

Die Vegetationsentwicklung – erfasst am Individuum und über den Raum

Robert Brügger Universität Bern, Geographisches Institut (Phänologie) (CH)*
Sibylle Studer Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteo Schweiz (CH)
Reto Stöckli ETH Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima (CH)

Changes in plant development – monitored on the individual plant and over geographical area

The phenological development of plants provides information about the influence of weather on vegetation and may be assessed on both the individual plant level and on a global level. Since 2000, Switzerland has had a phenological monitoring network for forest trees which records the seasonality and is complementary to the ICP-Forests Assessments (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests). A comparison of leaf discoloration at the monitoring plot Kaiseraugst has shown that beech, oak and ash trees have all been affected differently as a result of the summer drought of 2003. In 2004, a digital picture data base was developed for the research project 'Phenophot' at the Geographical Institute Berne which allows the phenological observations to become objective and reproducible. A Phenological Growing Index (PGI) is being derived from the red-green-blue channel data of the digital sensor, which complements the information of satellite based vegetation indices. These indices include the Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) on a sub-pixel level which provides improved accuracy for the information on the character and beginning and ending of the vegetation period. The first comparison of the phenological spring index from the satellite based NDVI revealed that the annual start of spring is reproduced most accurately by determining a threshold of the NDVI.

Key words: phenology, NDVI, vegetation index, photo phenology, forest phenology
doi: 10.3188./szf.2007.0221

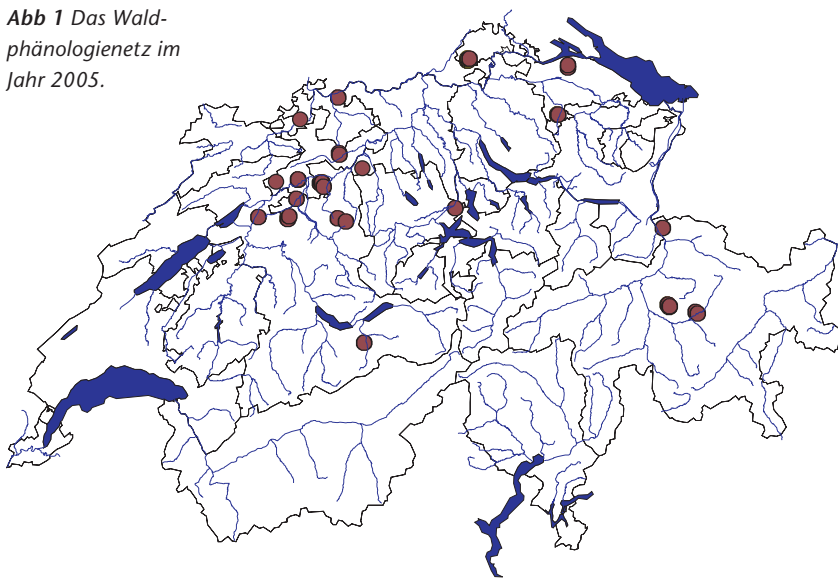
* Hallerstr. 12, CH-3012 Bern, E-Mail bruegger@giub.unibe.ch

Mit der Satellitentechnologie ist es möglich, die Vegetationsentwicklung vom saisonalen Rhythmus der höheren Breiten bis zu den niederschlagsbedingten Grünwellen arider Gebiete weltweit auf verschiedenen Auflösungsebenen festzuhalten. Die Bildsensoren erfassen das von der Erdoberfläche zurückgestrahlte Licht, woraus qualitative und quantitative Aussagen über die Zusammensetzung der Erdoberfläche berechnet werden können. Ein Produkt davon ist der «Normalised Difference Vegetation Index» (NDVI). Er repräsentiert einen Grünwert der Erdoberfläche. Für die Berechnung des Indexes wird das unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsverhalten lebender bzw. toter Materie im roten sowie im nahen Infrarotbereich des Sonnenspektrums ausgenutzt. In den letzten Jahren hat sich daraus ein leistungsstarkes Werkzeug für das Klima- und Umweltmonitoring entwickelt, welches für phänologische Fragen, insbesondere auf kontinentaler oder gar globaler Skala, stark an Bedeutung gewonnen hat (z.B. Myneni et al 1997, Schwartz et al 2006, Zhang et al 2006).

Während mit Daten von Satelliten die raumzeitliche Entwicklung untersucht werden kann, liegt die Stärke der Beobachtung einzelner Pflanzen oder Bestände im Gewinn des Wissens um Zusammenhänge zwischen Wachstum und Entwicklung von Organismen und der Umwelt. Agronomen und Biologen nutzen diese oft durch empirische Daten untermauerten Zusammenhänge etwa für die Modellierung von Erträgen unterschiedlicher Pflanzensorten. Sie arbeiten dabei mit genau definierten pflanzlichen Entwicklungsstadien, die für Europa beispielsweise im BBCH-Code (Meier 1997) vereinheitlicht wurden. Die Phänologie nutzt diesen Code ihrerseits, um ihre klassische Beobachtungsgrösse, die Phänophase, international vergleichbar zu machen.

In diesem Aufsatz werden drei phänologische Ansätze vorgestellt, die alle ihren Fokus auf die Entwicklung der Vegetation richten. Der erste Ansatz präsentiert eine Erweiterung der phänologischen Beobachtungsmethode, welche die Entwicklung der Pflanzen ins Zentrum stellt. Ansatz zwei befasst sich

Abb 1 Das Waldphänologienetz im Jahr 2005.



mit der Erfassung der phänologischen Entwicklung von Waldbäumen mit digitalen Fotografien. Der dritte Ansatz schliesslich beinhaltet einen Vergleich der traditionellen beobachtenden Phänologie mit der modernen Satellitenphänologie.

Waldphänologie – ein Beobachtungsnetz zwischen biologischer und klimatologischer Forschung

In den letzten Jahren sind in der Biosphäre unseres Planeten diverse Zeichen von Veränderungen dokumentiert worden, die in Zusammenhang mit dem Klimawandel gebracht werden (McCarthy et al 2001, Van Vliet et al 2003). Viele davon laufen mit bisher noch nie beobachteter Geschwindigkeit ab (Root et al 2003). Im Wald ist dies bereits die dritte grosse Veränderung der letzten 30 Jahre. Mitte der 80er-Jahre des letzten Jahrhunderts wurden im Zusammenhang mit der abnehmenden Gesundheit des Waldes erstmals europaweit verschiedene Monitoringprogramme ins Leben gerufen (z. B. ICP-Forests¹, UNECE 2005). Grosse Sturmereignisse wie «Vivian» und «Lothar» haben nicht nur in der Schweiz riesige Flächen Wald zerstört. Da sich die ökonomischen Rahmenbedingungen ebenfalls schnell verändern, ist die Planung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung heute vielschichtiger als noch vor einer Generation. Vorschläge über Handlungsmöglichkeiten der Forstverantwortlichen hinsichtlich der kommenden Klimaveränderungen werden regelmässig unterbreitet (z. B. Geburek 2006, Kölling 2006, Nicolussi & Patzelt 2006). Diese können jedoch nie auf alle Einzelheiten eingehen. Es ist schlussendlich der Erfahrungsschatz der lokalen

¹ ICP-Forests International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests), <http://www.icp-forests.org/> (22. März 2007)

Waldfachleute im Betrieb, aus dessen Fundus adäquate Lösungen z. B. bezüglich Baumbestand oder Bewirtschaftungspotenzial abgeleitet und umgesetzt werden können. Als Alternative, gegebenenfalls als Ergänzung, besteht immer die Möglichkeit von Erhebungen externer Fachleute. Ein Kompromiss bzw. eine Verbindung interner und externer Wissens- und Erfahrungs-Pools sind die phänologischen Beobachtungsnetze, in diesem Fall das Waldphänologienetz (Abbildung 1). Im Idealfall werden die Beobachtungen entweder von den Förstern selber oder engagierten Laien mit grosser Affinität zur Region durchgeführt.

Geschichte des Waldphänologienetzes

Erste systematische Beobachtungen zur Phänologie von Waldbäumen in der Schweiz fanden während der Jahre 1869 bis 1882 im Bernischen Staatswald statt (Zschokke 1891). Die Resultate dieser Beobachtungen konnten im Rahmen des Wald-erhebungsprogramms des Bundes digital erfasst, teilweise aufgearbeitet und zudem mit aktuellen Beobachtungen verglichen werden (Vassella 1997). Vassella gelang es aufzuzeigen, dass sich viele Baumarten heute tendenziell früher belauben. Die klaren Indizien sowie die Einfachheit der Methode an sich waren schliesslich Motivation für den Start eines Impulsprogramms für waldphänologische Beobachtungen, mit dem Ziel, die Methode des phänologischen Monitorings zu optimieren sowie die Basis für ein schweizerisches Beobachtungsnetz zu legen (Abbildung 1). Mit dem Schlussbericht des Projekts der Eidgenössischen Forstdirektion (Vassella & Brügger 2001) lagen eine Beobachtungsanleitung und ein eingerichtetes Beobachtungsnetz vor.

Die rund 40 Beobachtungsstationen an über 20 Standorten (Stand 2005) verteilen sich unregelmässig über die deutschsprachige Schweiz und befinden sich hauptsächlich im Mittelland. Die Bergwälder werden erst an Einzelstationen im Berner Oberland und in Graubünden berücksichtigt. Am häufigsten wird die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) beobachtet, gefolgt von der Fichte (*Picea excelsa*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und der Lärche (*Larix decidua*). Das Mosaik an Fallbeispielen wird umso besser ein gesamtes Bild des phänologischen Zustands des Schweizer Waldes ergeben, je dichter und zeitlich länger die Beobachtungsreihen sind.

Die WSL ist für die Datensicherung aus dem Waldphänologienetz verantwortlich, Meteo Schweiz für die Instruktion und Betreuung der Beobachter.

Methoden, Anleitungen und Datensicherung

2003 wurde die offizielle Anleitung für phänologische Beobachtungen von Meteo Schweiz publiziert (Brügger & Vassella 2003). Die wichtigste Besonderheit des Waldphänologieprogramms besteht darin, sowohl Einzelbäume wie auch ganze Bestände

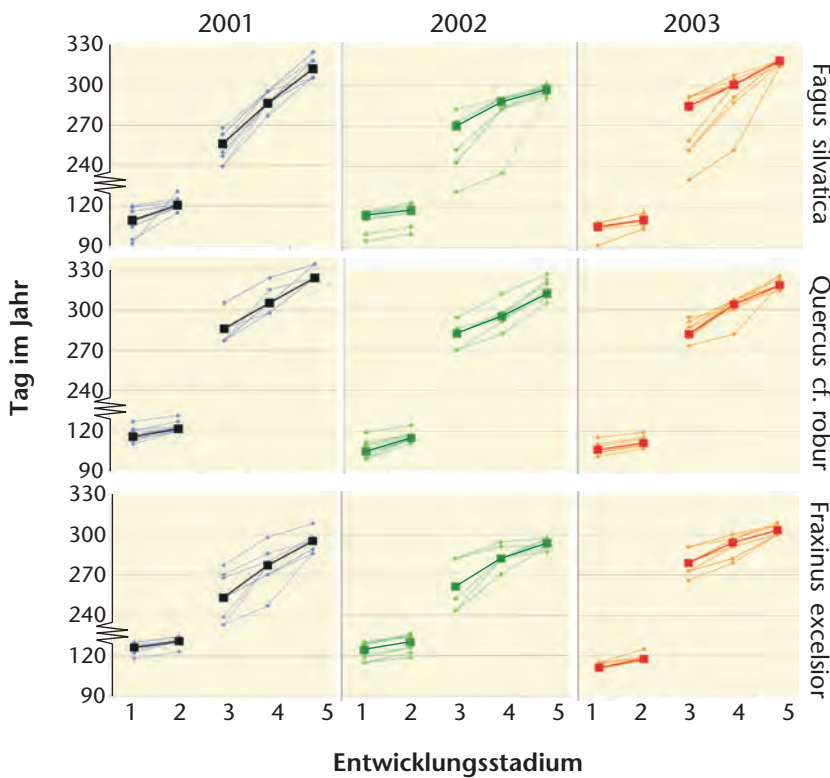


Abb 2 Phänologische Entwicklung von je zehn Bäumen dreier Baumarten am Standort Kaiseraugst in den Jahren 2001 bis 2003, dargestellt anhand der Eintrittstage der Phänophasen: 1 Beginn des Blattaustriebs (erste drei Blätter an drei Knospen entfaltet); 2 allgemeiner Blattaustrieb (50%); 3 Beginn der Blattverfärbung (10% der Blätter sind gelb); 4 allgemeine Blattverfärbung (50%); 5 allgemeiner Blattfall (50%).

beobachten zu können. Die Erhebung von Einzelbaumdaten wird trotz Mehraufwand empfohlen, weil damit wichtige Informationen zur Variabilität innerhalb des genetischen Pools einer Art dokumentiert werden. Abbildung 2 zeigt, dass sowohl im Frühjahr wie auch im Herbst grosse individuelle Unterschiede zwischen den einzelnen Bäumen zu erkennen sind, welche sich je nach Verlauf der Witterung von Jahr zu Jahr verstärken beziehungsweise abschwächen. Im Weiteren kann die phänologische Entwicklung einzelner Wachstums- und Entwicklungsprozesse mit der so genannten Prozentschätzmethode fortlaufend erfasst werden. Abbildung 3 zeigt als Beispiel den Entwicklungsverlauf im Frühling: Wird bei jedem Beobachtungsgang die Menge der Knospen geschätzt, welche die vorgegebenen Entwicklungsstadien erreicht haben, so sind über den Verlauf der phänologischen Entwicklung detaillierte Aussagen möglich. Dies erleichtert die Vergleichbarkeit mit kontinuierlichen Messungen klimatischer, standortkundlicher oder umweltrelevanter Daten. Für Zeitreihen über mehrere Jahre können bestimmte Phänophasen festgehalten werden (hier am Beispiel «allgemeiner Blattaustrieb»). Sie liefern repräsentative Einzeldaten für den ganzen Prozess (am Beispiel in Abbildung 3 fiel der allgemeine Blattaustrieb auf den 1. Mai).

Variabilität der Vegetationsdauer als Fallbeispiel

Ein Fallbeispiel für die phänologische Reaktion dreier Baumarten in Kaiseraugst auf die Trockenheit im Sommer 2003 zeigt eindrücklich, wie rasch und unterschiedlich Buche (*Fagus sylvatica* L.), Eiche (nach Aussage vom Revierförster vermutlich Stieleiche, *Quercus cf. robur* L.) und Esche (*Fraxinus excelsior* L.) reagiert haben (Abbildung 4). Bei Buchen und Eschen haben sich die Blätter nach dem trockenen Sommer und milden Herbst 2003 spät verfärbt und sind entsprechend spät abgefallen. Die Streuung innerhalb der Population der Buchen im Jahre 2003 war aber grösser als beispielsweise im Jahre 2001 (Abbildung 2). Das phänologische Verhalten der Eiche dagegen blieb im Herbst weitgehend konstant.

Auswertungen der WSL zeigen, dass das Baumwachstum im Jahre 2003 in der kollinen Stufe der ganzen Schweiz unter den Normalwerten blieb (Jolly et al 2005). Messungen der Universität Basel im Untersuchungsgebiet des Swiss Canopy Crane Project (SCC)² in Hofstetten nahe bei Kaiseraugst bestätigen dies (Leuzinger et al 2005). Die Netto-Fotosyntheserate aller Bäume ging bis Mitte August stark zurück. Für *Quercus cf. petraea* wurden über die Sommermonate überraschenderweise jedoch konstante Saftflüsse gemessen, während sie bei den Buchen auf die Hälfte der fröhsommerlichen Werte zurückgingen. Weshalb also bei den stark gedrosselten Buchen das Laub länger grün blieb als in den Jahren zuvor, die Eichen jedoch keine Reaktion zeigten, lässt vermuten, dass die Initialisierung der Herbstverfärbung nicht von Fotosyntheseprozessen in den Blättern ausgeht, sondern beispielsweise vom Hormonhaushalt.

² <http://pages.unibas.ch/botschoen/scc/index.shtml> (22. März 2007)

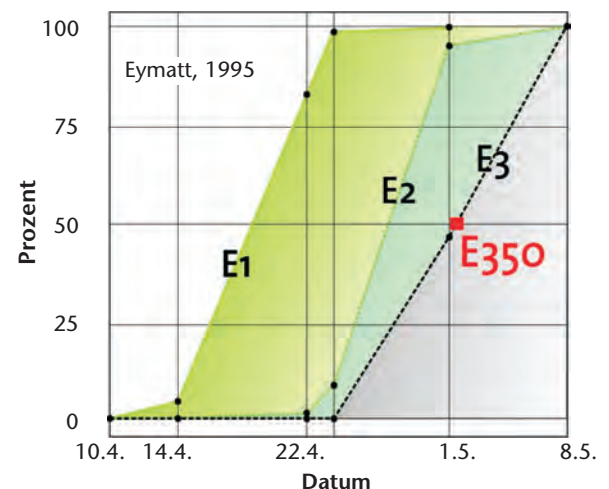


Abb 3 Phänologischer Entwicklungsverlauf im Frühling. E1–E3 Entwicklungsstadien, E350 Phänophase allgemeiner Blattaustrieb (Zeitpunkt, an welchem 50% aller Knospen mindestens das Entwicklungsstadium 3 erreichen).

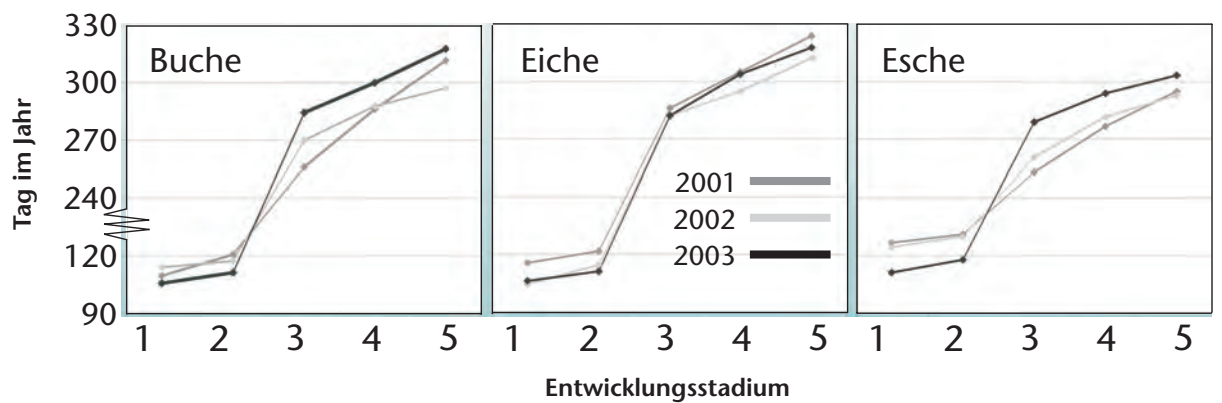


Abb 4 Phänologische Entwicklung von Buche (*Fagus silvatica* L.), Eiche (*Quercus cf. robur* L.) und Esche (*Fraxinus excelsior* L.) am Standort Kaiseraugst (Median von je 10 Bäumen in den Jahren 2001 bis 2003), dargestellt anhand der Eintrittstage der Entwicklungsstadien: 1 Beginn des Blattaustriebs (erste drei Blätter an drei Knospen entfaltet); 2 allgemeiner Blattaustrieb (50%); 3 Beginn der Blattverfärbung (10%); 4 allgemeine Blattverfärbung (50%); 5 allgemeiner Blattfall (50%).

halt abhängig sein könnte, welcher über die Saftflüsse gesteuert wird. Während der Phase der Trockenruhe blieben jedenfalls bei vielen Buchen die Signale für den Start des Chlorophyllabbaus aus. Inwiefern die Esche eine Sonderstellung einnimmt, weil sie als Vertreterin des mediterran-mitteuropäischen Florenelements bei der Herbstverfärbung andere physiologische Steuerungsprozesse nutzt, kann in diesem Zusammenhang nur als Frage aufgeworfen werden.

Die Vegetationsperiode – gemessen vom Tag mit 50% Blattaustrieb bis zum Tag mit 50% Blattverfärbung – war im Jahre 2003 sowohl auf Grund des frühen Austriebs als auch wegen der späten Laubverfärbung ausgesprochen lang (Abbildung 5). Diesen quantitativen Bonus konnten die Bäume offensichtlich nur dort in Holzmasse umwandeln, wo die Verfügbarkeit von Wasser gewährleistet war. Die phänologische Vegetationsdauer, gemessen an der zeitlichen Länge der Begrünung, sagt also nur bedingt etwas über das jährliche Baumwachstum aus (siehe auch Jolly et al 2005, Kaufmann et al 2004).

Die Phänologie als Puzzleteil prädiktiver Wissenschaften

Phänologische Daten spielen heute insbesondere für die Verknüpfung dynamischer Vegetationsmodelle mit globalen oder regionalen Modellen der atmosphärischen Zirkulation eine bedeutende Rolle. Verlässliche Daten zu Beginn, Dauer und Ende der Vegetationsperiode, zur Begrünung im Allgemeinen und möglicherweise zu Aussagen bezüglich weiterer Vegetationsindizes wie der Blattflächenindex stehen dabei im Vordergrund (Moorcroft 2006). Verschiedene Institutionen in der Schweiz haben begonnen, für ihre Forschungsfragen spezifische phänologische Daten selber zu erheben oder aber auf die umfangreiche Datenbank von Meteo Schweiz zurückzugreifen. Beim Wald nutzen die Gruppen von Niklaus E.

Zimmermann (WSL)³ und Antoine Guisan (Universität Lausanne)⁴ die Phänologie für Vegetationsmodelle, Christian Körner (Universität Basel)⁵ und Werner Eugster (ETH Zürich)⁶ für Fragen der CO₂-Flüsse. In Europa geht die Integration des phänologischen Datennetzes im Koordinationsprogramm COST 725⁷ weiter.

Je besser diese hoch aufgelösten, aber punktuellen Ansätze mit Beobachtungsdaten vor Ort ergänzt werden können, umso praxistauglicher werden die Modelle. Eine Verdichtung des waldphänologischen Beobachtungsnetzes ist daher angezeigt.

Fotophänologie

Moderne Bildaufnahme- und Verarbeitungstechniken, Positionierungssysteme (GPS) und raumbezogene Erfassungs- und Auswertesysteme (GIS) werden zunehmend als Hilfsmittel in der Agrar- und Forstwirtschaft eingesetzt. Dafür hat sich der Begriff «Precision Farming» bzw. «Precision Forestry» eingebürgert. Dahinter steckt das Konzept, die Bewirtschaftungsmassnahmen an die Variabilität der Standorts- und Bestandesparameter anzupassen, d. h. mit Hilfe neuer Technologien standortgerecht zu planen und gezielt Betriebsmittel und Ressourcen einzusetzen (z. B. Ackerman et al 2006). Mit dem Projekt Phenophot des Geografischen Instituts der Universität Bern wird für die Phänologie ein erster Schritt in Richtung einer entsprechenden Prozesskette gestartet. Die digitale Fototechnik erlaubt es,

3 <http://www.wsl.ch/forschung/forschungunits/landschaftsdynamik/> (22. März 2007)

4 <http://ecospat.unil.ch/> (22. März 2007)

5 <http://pages.unibas.ch/botschoen/> (22. März 2007)

6 <http://www.gl.ipw.agrl.ethz.ch/> (22. März 2007)

7 <http://topshare.wur.nl/cost725> (22. März 2007)

preiswerte Kameras mit grosser Auflösung für Monitoringzwecke einzusetzen und die Bilder mit Hilfe der in der Land- und Forstwirtschaft gebräuchlichen Verfahren auszuwerten. Das vorläufige Ziel ist, die phänologische Entwicklung von Bäumen objektiv mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu dokumentieren.

Phänologische Bilddaten aus digitalen Fotos

Digitale Bilddaten von der Erde werden täglich von verschiedenen Satelliten gesendet. Die Sensoren dieser Aufnahmesysteme liefern auf verschiedenen Wellenlängen – so genannten Kanälen – Informationen, aus denen, je nach Kombination, unterschiedliche Produkte berechnet werden können. Ein solches Produkt ist der «Normalised Difference Vegetation Index» NDVI. Digitale Fotokameras funktionieren im Wesentlichen ebenso. Der Bildsensor speichert die einfallende Lichtmenge in den drei Lichtfarben Blau, Grün und Rot, welche mehr oder weniger den satellitengestützten Kanälen

entsprechen, und er berechnet daraus ein für das menschliche Auge lesbares Bild. Phenophot hat zum Ziel, die Augenbeobachtungen der phänologischen Welt mit den Kanalwerten der Fernerkundung zu verknüpfen. Die Herausforderung besteht in der möglichst adäquaten Übersetzung von einer Sprache in die andere. Es wird also versucht, dem NDVI-Grünwert einen «Phänologischen Wachstumsindex PGI» (phenological growth index) zur Seite zu stellen – ausgehend von der Beobachtungssprache der Phänologie und berechnet mit den Kanalwerten der Digitalkamera. Damit können die bisherigen satellitengestützten Aussagen zur Vegetationsentwicklung (z. B. Stöckli & Vidale 2004, Studer et al 2007) mit Bodenbeobachtungen verknüpft werden.

Neben der technischen Herausforderung können insbesondere bei der Etablierung eines unabhängigen, objektiven und archivierbaren phänologischen Datensatzes grosse Fortschritte erzielt werden. Bisher sind alle phänologischen Daten schriftliche Beobachterdokumente, die rückwirkend nicht verifiziert werden können. Durch die Möglichkeit, wie mit einer Webcam regelmässig Bilder aufzunehmen, fallen die bisher häufig durch Interpolation ermittelten Eintrittstage bestimmter Phänophasen weg. Die Genauigkeit phänologischer Daten insbesondere bezüglich Aussagen zum Beginn, Verlauf und Ende der Vegetationsperiode nimmt zu.

Durch die hohe Aufnahmefrequenz kann die phänologische Entwicklung der Pflanzen verfolgt und mit biologisch relevanten Grössen wie beispielsweise dem Blattflächenindex verglichen werden. Abgeleitet von solchen Bildreihen sollen Modelle für die phänologische Entwicklung erarbeitet werden. Zusätzlich zu den allgemeinen Aussagen über die Bestände ist die Variabilität phänologischer Merkmale innerhalb von Populationen festgehalten.

Phenophot ist eingebettet in ein internationales Programm mit Partnern aus Europa, Amerika und Asien.

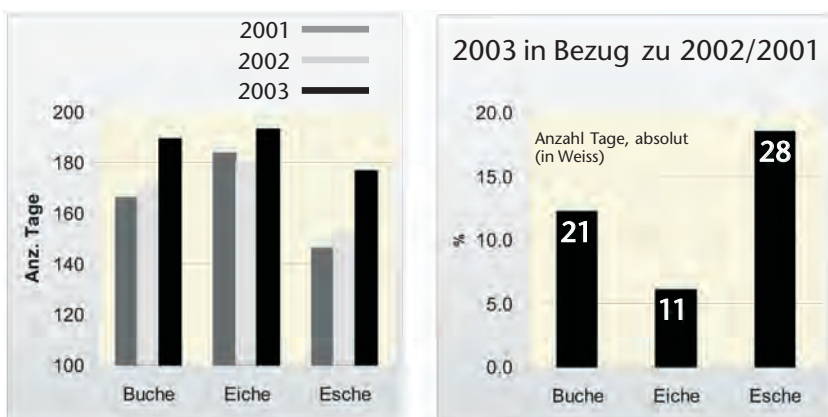


Abb 5 Vegetationsperiode Kaiseraugst. Die Vegetationsperiode beginnt mit dem 50%-Blattaustrieb und endet mit der 50%-Blattverfärbung (Median von je 10 Bäumen; *Fagus sylvatica* L., *Quercus cf. robur* L., *Fraxinus excelsior* L.).



Abb 6 Phenocam1 Lägern.

Die erste photophänologische Kamera ist installiert

Seit Herbst 2004 ist eine Kamera (Nikon Coolpix 5400, Phenocam1) auf der obersten Plattform auf 45 Meter über Grund am Nabel-Messturm (Nabel, Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe)⁸ von Empa und Bafu montiert. Die Station liegt mitten im Wald am südlichen Abhang der Lägern. Die Kamera überblickt den ganzen Hang nach Westen in Richtung Wettingen und Baden. Sie liefert täglich mehrere Bilder. Ein Bild vom Vortag kann dabei online betrachtet werden.⁹ Auf diesem Turm

8 <http://www.bafu.admin.ch/luft/index.html?lang=de> (24. März 2007)

9 <http://carboeurope.ethz.ch/sites/laegern/camera.html> (22. März 2007)

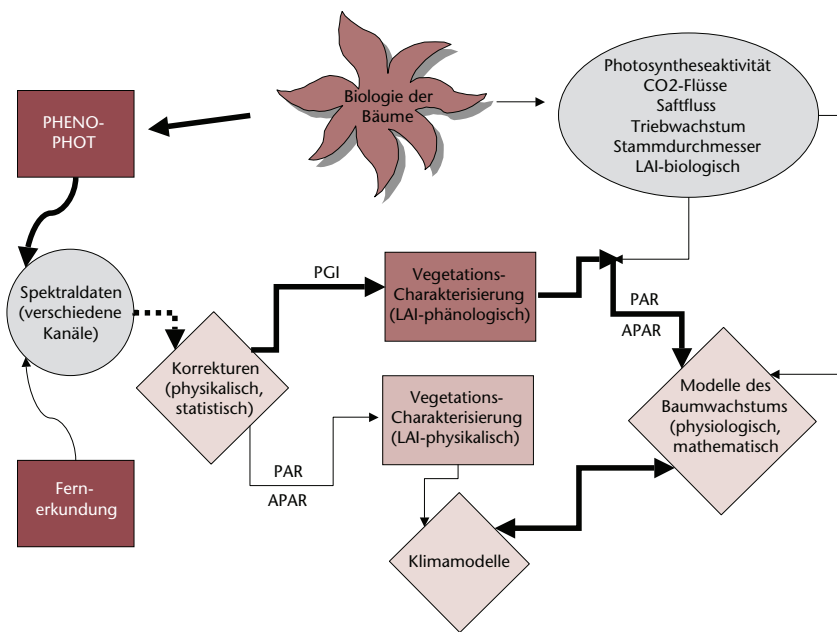


Abb 7 Verknüpfung verschiedener Datenquellen in Phenophot. PGI: Phänologischer Wachstumsindex; PAR: Photosynthetisch aktive Strahlung; APAR: Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung. Mit Pfeilen sind in der Abbildung die Prozesse dargestellt, die mit Phenophot neu abgedeckt werden.

werden auch der Staubbiederschlag und die meteorologischen Parameter erfasst.

Der Messturm ist Teil des Carboeurope Messnetzes,¹⁰ eines Forschungsverbunds, mit dem Ziel, den Einfluss des Treibhausgas CO₂ auf das Baumwachstum zu untersuchen und umgekehrt auch das Potenzial des Waldes, CO₂ zu binden und damit als Treibhausgas-Senke zu wirken. Dabei ergänzen sich meteorologische Datenerhebungen mit mikroklimatischen Studien.¹¹ Im Weiteren wird von der Gruppe Klimet der Universität Bern die Konzentration von Luftschadstoffen im Nebel und damit der Eintrag von Schadstoffen über den Stoffkreislauf der Blätter untersucht.¹² Die Gruppe Fernerkundung wiederum misst auf dem Turm atmosphärische Daten, die der Aerosolforschung dienen und unter anderem für eine verbesserte Satellitenbildkorrektur genutzt werden.¹³

Vegetationsindizes, Waldwachstum und CO₂

Der Messturm ist äusserst hilfreich, kann doch damit die Kette von den weit in die Vergangenheit reichenden Beobachtungsdaten bis zu den physikalischen Messungen von Strahlung und Gasen ge-

¹⁰ <http://www.carboeurope.org/> (22. März 2007)

¹¹ http://www.gl.ipw.agrl.ethz.ch/research/projects/carbo_europe (22. März 2007)

¹² http://www.geography.unibe.ch/lenya/giub/live/research/climatology_en.html (22. März 2007)

¹³ http://www.geography.unibe.ch/lenya/giub/live/research/remotesensing_en.html (22. März 2007)

schlossen werden. Es ist die Aufgabe von Phenophot, herauszufinden, welche Kanalinformationen mit welchen möglichen Korrekturen und welchen Kombinationen das beste Werkzeug für eine Kombination der Beobachtungsdaten und der physikalischen Messungen sein wird. Erste Versuche mit dem phänologischen Wachstumsindex, der vorerst den Grün- und Rotkanal der Kamera berücksichtigt, ergaben plausible Werte. Die Begrünung einzelner Baumkronen oder Kronenteile im Frühling und der Verlust des Blattgrüns mit der langsamen Farbverfärbung der Blätter in den Gelb- bzw. Rot- und Braunbereich kann mit dem PGI gut dargestellt werden.

Damit gelingt eine direkte Verbindung zum Wachstum von Einzelbäumen. So besteht die Möglichkeit, die rein physikalisch ermittelten Daten der Fernerkundung empirisch zu verifizieren und hinsichtlich Vegetationserkennung zu kalibrieren (Abbildung 7). Dies wiederum ermöglicht die Verbesserung sowohl der Modelle im Bereich der Vegetationsdynamik als auch im Bereich Klima, insbesondere dann, wenn es um Skalenbereiche geht, die bisher mit globalen Ansätzen auskommen mussten.

Satellitenphänologie 1982 bis 2002

Mit der Satellitentechnologie ist in den letzten Jahrzehnten eine neue Möglichkeit zur Beobachtung der Vegetationsentwicklung entstanden. Die traditionelle Beobachtung durch den Menschen und die moderne technologische Satellitenphänologie haben sehr unterschiedliche Ansätze mit verschiedenen Vor- und Nachteilen. Die traditionelle Phänologie ermöglicht lange Zeitreihen von Beobachtungen einzelner Arten, die Beobachtungen sind räumlich aber nicht optimal verteilt. Satellitenphänologie gewährleistet hingegen räumlich vollständige Angaben über die fotosynthetische Aktivität der Vegetationsdecke (Ricotta & Avena 2000, Schwartz et al 2002). Die Messungen können jedoch durch verschiedene Faktoren wie atmosphärische Störungen, Wolkendecken oder Dauer der Schneebedeckung gestört werden (Ricotta & Avena 2000, White et al 2005). Zudem sind solche Daten erst seit 1982 vorhanden. Da vom Satelliten die Entwicklung ganzer Pflanzengemeinschaften und nicht einzelne Arten erfasst werden, dürfte der Frühlingsindex, bestehend aus verschiedenen Pflanzenarten, für einen Vergleich der beiden Methoden sinnvoll sein (Rutishauser & Studer 2007, Studer et al 2007).

Zur Berechnung des Frühlingsanfangs aus Satellitendaten wurden verschiedene Methoden getestet. Für den Vergleich mit der traditionellen Phänologie hat sich eine auf einem Schwellenwert beruhende Methode als am besten geeignet erwiesen. Bei dieser Methode wird das Datum für den Früh-

lingsanfang beim Erreichen eines festgelegten Grünwertes der Erdoberfläche gesetzt (so genannter NOAA-AVHRR-NDVI-Wert, «Advanced Very High Resolution Radiometer», AVHRR – ein Fernerkundungssensor der US-amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, in Studer et al 2007).

Die Hauptmuster der zeitlichen und räumlichen Variabilität der beiden methodischen Ansätze wurden mit Hilfe von multivariater Hauptkomponentenanalyse verglichen (Rutishauser & Studer 2007, Studer et al 2007).

Der mit der Satellitenmethode ermittelte Frühlingsbeginn ergibt sowohl für den zeitlichen Verlauf (Abbildung 8) als auch für die räumliche Variabilität ein sehr ähnliches Bild wie der durch traditionelle Beobachtungen errechnete Frühlingsindex. Auch der Niveauwechsel um 1988 wird durch die Satellitendaten wiedergegeben. Die absoluten Trendwerte weisen hingegen beträchtliche Unterschiede auf. Der Trend für den Frühlingsindex (traditionelle Beobachtungen, Zeitraum 1982–2001) beträgt drei Tage pro Dekade, mit Hilfe von Satellitendaten erhält man Werte von 5.4 bis acht Tagen pro Dekade, je nach Definition des Frühlingsbeginns. Die relativen Trends hingegen (normalisiert durch die von Jahr zu Jahr unterschiedliche Variabilität) sind sehr konsistent und weisen einen Trend von rund einem Tag pro Dekade auf.

Auch die Auswertung der räumlichen Verteilung der Trends zeigt, dass die beiden Methoden dieselben Hauptmuster zeigen. Die im Beitrag Rutishauser und Studer beschriebene Höhenabhängigkeit sowie der Unterschied zwischen der Alpensüd- und der Alpennordseite sind auch in den von

Satellitendaten abgeleiteten phänologischen Parametern erkennbar. Die beiden Methoden sind also durchaus vergleichbar und können sich gegenseitig ergänzen.

Die gute Übereinstimmung der traditionellen beobachtenden Phänologie mit der modernen Satellitenphänologie sowohl in der zeitlichen Entwicklung als auch in der räumlichen Variabilität bestätigt die Resultate, die mit den beiden Methoden unabhängig voneinander gefunden wurden und zeigt, dass die beiden Methoden zusammengebracht und ergänzend eingesetzt werden können. ■

Literatur

- ACKERMAN PA, LÄNGIN DW, ANTONIDES MC, EDITORS (2006) Precision Forestry in plantations, semi-natural and natural forests. Stellenbosch: Stellenbosch Univ, Proc Int Precision For Symposium.
- BRÜGGER R, VASSELLA A (2003) Pflanzen im Wandel der Jahreszeiten. Anleitung für phänologische Beobachtungen; Les plantes au cours des saisons. Guide pour observations phénologiques. Bern: Geogr Inst Univ Bern, Geogr Bern. 287 p.
- GEBUREK T (2006) Klimawandel – Forstliche Maßnahmen aus genetischer Sicht. BFW-Praxisinformation 10: 12–14.
- JOLLY WM, DOBBERTIN M, ZIMMERMANN NE, REICHSTEIN M (2005) Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. Geophys Res Lett 32: L18409.
- KAUFMANN RK ET AL (2004) The effect of growing season and summer greenness on northern forests. Geophys Res Lett 31: L09205.
- KÖLLING C (2006) Waldbau im Klimawandel – Eine Herausforderung für die forstliche Standortserkundung. Forstinfo 3: 1–4.
- LEUZINGER S, ZOTZ G, ASSHOFF R, KÖRNER C (2005) Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. Tree Physiol 25: 641–650.
- MCCARTHY ET AL, EDITORS (2001) Climatic change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge: Cambridge Univ Press. 1032 p.
- MEIER U, EDITOR (1997) Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH-Monograph. Berlin: Blackwell. 662 p.
- MOORCROFT PR (2006) How close are we to a predictive science of the biosphere? Trends Ecol Evol 21: 400–407.
- MYNENI RB, RAMAKRISHNA R, NEMANI R, RUNNING SW (1997) Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. IEEE Trans Geosci Remote Sens 35: 1380–1393.
- NICOLUSSI K, PATZELT G (2006) Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze – aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit. BFW-Praxisinformation 10: 3–5.
- RICOTTA C, AVENA GC (2000) The remote sensing approach in broad-scale phenological studies. Appl Veg Sci 3: 117–122.
- ROOT TL ET AL (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature 421: 57–60.
- RUTISHAUSER T, STUDER S (2007) Klimawandel und der Einfluss auf die Frühlingsphänologie. Schweiz Z Forstwes 158: 105–111. doi:10.3188/szf.2007.0105

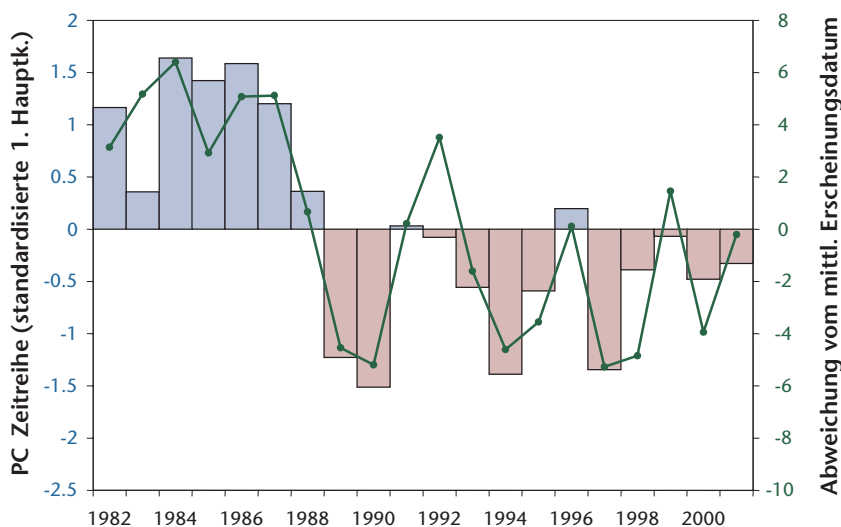


Abb 8 Zeitliche Entwicklung des Frühlingsindex auf Grund von Bodenbeobachtungen: Mittlerer phänologischer Frühlingsbeginn aller 69 phänologischer Stationen der Schweiz 1982–2001 (Balken) und des auf Satellitendaten beruhenden NDVI-Wertes (Linie). Rechte Skala: Abweichung vom mittleren Erscheinungsdatum in Tagen. Linke Skala: Standardisierte erste Hauptkomponenten-Zeitreihe.

- SCHWARTZ MD, REED B, WHITE MA (2002)** Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA. *Int J Climatol* 22: 1793–1805.
- SCHWARTZ MD, AHAS R, AASA A (2006)** Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Glob Chang Biol* 12: 343–351.
- STÖCKLI R, VIDALE PL (2004)** European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int J Remote Sens* 25: 3303–3330.
- STUDER S, APPENZELLER C, DEFILA C (2005)** Inter-annual variability and decadal trends in Alpine spring phenology: a multivariate analysis approach. *Clim Chang* 73: 395–414.
- STUDER S, STÖCKLI R, APPENZELLER C, VIDALE PL (2007)** A comparative study of satellite and ground-based phenology. *Int J Biometeorol*, in press. doi:10.1007/s00484-006-0080-5
- UNECE (2005)** The Condition of Forests in Europe. 2005 Executive Report. Hamburg: Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH). 33 p.
- VAN VLIET A et al (2003)** The European Phenology Network. *Int J Biometeorol* 47: 202–212.
- VASSELLA A (1997)** Phänologische Beobachtungen des Bernischen Forstdienstes von 1869 bis 1882. Witterungseinflüsse und Vergleich mit heutigen Beobachtungen. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umweltmaterialien 73: 9–75.
- VASSELLA A, BRÜGGER R (2001)** Impulsprojekt für das phänologische Monitoring im Wald und für den Einbezug in die Langfristige Waldökosystemforschung (LWF). Bern: Geogr Inst Univ Bern, 62 p.
- WHITE MA, HOFFMAN F, HARGROVE WW (2005)** A global framework for monitoring phenological responses to climate change. *Geophys Res Lett* 32: L04705. doi:10.1029/2004GL021961
- ZHANG Q ET AL (2006)** Characterization of seasonal variation of forest canopy in a temperate deciduous broadleaf forest, using daily MODIS data. *Remote Sens Environ* 105: 189–203.
- ZSCHOKKE A (1891)** Ergebnisse der Beobachtungen an den im Kanton Bern zu forstlichen Zwecken errichteten meteorologischen Stationen. *Mitt Schweiz Zentralanst forstl Versuchsw* 1: 157–190.

Die Vegetationsentwicklung – erfasst am Individuum und über den Raum

Die phänologische Entwicklung der Pflanzen gibt Auskunft über den Einfluss der Witterung auf die Vegetation und kann sowohl auf der Ebene des Einzelindividuums als auch global erhoben werden. Für Waldbäume besteht in der Schweiz seit 2000 ein phänologisches Beobachtungsnetz, das in Ergänzung der ICP-Forests-Erhebungen (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) die Saisonalität festhält. Ein Vergleich der Blattverfärbung am Standort Kaiseraugst hat gezeigt, dass Buchen, Eichen und Eschen durch die Sommertrockenheit im Jahre 2003 unterschiedlich beeinflusst wurden. Mit dem Forschungsprojekt Phenophot des Geografischen Instituts der Universität Bern entsteht seit 2004 ein digitaler Bildsatz, der es erlaubt, phänologische Beobachtungen objektiv und reproduzierbar zu machen. Aus den Rot-Grün-Blau-Kanaldaten des digitalen Sensors wird ein phänologischer Wachstumsindex (Phenological Growing Index, PGI) abgeleitet, der die Aussage satellitengestützter Vegetationsindizes wie des NDVI (Normalised Differenced Vegetation Index) auf Subpixelniveau ergänzen und damit eine Verbesserung der Aussagen bezüglich Anfang, Verlauf und Ende der Vegetationsperiode liefern kann. Ein erster Vergleich des phänologischen Frühlingsindex mit dem satellitengestützten NDVI hat gezeigt, dass der jährliche Frühlingsbeginn am besten mit der Festlegung eines NDVI-Grenzwertes nachvollzogen werden kann.

Le développement de la végétation – relevé sur l'individu et dans l'espace

Le développement phénologique des plantes fournit des informations au sujet de l'influence des conditions atmosphériques sur la végétation et peut être relevé aussi bien sur l'individu que globalement. Depuis l'an 2000, il existe en Suisse un réseau d'observation phénologique pour les arbres forestiers qui complète les relevés forestiers ICP (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) par l'enregistrement de la saisonnalité. Une comparaison de la coloration des feuilles sur la station de Kaiseraugst a montré que les hêtres, chênes et frênes ont été influencés différemment par la sécheresse estivale de 2003. Le projet de recherche Phenophot de l'Institut de géographie de l'Université de Berne rassemble depuis 2004 une collection d'images numériques qui permet de réaliser des observations phénologiques de manière objective et reproductible. Un indice de croissance phénologique (Phenological Growing Index, PGI) est déterminé sur la base des bandes rouge-vert-bleu du capteur numérique, qui complète au niveau subpixelaire les résultats des indices de végétation basés sur les relevés par satellite comme celui du NDVI (Normalised Differenced Vegetation Index) et permet donc une amélioration des interprétations concernant le début, le déroulement et la fin de la période de végétation. Une première comparaison de l'indice phénologique printanier avec le NDVI basé sur les relevés par satellite a montré que le début annuel du printemps peut être défini au mieux par un seuil NDVI.