unterschiede zwischen Alpen und Mittelland/Jura können wir den mittleren Zeitpunkt des Auftretens des kleinsten jährlichen Abflusses über die mittlere Höhe eines Einzugsgebietes abschätzen (Abb. 39). In den einzelnen Jahren weicht das Datum der kleinsten

Abflüsse mehr oder weniger stark vom mittleren Datum ab. In alpinen Gebieten sind diese Abweichungen klein. Um das mittlere Datum variieren die Unterschiede 10 bis 15 Tage. Einmal mehr manifestiert sich hier die stabilisierende Wirkung, die von Schnee und von der Dauer der Schneebedeckung ausgeht⁸⁶. Im Mittelland bestimmt das Niederschlagsgeschehen das Auftreten kleinster Abflüsse. Mit 50 bis 100 Tagen sind die Unterschiede zum mittleren Datum entsprechend grösser als im Alpenraum.

Mit dem Klimawandel verändert sich der mittlere Zeitpunkt des Auftretens kleinster Abflüsse. Vereinfacht kann man sich das als Parallelverschiebung der Geraden in Abb. 39 in Pfeilrichtung vorstellen: Das mittlere Auftretensdatum «verfrüht sich» gegenüber heute. Dies ist auf den abnehmenden Einfluss der Schneedecke und den zunehmenden Einfluss der Sommertrockenheit zurückzuführen.

Hochwasser: Verlängerte Saison, keine Verschiebung

Damit grosse Hochwasser mit hohen Spitzen und/oder grossen Mengen zustande kommen, müssen im Wesentlichen zwei Bedingungen erfüllt sein: eine möglichst hohe Lage der Nullgradgrenze und ergiebige und/oder intensive Niederschläge. Die Nullgradgrenze ist vor allem bei alpinen Einzugsgebieten relevant: Je höher sie liegt, umso grösser ist der Flächenanteil eines Einzugsgebietes, der überregnet wird und der damit direkt zum Abfluss beiträgt. Diese beiden Bedingungen sind in der Schweiz vor allem zwischen Mai und September erfüllt. Deshalb erstaunt es nicht, dass die Mehrheit der grössten Hochwasser in diesem Zeitraum auftritt (Abb. 40). Mit der Klimaerwärmung wird sich die Hochwassersaison zwar etwas ausdehnen, aber an der Saisonalität wird sich nichts Grundlegendes ändern. Allerdings dürfte sich die Intensität der Hochwasser verschärfen, weil mit der Erwärmung der Wassergehalt der Luft und dadurch Starkregen zunehmen werden (Gesetz von Clausius-Clapeyron) und gleichzeitig die Nullgradgrenze weiter ansteigen wird.

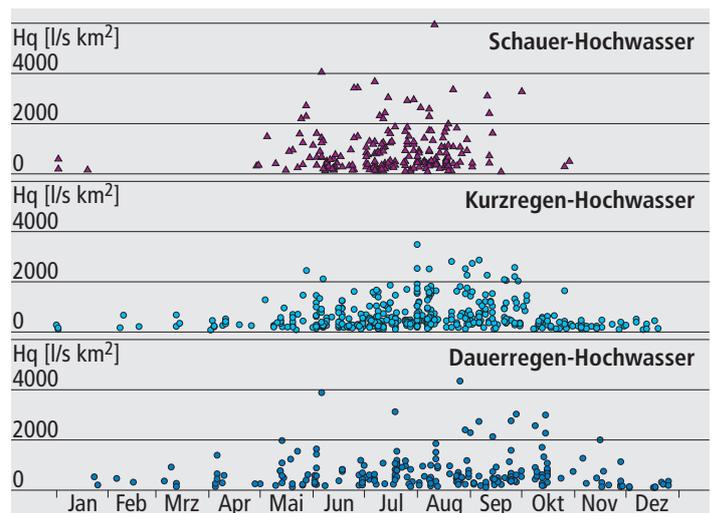


Abb. 40: Zeitliches Auftreten und Spitzenabflussspende des grössten jährlichen Hochwassers (Hq) in schweizerischen Einzugsgebieten, gegliedert nach dem Hochwassertyp.⁸⁷

Beobachtete und zukünftige Veränderungen der Schneebedeckung

In der Schweiz zeigen die letzten Jahrzehnte eine schwache Tendenz zu späterem Einschneien und einen relativ klaren Trend zu früherem Ausapern. Dies hat Folgen für Mensch und Natur und ist ein Vorbote der starken Abnahme von Schneetagen.

Moritz Buchmann

Schnee ist mehr als weisse Weihnachten und Sportferien. Schnee, oder genauer gesagt die Dauer der Schneebedeckung, hat weitreichende Konsequenzen für Mensch und Natur. Durch ihre isolierende Eigenschaft schützt die Schneeschicht Bodenpflanzen vor Frostschäden⁸⁸. Eine geschlossene Schneedecke reflektiert das Sonnenlicht und verhindert so das Aufheizen des Bodens über die Schnee-Albedo-Rückkopplung⁸⁹. Im Frühling signalisiert das Abschmelzen der Schneedecke den Beginn des Pflanzenwachstums und die damit einhergehende Nahrungsverfügbarkeit für diverse Tiere⁹⁰. Schnee bietet aber auch Lebensräume und Brutplätze für verschiedene Alpentiere wie Schneehühner und Schneehasen^{91,92}. Als Teil des Wasserkreislaufs erfüllt Schnee eine wichtige Funktion der natürlichen Wasserspeicherung. In Form von Lawinen ist Schnee aber auch eine gängige Naturgefahr in den Bergen. Für den Wintertourismus ist Schnee – vor allem im Flachland – während Weihnachten und Neujahr eine wesentliche Voraussetzung für eine gelungene Saison⁹³.

Auf den ersten Blick erscheinen Einschneien und Ausapern als Zeitpunkte trivial, was sich jedoch bei näherer Betrachtung als Trugschluss erweist. Was genau bedeutet «Einschneien» und «Ausapern»? Beide Begriffe sind normalerweise nur für Alpenbewohner klar verständlich. Laut Duden bedeutet Einschneien «von Schnee ganz bedeckt werden» und Ausapern «schneefrei werden». In der Praxis wird häufig von einem Einschnei- und Ausaperungsdatum gesprochen, womit normalerweise der Beginn und das Ende einer durchgehenden Schneedecke gemeint sind. Eine entsprechende klare Definition gibt es aber erstaunlicherweise nicht. Jedoch ist aufgrund der verlangten durchgehenden Schneedecke klar, dass die Begriffe «Einschneien» und «Ausapern» in Höhenzonen ohne durchgehende Schneedecke (Mittelland) keinen Sinn machen. Die Erfahrung zeigt, dass eine Auswertung von Einschneien und Ausapern nur für Messstationen oberhalb 1000m ü.M. sinnvoll ist. Aber auch mit dieser Bedingung gibt es natürlich in schneearmen Wintern immer wieder die Situation, dass einige Tage mitten im Winter schneefrei sein können und somit mehrere schneebedeckte Perioden zu beobachten sind (siehe Abbildung 41). Um auch in solchen Wintern ein sinnvolles Einschnei- und Ausaperungsdatum bestimmen zu können, bezieht man sich am besten auf die längste Periode mit durchgehender Schneedecke.

Bedeutung

Dass Einschnei- und Ausaperungsdatum schon früh als wichtige Kennzahlen angesehen wurden, zeigt die Tatsache, dass bereits 1909 der

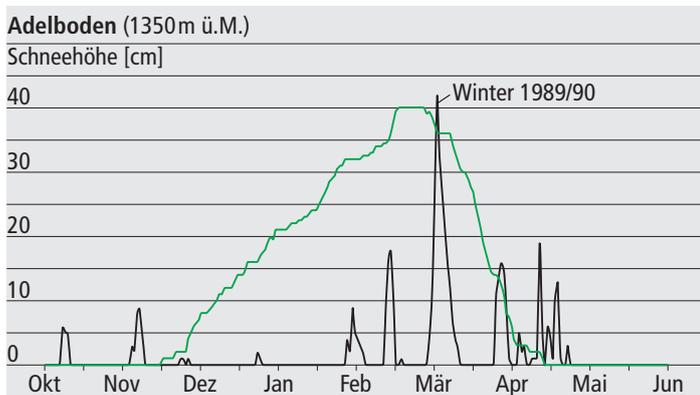


Abb. 41: Schneehöhenverlauf in Adelboden (1350m ü.M.) im Winter 1989/90 (schwarz) und Durchschnitt der letzten 50 Jahre (grün). Wann ist das Einschneien und Ausapern im Winter 1989/90?

damalige Direktor der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt in einer Publikation⁹⁴ einen kleinen Exkurs zum Einschneien und Ausapern im Oberengadin geschrieben hatte.

Veränderungen über die Zeit

Tabelle 1 gibt eine Übersicht von Einschnei- und Ausaperdaten, ausgewertet für drei bekannte Stationen in der Schweiz. Auffallend ist, dass sich die mittleren Einschneidaten kaum unterscheiden, während die mittleren Ausaperdaten um zwei Wochen variieren. Ausapern hängt im Gegensatz zum Einschneien von einer Summe von Ereignissen ab und variiert damit wesentlich mehr.

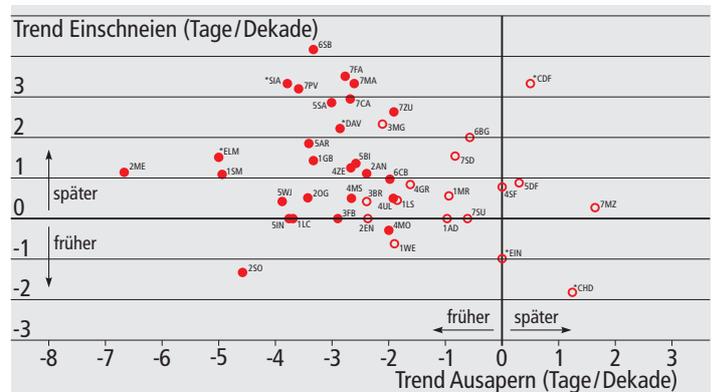


Abb. 42: Trend des Einschnei- und Ausaperungsdatums an 45 SLF- und MeteoSchweiz-Stationen für die 60 Jahre zwischen 1955 und 2014. Stationen mit statistisch signifikantem Trend für das Ausapern (10-Prozent-Niveau) sind mit ausgefüllten Kreisen dargestellt.

Bezüglich langjähriger Trends zeigen zwei Studien^{95,96} eine schwache Tendenz zu späterem Einschneien und einen relativ klaren Trend zu früherem Ausapern. Abbildung 42 zeigt eine Auswertung für 45 Stationen mit langjährigen Messungen zwischen 1955 und 2014 (60 Jahre). Stationen mit statistisch signifikanten Trends zeigen alle ein früheres Ausapern. Die grosse Mehrheit der Stationen zeigt auch ein späteres Einschneien. Der Trend ist aber weniger stark. Die Stationen zeigen dabei keine Höhenabhängigkeit in der Stärke der Veränderungen.

Szenarien für die Zukunft

Für die Alpen werden bis 2100 drastische Reduktionen der Anzahl Schneetage erwartet, was einen direkten Einfluss auf die Länge der schneebedeckten Periode hat und somit auch Einschnei- und Ausaperdatum entscheidend beeinflusst. Die prognostizierten Reduktionen betreffen alle Höhenstufen (Abb. 43), insbesondere jedoch Lagen unter 1500m ü.M., welche mit einem Rückgang der Schneetage von bis zu 80 Prozent bei Grenzwerten von 5 und 50cm rechnen müssen. In hohen Lagen über 2000m ü.M. ist die Abnahme mit 30 Prozent klar niedriger, aber immer noch drastisch^{48,97,98}.

Eine Zunahme der Frühlingstemperaturen begünstigt ein früheres Ausapern. Das Einschneien wird vorwiegend vom Winterniederschlag beeinflusst, dessen grosse Variabilität jedoch keine eindeutigen Ausagen zulässt. Daher ist das Signal für Ausapern im Frühling mit weniger Unsicherheiten behaftet als das Signal für Einschneien.

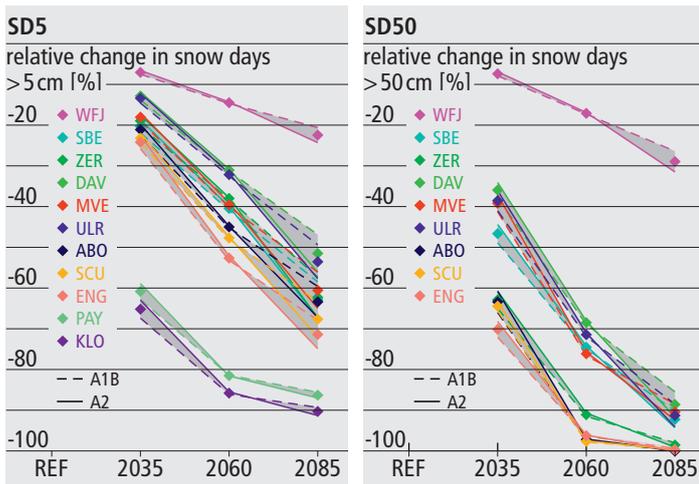


Abb. 43: Prognostizierte relative Veränderung der Anzahl Tage mit Schneebedeckung von 5 und 50cm für verschiedene Standorte und zwei verschiedene Szenarien: fest (2,8 Grad Erwärmung bis 2100) und gestrichelt (3,4 Grad). Die Stationen sind der Höhe nach geordnet (WFJ: höchste, KLO: tiefste).⁹⁷

Mögliche Erklärungen

Treibende Faktoren für die Veränderung sind die Temperaturzunahme und die saisonale Niederschlagsverteilung. Zu Beginn des Winters (November, Dezember) ist vor allem die Niederschlagsaktivität für das Einschneien entscheidend, da die Temperaturen im langjährigen Mittel genug kalt sind. Im Frühling hingegen ist es die Temperaturzunahme, welche die Ausaperung entscheidend beeinflusst.

Die Temperaturzunahme im Frühling kann klar aufgezeigt werden^{48,98,99}, jedoch ist im Niederschlag, der einer hohen Jahr-zu-Jahr-Variabilität unterworfen ist¹⁰⁰, kein klarer Trend ersichtlich. Dies spiegelt sich auch in den Veränderungen für Einschneien und Ausapern wieder, da das Ausapersignal deutlicher zu erkennen ist als das Einschneien. Ausserdem zeigen die Wintertemperaturen keine so starke Zunahme wie die Frühlingstemperaturen, was ein weiteres Indiz für den schwächeren Trend des Einschneiens gegenüber dem Ausapern ist.

Auswirkungen und Fazit

Die Auswirkungen sind in allen Bereichen zu spüren. Tiefergelegene Skigebiete werden Mühe bekunden, grosse Investitionen in ihre Anlagen zu tätigen, da immer häufiger der Schnee ausbleiben wird. Durch das frühere Ausapern verändern sich die Boden- und Wachstumsbedingungen für Flora und Fauna. So zieht es das Schneehuhn, angewiesen auf eine schneebedeckte Umgebung, immer mehr in höhere Lagen, was seinen Lebensraum zunehmend einschränkt⁹¹.

Der frühere Rückzug der Schneedecke in grossen Höhen führt zu einer Reduktion der hydrologischen Speicherkomponente und somit selbst bei moderaten Niederschlägen zu höheren Abflüssen und mehr Überflutungen.

Kürzere Winter sind eher durch eine vorzeitige Ausaperung als ein verspätetes Einschneien zu erklären. Das Einschneien findet seit 1955 im Mittel eine Woche später und die Ausaperung um zwei Wochen früher statt. Mit steigenden Winter- und Frühlingstemperaturen werden sich die Winter in Zukunft noch mehr verkürzen.

	Andermatt 1440 m ü.M.	Davos 1560 m ü.M.	Samedan 1710 m ü.M.
Mittleres Einschneien	16. November	20. November	19. November
Frühstes Einschneien	6. Oktober 1974	15. Oktober 1974	22. Oktober 1981
Spätestes Einschneien	3. Januar 2015	26. Dezember 2015	6. Februar 2002
Mittleres Ausapern	1. Mai	25. April	13. April
Frühstes Ausapern	31. März 2011	17. März 1991	21. März 2002
Spätestes Ausapern	3. Juni 1975	18. Mai 1970	9. Mai 1979
Winter 2019/20	8. Nov. 2019– 10. April 2020	12. Nov. 2019– 15. April 2020	4. Nov. 2019– 10. April 2020

Tab. 1: Mittleres (1981–2018), frühestes und spätestes Einschneien und Ausapern an drei Stationen zwischen 1400 und 1700m ü.M. sowie der aktuelle Winter als Vergleich.

Wenig Schnee im rekordwarmen Winter 2019/20

Universität Bern
Geographisches Institut
Klimaforschung

Messblatt für Winterbeobachtungen
Beobachtungsstellen: 3046
Winter 2019/20

SCHNEE

A: Horizontal: Schneehöhe in cm
B: N-Exposition: Schneebedeckung
C: S-Exposition: Schneebedeckung

* Schneebedeckung
o kein Schnee
- keine Beobachtung

Datum	Koordinaten	Wille	Exposition	Hangneigung	Bemerkungen
A. Engen	815 500 / 173 500	560 m	Ebene	keine	Kendernisse
B. Engen	815 760 / 173 400	575 m	Neid	10 Grad	
C. Engen	815 800 / 173 400	580 m	Stal	4 Grad	

	Oktober			November			Dezember			Januar			Februar			März			April		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Total der Schneebedeckungstage: A: 2 B: 2 C: 2
Datum: 01.05.2020
Der Beobachter: Peter Bangerter

Abb. 44: Fast leeres Schneebeobachtungsformular des BernClim-Netztes im Winter 2019/20.

Teilweise rekordwarme Temperaturen und mehrheitlich überdurchschnittliche Niederschlagsmengen machten den Winter 2019/20 unterhalb von 1000 Metern zum schneeärmsten Winter seit Messbeginn. Die Niederschläge fielen als Regen statt Schnee und blieben höchstens ein paar Stunden oder Tage liegen. An den Inner-schweizer Stationen Altdorf, Stans und Luzern wurde seit Beginn der Messungen im Jahr 1883 erstmals kein Neuschnee und damit auch kein einziger Tag mit einer Schneedecke registriert. Auch bis 1700 Meter waren die Schneehöhen die meiste Zeit und fast überall unterdurchschnittlich. Von Westen über den Osten bis ins Engadin, Tessin und Wallis zeichneten die SLF- und MeteoSchweiz-Stationen unter-, durchschnittliche und überdurchschnittliche Schneehöhen auf. Diese überdurchschnittlichen Schneehöhen sind vor allem auf die grossen Schneefälle Anfang Winter in den betroffenen Gebieten zurückzuführen. Bemerkenswert an diesem Winter waren einerseits die wiederholten Regenfälle bis über die Waldgrenze, die unterhalb von 2000m ein stärkeres Anwachsen der Schneedecke verhinderten. Andererseits die sehr geringen Schneefälle im Januar und Februar auf der Alpensüdseite und im Engadin, wobei der niederschlagsarme und sehr sonnige Januar die ganze Schweiz betraf.

Anmerkungen

- 1 www.bernclim.ch. Rutishauser, T., F. Jeanneret, R. Brügger, Y. Brugnara, C. Röthlisberger, A. Bernasconi, P. Bangerter, C. Portenier, L. Villiger, D. Lehmann, L. Meyer, B. Messerli, S. Brönnimann (2019) The BernClim plant phenological data set from the Canton of Bern (Switzerland) 1970–2018, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1645–1654. doi.org/10.5194/essd-11-1645-2019.
- 2 Schweizer Phänologie Beobachtungsnetz SPN. www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/bodenstationen/phaenologisches-beobachtungsnetz.html
- 3 PhaenoNet. www.phaenonet.ch
- 4 OpenNature. www.geography.unibe.ch/research/climatology_group/research_projects/open_the_book_of_nature/index_eng.html
- 5 Vassella A. (1997) Phänologische Beobachtungen des Bernischen Forstdienstes von 1869 bis 1882: Witterungseinflüsse und Vergleich mit heutigen Beobachtungen, *Umwelt-Materialien*, 73, Phänologie von Waldbäumen. Historische und aktuelle Beobachtungen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- 6 Defila C., B. Clot (2001) Phytophenological trends in Switzerland. *Int. J. Biometeorol.*, 45, 203–207. doi.org/10.1007/s004840100101
- 7 Güsewell S., B. Pietragalla, R. Gehrig, R. Furrer (2018) Representativeness of stations and reliability of data in the Swiss Phenology Network, Technical Report MeteoSwiss, 267.
- 8 Brugnara Y., R. Auchmann, T. Rutishauser, R. Gehrig, B. Pietragalla, M. Begert, C. Sigg, V. Knechtli, T. Konzelmann, B. Calpini, S. Brönnimann (2020) Homogeneity assessment of phenological records from the Swiss Phenology Network, *Int. J. Biometeorol.*, 64, 71–81.
- 9 Lehmann D., E. Wyss, T. Rutishauser, S. Brönnimann (2018) Citizen Science: Pflanzenphänologische Daten erfüllen wissenschaftliche Kriterien. *Geographica Bernensia G93*, 1–4. doi.org/10.4480/GB2017.G93
- 10 Frühlingsindex. www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/vegetationsentwicklung/fruehlingsindex.html
- 11 ge.ch/grandconseil/m/secretariat/marronnier/
- 12 Güsewell S., R. Furrer, R. Gehrig, B. Pietragalla (2017) Changes in temperature sensitivity of spring phenology with recent climate warming in Switzerland are related to shifts of the pre-season, *Glob. Change Biol.*, 23, 5189–5202. doi.org/10.1111/gcb.13781
- 13 Hopkins A. D. (1919) The Bioclimatic Law as applied to entomological research and farm practice, *Scientific Monthly*, 8, 496–513.
- 14 Vitasse Y., C. Signarbieux, Y.H. Fu (2018) Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations, *Proc. Natl. Acad. Sciences*, 115, 1004–1008.
- 15 Fu Y.H., H. Zhao, S. Piao, M. Peaucelle, S. Peng, G. Zhou, P. Ciais, M. Huang, A. Menzel, J. Peñuelas, Y. Song (2015) Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding, *Nature*, 526, 104–107. doi.org/10.1038/nature15402
- 16 Klimabulletin Frühling 2020, MeteoSchweiz.
- 17 Vitasse Y., A. Lenz, C. Körner (2014) The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees, *Front. Plant Sci.*, 5, 541. doi.org/10.3389/fpls.2014.00541
- 18 Vitasse, Y. (2013) Ontogenic changes rather than difference in temperature cause understory trees to leaf out earlier. *New Phytol.* 198, 149–155. doi.org/10.1111/Nph.12130
- 19 Wohlgenuth T., M. Kistler, C. Aymon, F. Hagedorn, A. Gessler, M. M. Gossner, V. Queloz, I. Vöggtli, U. Wasem, Y. Vitasse, A. Rigling (2020) Früher Laubfall der Buche während der Sommertrockenheit 2018: Resistenz oder Schwächesympptom? *Schweiz. Z. Forstwesen*, 171, 257–269. doi.org/10.3188/szf.2020.0257
- 20 www.wsl.ch/de/projekte/testpflanzen.html
- 21 naturwissenschaften.ch/seasons-explained
- 22 www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/obstbau/pflanzenschutz-obst/obstbulletins.html
- 23 www.agrometeo.ch/de, www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/obstbau/pflanzenschutz-obst/prognosen/schorfprognose.html
- 24 Walther G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, F. Bairlein (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395. doi.org/10.1038/416389a
- 25 Root T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig, J. A. Pounds (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57–60.
- 26 Stoeckli S., R. Felber, T. Haye (2020) Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model, *Int. J. Biometeorol.*, 64, 2019–2032. doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z
- 27 Stoeckli S., M. Hirschi, C. Spirig, P.L. Calanca, M.W. Rotach, J. Samietz (2012) Impact of Climate Change on Voltinism and Prospective Diapause Induction of a Global Pest Insect – *Cydia pomonella* (L.), *PLoS ONE*, 7, e35723. doi.org/10.1371/journal.pone.0035723
- 28 Essl F., W. Rabitsch (2013) Biodiversität und Klimawandel: Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- 29 Parmesan C. (2007) Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biol.*, 13, 1860–1872.
- 30 Tilyanakis, J. M., R. K. Didham, J. Bascompte, D. A. Wardle (2008) Global change and species interactions in terrestrial ecosystems, *Ecol. Letters*, 11, 1351–1363.
- 31 Biesmeijer, J. C., S. P. M. Roberts, M. Reemer, R. Ohlemüller, M. Edwards, T. Peeters, A. P. Schaffers, S. G. Potts, R. Kleukers, C. D. Thomas, J. Settele, W. E. Kunin (2006) Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands, *Science*, 313, 351–354.
- 32 Potts, S. G., J. C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger, W. E. Kunin (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers, *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 345–353.
- 33 Naef-Daenzer, B., J. Luterbacher, M. Nuber, T. Rutishauser, W. Winkel (2012) Cascading climate effects and related ecological consequences during past centuries, *Clim. Past*, 8, 1527–1540. www.clim-past.net/8/1527/2012/
- 34 www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/das-nccs/themenschwerpunkte/schadorganismen-landwirtschaft.html
- 35 Grant, E. (1996) *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional, and Intellectual Contexts*. Cambridge University Press.
- 36 Wegmann, M. (2005) *Naturwahrnehmung im Mittelalter im Spiegel der lateinischen Historiographie des 12. und 13. Jahrhunderts*. Lateinische Sprache und Literatur des Mittelalters, Band 40, Peter Lang, Bern.
- 37 Pfister, C. (1999) *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995)*, Bern, Haupt.
- 38 Wetter, O., C. Pfister (2014) Eine tragfähige Datenbrücke – Phänologische Beobachtungen im Amtsblatt des Kantons Schaffhausen 1876–1950, *Bauhinia*, 25, 69–85.
- 39 Pfister, C., C. Rohr, www.euroclimhist.unibe.ch/de/
- 40 Labbé, T., C. Pfister, S. Brönnimann, D. Rousseau, J. Franke, B. Bois (2019) The longest homogeneous series of grape harvest dates, Beaune 1354–2018, and its significance for the understanding of past and present climate, *Clim. Past*, 15, 1485–1501. doi.org/10.5194/cp-15-1485-2019
- 41 Chuine, I., P. Yiu, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux, E. Le Roy Ladurie (2004) Grape ripening as a past climate indicator, *Nature*, 432, 89–290.
- 42 Labbé, T., F. Gaveau (2013) Les dates de vendange à Beaune (1371–2010). Analyse et données d'une nouvelle série vendémiologique, *Rev. Historique*, 666, 333–367.
- 43 Wetter, O., C. Pfister, J. P. Werner, E. Zorita, S. Wagner, S. Seneviratne, J. Herget, U. Grünewald, J. Luterbacher, M. J. Alcoforado, M. Barriendos, U. Bieber, R. Brázdil, K. H. Burmeister, C. Camenisch, A. Contino, P. Dobrovolný, R. Glaser, I. Himmelsbach, A. Kiss, O. Kotyza, T. Labbé, D. Limanówka, L. Lützenburger, Ø. Nordli, K. Pribyl, D. Retsö, D. Riemann, C. Rohr, W. Siegfried, J. Söderberg, J. L. Spring (2014) The year-long unprecedented European heat and drought of 1540 – a worst case, *Clim. Change*, 125, 349–363. doi.org/10.1007/s10584-014-1184-2
- 44 Camenisch, C., R. Brázdil, A. Kiss, C. Pfister, O. Wetter, C. Rohr, A. Contino, D. Retsö (2020) Extreme heat and drought in 1473 and their impacts in Europe in the context of the early 1470s. *Reg. Environ. Change*, 20, 19. doi.org/10.1007/s10113-020-01601-0
- 45 Hannah, L., P. R. Roehrdanz, M. Ikegami, A. V. Shepard, M. R. Shaw, G. Tabor, L. Zhi, P. A. Marquet, R. J. Hijmans (2013) Climate change, wine, and conservation, *Proc. Natl. Acad. Sciences*, 110, 6907–6912. doi.org/10.1073/pnas.1210127110

- 46 Frei C. (2014) Interpolation of temperature in a mountainous region using non-linear profiles and non-Euclidean distances, *Int. J. Climatol.*, 34, 1585–1605. doi.org/10.1002/joc.3786
- 47 Pfister L., S. Brönnimann, M. Schwander, F. A. Isotta, P. Horton, C. Rohr (2020) Statistical Reconstruction of Daily Precipitation and Temperature Fields in Switzerland back to 1864, *Clim. Past*, 16, 663–678. doi.org/10.5194/cp-16-663-2020
- 48 CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- 49 Zubler E. M., S. C. Scherrer, M. Croci-Maspoli, M. A. Liniger, C. Appenzeller (2014) Key climate indices in Switzerland; expected changes in a future climate, *Clim. Change*, 123, 2, 255–271.
- 50 Molitor D., A. Caffarra, P. Sinigoj, I. Pertot, L. Hoffmann, J. Junk (2014) Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: A case study for the Luxembourgish wine-growing region, *Austr. J. Grape Wine Res.*, 20, 160-168.
- 51 Mosedale J. R., R. J. Wilson, I. M. D. Maclean (2015) Climate Change and Crop Exposure to Adverse Weather: Changes to Frost Risk and Grapevine Flowering Conditions, *PLoS One*, 10, e0141218.
- 52 BLW (2018) Das Weinjahr 2017 in: BLW (Ed.), *Weinwirtschaftliche Statistik*. BLW, Bern.
- 53 Heslot N., D. Akdemir, M. E. Sorrells, J.-L. Jannink (2014) Integrating environmental covariates and crop modeling into the genomic selection framework to predict genotype by environment interactions, *Theoretical and Applied Genetics*, 127, 463-480.
- 54 Hawker J., C. Jenner (1993) High Temperature Affects the Activity of Enzymes in the Committed Pathway of Starch Synthesis in Developing Wheat Endosperm, *Functional Plant Biology*, 20, 197-209.
- 55 Luo Q. (2011) Temperature thresholds and crop production: a review, *Clim. Change*, 109, 583-598.
- 56 Peltonen-Sainio P., L. Jauhiainen, K. Hakala (2011) Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions, *J. Agric. Science*, 149, 49-62.
- 57 Porter J. R., M. Gawith (1999) Temperatures and the growth and development of wheat: a review, *Europ. J. Agronomy*, 10, 23-36.
- 58 Prasad P. V. V., D. Maduraimuthu (2014) Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: Sensitive stages and thresholds for temperature and duration, *Functional Plant Biol.*, 41, 1261.
- 59 Barnabas B., K. Jager, A. Feher (2008) The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.*, 31, 11-38.
- 60 Wollenweber B., J. R. Porter, J. Schellberg (2003) Lack of Interaction between Extreme High-Temperature Events at Vegetative and Reproductive Growth Stages in Wheat, *J. Agron. Crop Sci.*, 189, 142-150.
- 61 Draeger T., G. Moore (2017) Short periods of high temperature during meiosis prevent normal meiotic progression and reduce grain number in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.), *Theor. Appl. Genet.*, 130, 1785–1800.
- 62 Gate P. (1995) *Écophysiologie du blé*, Technique & Documentation – Lavoisier, Paris.
- 63 Lancashire P. D., H. Bleiholder, T. van den Boom, P. Langelüddeke, R. Stauss, E. Weber, A. Witzinger (1991) A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds, *Annals of Applied Biology*, 119, 561-601.
- 64 Schürch C., L. Kronenberg, A. Hund (2018) Wheat Developmental Stages, commons.wikimedia.org/wiki/File:Wheat_developmental_stages.tif (zugegriffen 22. November 2020).
- 65 Braun H. J., S. Rajaram, M. van Ginkel (1997) CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation, in: Tigerstedt P. M. A. (Hrsg) *Adaptation in Plant Breeding*. Developments in Plant Breeding, 4, 197-205.
- 66 Royo C., G. Briceño-Felix (2011) Wheat breeding in Spain, in: *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding* 2, 121-154.
- 67 Sonder K. (2018) Global map of wheat mega-environments, data.cimmyt.org/dataset.xhtml?persistentId=hdl:11529/10625 (zugegriffen 22. November 2020).
- 68 Wechselweizen ist ein Sommerweizen mit höherer Frosttoleranz und vergleichsweise geringem Vernalisationsanspruch, d.h. nur einer geringen «Kältebedürftigkeit» zur Blüteninduktion.
- 69 Evans L. T., R. A. Fischer (1999) Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance, *Crop Science*, 39, 1544-1551.
- 70 Liu Y., Q. Chen, Q. Ge, J. Dai, Y. Dou (2018) Effects of climate change and agronomic practice on changes in wheat phenology, *Clim. Change*, 150, 273-287.
- 71 Dias A. S., F. C. Lidon (2009) Evaluation of Grain Filling Rate and Duration in Bread and Durum Wheat, under Heat Stress after Anthesis, *J. Agron. Crop Sci.*, 195, 137-147.
- 72 Rezaei E. E., S. Siebert, H. Hüging, F. Ewert (2018) Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change, *Scientific Reports*, 8, 4891.
- 73 Mäkinen H., J. Kaseva, M. Trnka, J. Balek, K. C. Kersebaum, C. Nendel, A. Gobin, J. E. Olesen, M. Bindi, R. Ferrise, M. Moriondo, A. Rodríguez, M. Ruiz-Ramos, J. Takáč, P. Bezák, D. Ventrella, F. Ruget, G. Capellades, H. Kahiluoto (2018) Sensitivity of European wheat to extreme weather, *Field Crops Research*, 222, 209-217.
- 74 Vitasse Y., M. Rebetez (2018) Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Clim. Change*, 149, 233–246. doi.org/10.1007/s10584-018-2234-y
- 75 Wolpert J. A., G. S. Howell (1985) Cold Acclimation of Concord Grapevines. I. Variation in Cold Hardiness Within the Canopy, *Am. J. Enology and Viticul.*, 36, 185-188.
- 76 Ma Q. Q., J. G. Huang, H. Hänninen, F. Berninger (2019) Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming, *Global Change Biol.*, 25, 351-360.
- 77 Augspurger C. K. (2013) Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing, *Ecology*, 94, 41-50.
- 78 Meier M., J. Fuhrer, A. Holzkämper (2018) Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley, *Int. J. Biometeorol.*, 62, 991-1002.
- 79 Hoffmann H., T. Rath (2013) Future Bloom and Blossom Frost Risk for *Malus domestica* Considering Climate Model and Impact Model Uncertainties, *PLOS ONE* 8, e75033.
- 80 Pflieger P., I. Menke, C.-F. Schlessner (2019) Increasing risks of apple tree frost damage under climate change, *Clim. Change*, 157, 515–525.
- 81 Jeanneret F. (1975) Die Verteilung der Spätfrostschäden in der Schweiz im Frühling 1974, *Informationen und Beiträge zur Klimaforschung*, 13, 1–14.
- 82 Weingartner R., H. Aschwanden (1992) Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses, *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2.
- 83 HADES. Daten- und Analyseplattform. www.hydromaps.ch. Zugegriffen: 22. November 2020.
- 84 Muelchi R., O. Rössler, J. Schwanbeck, R. Weingartner, O. Martius (2020) Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, in review. doi.org/10.5194/hess-2020-516
- Muelchi R., O. Rössler, J. Schwanbeck, R. Weingartner, O. Martius (2020) An ensemble of daily simulated runoff data (1981–2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble), Geoscientific Model Development, under review.
- 85 Daten aus Helbling A., C. Kan, P. Marti (2007) Niedrigwasser – kleinste Mehrtagesmittel des Abflusses, *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.11.
- 86 Florianciuc M. (2019) Charakterisierung von Niedrigwasserregimen – Auswertung und Gegenüberstellung von Abflussdatenreihen und Niederschlagsdaten. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.
- 87 Diezig R. (2006) Hochwassertypen in der Schweiz. Diplomarbeit, Universität Bern.
- 88 Wipf S., V. Stoeckli, P. Bebi (2009) Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing, *Clim. Change*, 94, 105–121. doi.org/10.1007/s10584-009-9546-x
- 89 Scherrer S. C., P. Ceppi, M. Croci-Maspoli, C. Appenzeller (2012) Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends, *Theor. Appl. Climatol.*, 110, 509–516. doi.org/10.1007/s00704-012-0712-0
- 90 Rogora M. (2018) Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines, *Sci. Total Environ.*, 624, 1429–1442. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.155
- 91 Viterbi R., S. Imperio, D. Alpe, V. Bosser-Peverelli, A. Provenzale (2015) Climatic control and population dynamics of black grouse (*Tetrao tetrix*) in the Western Italian Alps, *J. Wildlife Management*, 79, 156–166. doi.org/10.1002/jwmg.810
- 92 Resano-Mayor J. (2019) Snow cover phenology is the main driver of foraging habitat selection for a high-alpine passerine during breeding: implications for species persistence in the face of climate change, *Biodivers. Conserv.*, 28, 2669–2685. doi.org/10.1007/s10531-019-01786-9

- 93 Zhang Y. et al. (2015) The impact of the cognition of landscape experience on tourist environmental conservation behaviors, *J. Mt. Sci.*, 12, 501–517. doi.org/10.1007/s11629-014-3150-x.
- 94 Maurer J. (1909) Das Klima der Schweiz. Erster Band.
- 95 Buchmann M. (2016) Changes of snow onset and disappearance dates during the last 60 years in the Swiss Alps. Master Thesis in Environmental Sciences, ETH Zürich.
- 96 Klein G., Y. Vitasse, C. Rixen, C. Marty, M. Rebetez (2016) Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset, *Clim. Change*, 139, 637–649. doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y
- 97 Schmucki E., C. Marty, C. Fierz, R. Weingartner, M. Lehning (2017) Impact of climate change in Switzerland on socioeconomic snow indices, *Theor. Appl. Climatol.*, 127, 875–889. doi.org/10.1007/s00704-015-1676-7
- 98 Verfaillie D., M. Lafaysse, M. Déqué, N. Eckert, Y. Lejeune, S. Morin (2018) Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249–1271. doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018.
- 99 Begert M., T. Schlegel, W. Kirchhofer (2005) Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000, *Int. J. Climatol.*, 25, 65–80. doi.org/10.1002/joc.1118
- 100 Scherrer S. C., M. Begert, M. Croci-Maspoli, C. Appenzeller (2016) Long series of Swiss seasonal precipitation: regionalization, trends and influence of large-scale flow, *Int. J. Climatol.*, 36, 3673–3689. doi.org/10.1002/joc.4584

Bildnachweis

Umschlag: Barbara Pietragalla (oben); Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau (unten)

Vorwort: Stefan Brönnimann

Abb. 1: Yann Vitasse

Abb. 2: Stefan Brönnimann

Abb. 3: MeteoSchweiz

Abb. 4: Stefan Brönnimann

Abb. 5: BernClim

Abb. 6: MeteoSchweiz

Abb. 7: MeteoSchweiz

Abb. 8: aus Anmerkung 15

Abb. 8.1: Barbara Pietragalla

Abb. 9: Yann Vitasse

Abb. 10: Frederik Baumgarten

Abb. 11: Yann Vitasse

Abb. 12: Andreas Rigling

Abb. 13: Urs Weber

Abb. 14: Frederik Baumgarten

Abb. 15: Stefan Brönnimann

Abb. 16: Regula Gehrig

Abb. 17: <https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Fruehlingsergebnisse.gif>

Abb. 18: Vogelwarte Sempach

Abb. 19: Sibylle Studer

Abb. 19.1: Pixabay/Jerzy Górecki

Abb. 20: Christian Pfister

Abb. 21: Christian Pfister

Abb. 22: Foto Christian Pfister

Abb. 23: Christian Pfister

Abb. 24: Maulaff / Wikimedia Commons, CC-BY-SA 4.0

Abb. 25: Nightstallion / Wikimedia Commons, S. Egts

Abb. 26: Stefan Brönnimann

Abb. 27: Stefan Brönnimann

Abb. 28: pxhere, CCO

Abb. 29: verändert Anmerkung 64

Abb. 30: Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau

Abb. 31: Peter Orlando Prange

Abb. 32: Stefan Brönnimann

Abb. 33: Springer Nature, CC-BY

Abb. 34: François Jeanneret

Abb. 35: Rolf Weingartner

Abb. 36: Rolf Weingartner

Abb. 37: aus Anmerkung 82

Abb. 38: Modellierung: Regula Mülchi

Abb. 39: Rolf Weingartner mit Daten aus 85

Abb. 40: Robert Diezig

Abb. 41: Moritz Buchmann

Abb. 42: Moritz Buchmann

Abb. 43: nach Anmerkung 97

Abb. 44: Peter Bangerter

Autorenschaft

Frederik Baumgarten, Ökosystem-Ökologie, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. frederik.baumgarten@wsl.ch

Stefan Brönnimann, Geographisches Institut und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern. stefan.broennimann@giub.unibe.ch

Moritz Buchmann, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung. moritz.buchmann@slf.ch

Dario Fossati, Ackerpflanzenzüchtung und Genressourcen, Agroscope. dario.fossati@agroscope.admin.ch

Regula Gehrig, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Regula.Gehrig@meteoswiss.ch

Annelie Holzkämper, Klima und Landwirtschaft, Agroscope und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern. annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch

Andreas Hund, Agrarwissenschaften, ETH Zürich. andreas.hund@usys.ethz.ch

Michael Meier, Professur für Waldökologie, ETH Zürich. michael.meier@usys.ethz.ch

Barbara Pietragalla, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Barbara.Pietragalla@meteoswiss.ch

Christian Pfister, Historisches Institut und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern. christian.pfister@hist.unibe.ch

This Rutishauser, Geographisches Institut und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern. this@kontextlabor.ch

Sibylle Stöckli, Departement für Nutzpflanzenwissenschaften, Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. sibylle.stoekli@fibl.org

Yann Vitasse, Ökosystem-Ökologie, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. yann.vitasse@wsl.ch

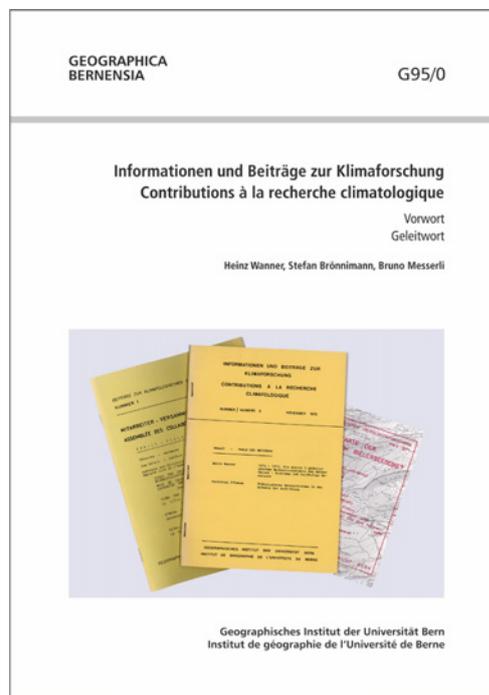
Rolf Weingartner, Geographisches Institut und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern. rolf.weingartner@giub.unibe.ch

Open Access Online Publikationen zur Phänologie:

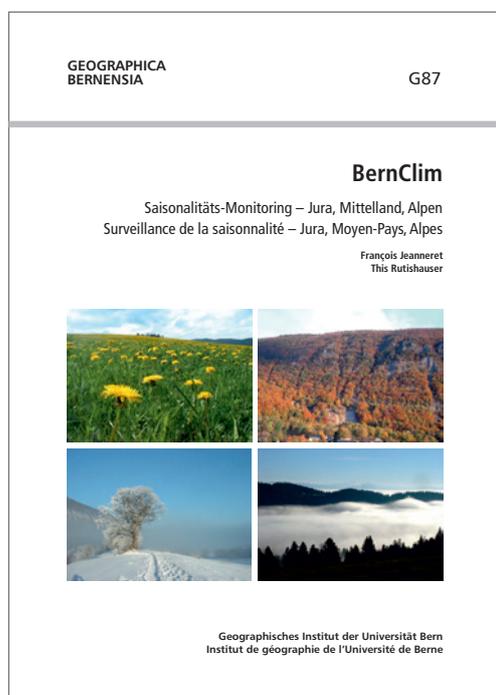
www.geography.unibe.ch/dienstleistungen/geographica_bernensia/digitale_publicationen/



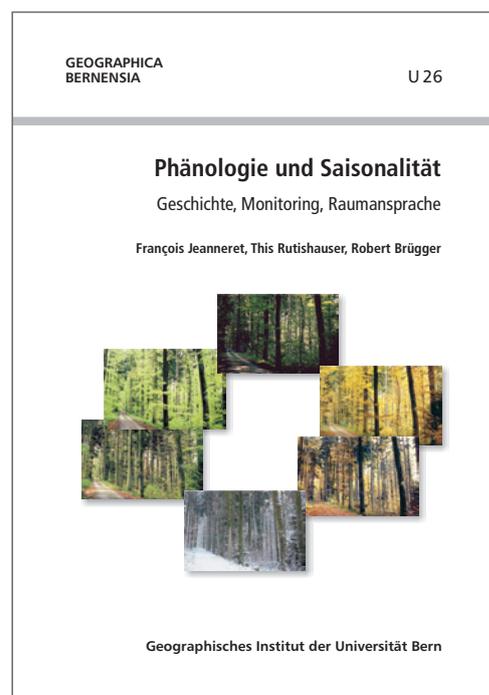
Jeanneret F., Vautier P., Aerni K. 1977. Kartierung der Klimaeignung für die Landwirtschaft in der Schweiz / Levé cartographique des aptitudes climatiques pour l'agriculture en Suisse. Geographica Bernensia G6, doi: [10.4480/GB2020.G6](https://doi.org/10.4480/GB2020.G6)



Informationen und Beiträge zur Klimaforschung/Contributions à la recherche climatologique / Titel 1970 und 1971: Beiträge zur klimatologischen Grundlagenforschung/Matériaux pour la recherche des bases climatiques. Geographica Bernensia G95.



Jeanneret F., Rutishauser, T. 2018. BernClim. Saisonalität-Monitoring – Jura, Mittelland, Alpen / Surveillance de la saisonnalité – Jura, Moyen Pays, Alpes. Geographica Bernensia G 87. doi: [10.4480/GB2018.G87](https://doi.org/10.4480/GB2018.G87)



Jeanneret F., Rutishauser T., Brügger R. (2018). Phänologie und Saisonalität. Geschichte, Monitoring, Raumsprache. Geographica Bernensia U 26. doi: [10.4480/GB2018.U26](https://doi.org/10.4480/GB2018.U26)

