

Analyse der räumlichen und zeitlichen Phänologie der Lärche (*Larix decidua*)

von Andreas Kollert, Martin Rutzinger und Magnus Bremer

1 Einleitung

Die Phänologie als Wissenschaftsdisziplin beschäftigt sich mit periodisch wiederkehrenden Phänomenen der Flora und Fauna, wie beispielsweise der Blattentfaltung, der Blüte oder des Blattfalls (Schönwiese 2008, Jeanneret et al. 2011). Langfristige phänologische Veränderungen sind Anzeichen für Änderungen des Klimas. Neben Änderungen der Lufttemperatur ist die Vegetation auch Veränderungen von Niederschlagsmustern und der Zusammensetzung der Atmosphäre ausgesetzt und passt sich den neuen Gegebenheiten an. Gebirgsflora ist insbesondere von diesen Faktoren betroffen, da die Möglichkeit der Pflanzen dort neue Standorte zu besiedeln begrenzt sind (Schönwiese 2008; IPCC 2014).

Larix decidua (Europäische Lärche) gehört zur Ordnung der Koniferen (Geburek 1994). Ihre Phänologie ist unter anderem durch den Laubabwurf gekennzeichnet. *L. decidua* ist in den Zentralalpen oftmals im Bereich der Baumgrenze zusammen mit der Zirbe (*Pinus cembra*) zu finden (Veit 2002). *Larix decidua* reagiert phänologisch auf Klimavariablen (z. B. Handa et al. 2006). In Zukunft könnte sich die Artenzusammensetzung an der Baumgrenze verändern (Körner 2009). Fernerkundungsmethoden ermöglichen es, die räumliche Ausprägung und phänologischen Charakteristika von *L. decidua* zu untersuchen. Dabei gilt es insbesondere Einflüsse der lokalen Topographie zu berücksichtigen. Die Phänologie als Wissenschaft umfasst eine Reihe von Methoden, wie sich wiederholende In-situ-Beobachtungen, über die Auswertung von historischen Quellen bis hin zur Interpretation von Fernerkundungsdaten (Schwartz 2003).



Die Autoren beschäftigen sich in ihren Forschungsarbeiten mit der automatisierten Informationsextraktion aus Fernerkundungsdaten für die Analyse von in erster Linie natürlichen Objekten und Oberflächen und deren zeitlichen Veränderungen. Die Ergebnisse liefern Grundlagen für Forschungsarbeiten in den Themenfeldern Geomorphologie, Vegetationsgeographie und Naturgefahrenforschung.

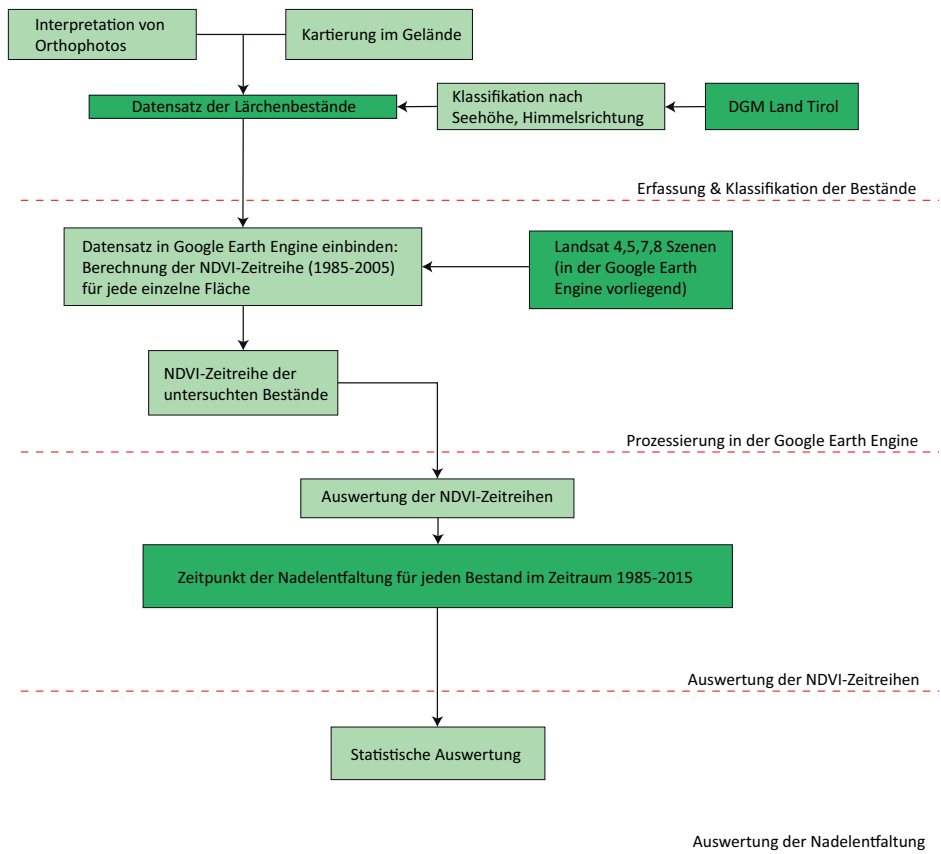
Untersuchungsgebiete im Gebirge sind oft zu Fuß schwer erreichbar, können jedoch mit Fernerkundungsansätzen flächenhaft beobachtet werden (Jeanneret 2011; Schwartz 2003). Der freie Zugang zu langen Zeitreihen von Satellitendaten wie zum Beispiel die des Landsat-Programms (Woodcock et al. 2008) mit einer mittleren räumlichen Auflösung von 30 m erlaubt die Untersuchung von zeitlichen und räumlichen phänologischen Mustern und deren Veränderungen. Untersuchungen von phänologischen Ausprägungen tragen zur Differenzierung zwischen lokalen topographischen und standortsbedingten Effekten und klimarelevanten Veränderungen bei.

In der vorliegenden Untersuchung wurden räumliche Charakteristika der Nadelentfaltung *L. deciduas* im Zeitraum von 1985–1990 und 2000–2015 anhand von multispektralen Satellitendaten untersucht. Dabei werden phänologische Phänomene mit einer räumlichen Ausdehnung von einigen 100 m detektiert. Diese wurden im Kontext der Seehöhe und Exposition analysiert. Zudem werden phänologische Phasen der Lufttemperatur verglichen. Das Ziel der Studie ist es, die räumliche und zeitliche Variabilität der Nadelentfaltung von *L. decidua* und deren Temperatursensitivität beispielhaft zu untersuchen. Der Zeitpunkt der Nadelentfaltung, in Tagen seit Jahresanfang des jeweiligen Jahres angegeben, wird von hier an als *Start of Season* (SOS) bezeichnet.

2 Forschungsstand

Um phänologische Beobachtungen in Gebirge besser zur Interpretation von Klimaänderungen heranziehen zu können, muss der Einfluss der Standortbedingungen wie zum Beispiel Seehöhe und Exposition näher untersucht werden.

Um die potentiellen Auswirkungen dieses Trends auf die Vegetation abschätzen zu können, besteht die Möglichkeit sogenannte „space-for-time/warming experiments“ (Körner 2003) durchzuführen. Dies wurde beispielsweise durch Moser et al. (2010) umgesetzt. Solche Experimente folgen dem Prinzip die Variable „Zeit“, welche im Kontext des Klimawandels z. B. für eine Variabilität der Temperatur über viele Jahre steht, durch die Variable „Raum“ zu ersetzen, die einen höhenbezogenen und damit räumlichen Gradienten der Temperatur darstellt. Veränderungen des SOS über die Jahre werden von einer Funktion der Zeit bzw. Temperatur in eine Funktion des Raums bzw. der Seehöhe oder Temperatur überführt (Körner 2003). Moser et al. (2010) realisieren dies, indem sie Temperaturlogger an den Standorten der phänologischen Beobachtungen von *L. decidua* platzieren. Dies erlaubt eine hohe Genauigkeit bei der räumlichen Zuordnung von Beobachtungsobjekt und Messwert. Da Moser et al. (2010) dieselbe Spezies in einer ähnlichen alpinen Umgebung untersuchen und dabei die Effekte von Exposition und Seehöhe unter Einbeziehung exakter Temperaturmessungen analysieren, dient ihre Studie als ideale Vergleichsbasis zur Arbeit im vorliegenden Artikel. Für den SOS von *L. decidua* stellen Moser et al. (2010) eine Verzögerung von 3,6 Tagen/100 m mit zunehmender Seehöhe fest, welche auf Basis ihrer Messungen mit Temperaturloggern einer Verfrühung von 7,2 Tagen/1°C mit steigender Temperatur entspricht.



Legende



Abb. 1: Arbeitsablauf zur phänologischen Interpretation von *Larix decidua* durch Bestimmung des Zeitpunkts der Nadelentfaltung auf Basis von NDVI-Zeitreihen aus Landsat 8-Szenen. Kollert 2017

Die Auswertung von historischen Aufzeichnungen der Lufttemperatur und phänologischen Beobachtungen stellt einen weiteren Zugang dar, um die Beziehung von Klima und Phänologie zu untersuchen. Menzel et al. (2005) ziehen Temperaturaufzeichnungen des gesamten 20. Jahrhunderts heran, um den Blütezeitpunkt dreier Arten innerhalb Deutschlands zu untersuchen. Obwohl *L. decidua* nicht Teil dieser Studie ist, liefern sie einen Überblick der Bandbreite der Temperaturabhängigkeit phänologischer Ereignisse. Für den Beginn der Blüte stellen Menzel et al. (2005) Werte einer Verfrüherung von 2,6 bis 6,9 Tagen für einen Temperaturanstieg (Mittelwert März und April) von 1 °C im Untersuchungszeitraum 1900–2000 fest.

Busetto et al. (2010) untersuchen die Phänologie von *L. decidua* anhand von *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* Zeitreihen, die aus Daten des *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)* abgeleitet wurden. Mit Ausnahme der größeren räumlichen Auflösung stellt dies einen ähnlichen Ansatz im Vergleich mit der vorliegenden Studie dar. Für die Blüte und die Nadelentfaltung (Nadeln < 1 cm Länge) stellten sie eine Verfrühung von 7,3 Tagen für einen Temperaturanstieg (Mittelwert März–Mai) von 1 °C im Zeitraum 2000 bis 2007 fest.

Moser et al. (2010) und Migliavacca et al. (2008) stellten fest, dass die Nadelentfaltung und das Zellwachstum von *L. decidua* stark durch die Seehöhe und Temperatur beeinflusst sind. Die Seehöhe erklärt zwar teilweise auch das Ende der Wachstumsphase, allerdings ist diese auch durch die tägliche Belichtungszeit („Photoperiode“) und mikroklimate Effekte beeinflusst (Migliavacca et al. 2008; Moser et al. 2010). Daher wird in der vorliegenden Studie nur der SOS von *L. decidua* untersucht.

3 Methodik und Daten

Abbildung 1 zeigt den vereinfachten Arbeitsablauf inklusive der wichtigsten Abschnitte und Daten. In Kurzform sind die Schritte von der Erfassung der untersuchten *L. decidua*-Bestände bis hin zur statistischen Auswertung des SOS jedes Bestands

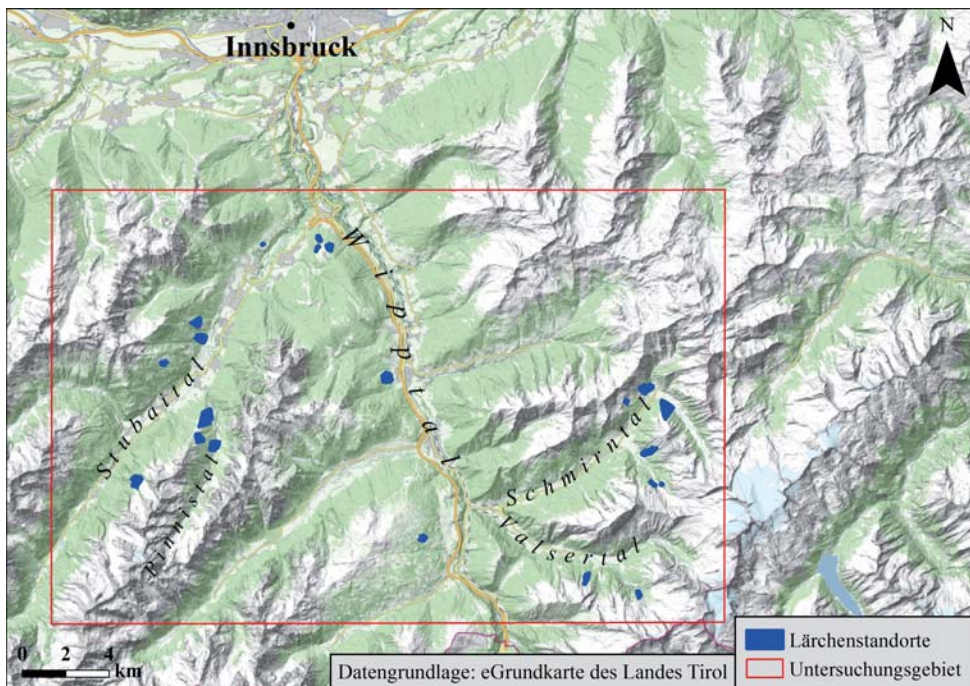


Abb. 2: Darstellung der erfassten und überprüften Lärchenbestände im Untersuchungsgebiet.

dargestellt. Im Folgenden wird jeder einzelne Arbeitsschritt, welcher in Abb. 1 durch eine horizontale rote Linie abgegrenzt ist, genauer erläutert.

3.1 Untersuchungsgebiet und Bestände

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Tirol und umfasst Flächen in den Zillertaler und Stubai Alpen innerhalb von 47° 12′ 06″ N – 11° 14′ 37″ O und 47° 00′ 42″ N – 11° 38′ 45″ O (s. Abb. 2).

3.1.1 Auswahl der *L. decidua*-Bestände

L. decidua-Bestände wurden durch die visuelle Interpretation von Orthophotos aus dem Jahr 2016 mit einer Auflösung von 0,5 m (Abteilung für Geoinformation, Land Tirol) erfasst. Zusätzlich wurde eine Referenzfläche im Pinnistal (Tirol) verwendet (Rutzinger et al. 2015). Um Mischbestände auszuschließen, wurden die erfassten Flächen im Gelände überprüft. Der daraus entstandene Datensatz enthält reine *L. decidua* Bestände, die sich über eine Höhe von 1000 m bis 2100 m ü. M. und alle Himmelsrichtungen erstrecken (Abb. 3).

3.1.2 Topographische Charakterisierung der Bestände

Auf Basis eines digitalen Geländemodells mit einer Auflösung von 10 m (Abteilung Geoinformation Land Tirol, 2016) wurden die erfassten Bestände in Klassen unterteilt, die jeweils 100 Höhenmeter umfassen. Die Daten wurden von Beständen kleiner eines Landsat Pixels (900 m²) bereinigt. Den restlichen 55 Beständen wurden jeweils die vorherrschende Himmelsrichtung zugewiesen. Die Klassifikation nach der Himmelsrichtung ergibt dabei eine unausgeglichene Verteilung mit einem Maximum im nördlichen

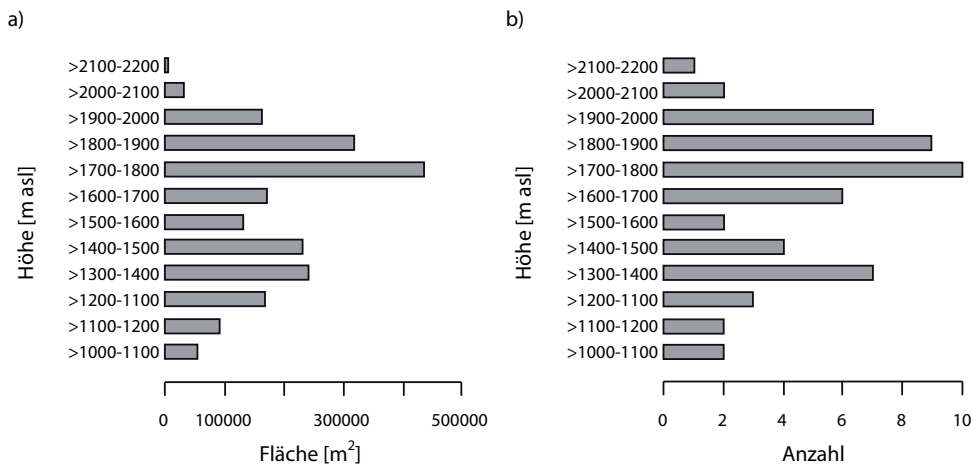


Abb. 3: Verteilung der untersuchten *L. decidua*- Bestände, aufgetragen nach der Fläche aller Bestände pro 100 m Höhenintervall (a), sowie nach der Anzahl von zusammenhängenden Beständen bzw. Flächen pro 100 m Höhenintervall (b).

Sektor. Ausgenommen eines Bestands über 2000 m ü. M. enthält jede der Höhenklassen mindestens zwei Bestände (s. Abb. 3). Um Einflüsse anderer Arten zu vermeiden (Mixed-Pixel Effekt), wurden nur reine *L. decidua* Bestände untersucht. Zur Charakterisierung des Zusammenhangs zwischen Seehöhe und SOS wurde hierbei die mittlere Höhe jedes Bestands herangezogen. Das Vorgehen zur Erfassung des Zusammenhangs zwischen Himmelsrichtung und SOS erfolgte analog dazu.

3.2 Landsat-Zeitreihe und Google Earth Engine

Um die Auswirkungen der Topographie auf die Phänologie der ausgewählten Bestände zu untersuchen, wurden multispektrale Satellitenbilder herangezogen. Der Zugriff auf die Zeitreihen der LS 4,5 (Thematic Mapper; TM), LS 7 (Enhanced Thematic Mapper+; ETM+) und LS 8 (Operational Land Imager; OLI) Missionen erfolgte über die *Google Earth Engine (GEE)* (Google Earth Engine Team 2015). Für jeden verfügbaren Aufnahmezeitpunkt im Untersuchungszeitraum wurde der NDVI aus den jeweiligen Werten des Bandes im roten Wellenlängenbereich (*ROT*) und des Bandes im nahen Infrarot (*NIR*) berechnet (Rouse et al. 1974):

$$NDVI = \frac{(NIR - ROT)}{(NIR + ROT)}$$

Die verwendeten Landsat-Szenen haben eine räumliche Auflösung von 30 m und besitzen mit Ausnahme von LS 8 (OLI) Band 5 eine ähnliche spektrale Auflösung (vgl. Abb. 4). Im Vergleich zu den älteren Missionen ist das schmalere Band von LS 8 (OLI) im Bereich des nahen Infrarots potentiell weniger durch atmosphärischen Wasserdampf beeinflusst. Dies stellt ein Problem bei der Kombination mit LS 7 (ETM+) Produkten dar. Die zeitliche Auflösung der einzelnen LS Missionen beträgt 16 Tage. Die Kombination von LS 7 und 8 Zeitreihen erhöht sie auf 8 Tage. Durch die Verwendung von LS *Surface Reflectance*-Produkten spielt der Unterschied in der spektralen Auflösung keine signifikante Rolle (Ke et al. 2015). Zum Zeitpunkt der Studie fehlten im Archiv der GEE nahezu alle Aufnahmen aus den Jahren 1990 bis 2000. Daher wurde diese Periode von den Untersuchungen ausgenommen.

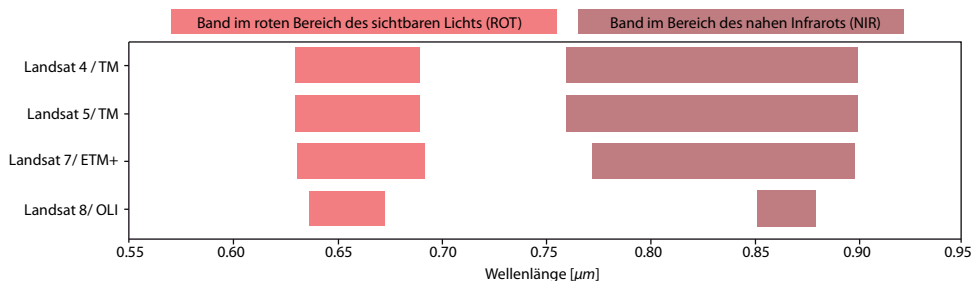


Abb. 4: Alle Bänder des roten und nahen infraroten Wellenlängenbereichs der Landsat-Sensoren, welche für den NDVI benötigt werden. Nach Zanter (2016) und National Aeronautics and Space Administration (2016).

Der gesamte *L. decidua* Datensatz wurde über Google Fusion Tables in die GEE integriert (Google Earth Engine Team 2015). Der NDVI wurde für alle verfügbaren LS 4 bis 8 *Surface Reflectance*-Produkte berechnet. Die daraus entstandenen Szenen wurden zu einer Zeitreihe zusammengefügt (Die bereits in der GEE vorliegenden NDVI-Szenen wurden nicht verwendet, da diese aus Top-of-Atmosphere Reflektanzen berechnet sind und daher die bereits beschriebenen Nachteile bei der Kombination von LS 7 und 8 Szenen mit sich bringen (Ke et al. 2015)). Für jeden Bestand wurde der NDVI als ungewichtetes Mittel der ihn zu mindestens 50 % überlappenden Pixel berechnet.

3.3 Erfassung der Nadelentfaltung

Der SOS wurde in der vorliegenden Arbeit anhand eines globalen Schwellenwerts (NDVI > 0,3) erkannt. Im Gegensatz zu Ansätzen, die den Schwellenwert an die saisonale Amplitude oder Ableitungen der Kurve binden, wird hierbei ein Schwellenwert für die gesamte Zeitreihe festgelegt (Reed et al. 2003). Obwohl andere Ansätze möglicherweise eine genauere zeitliche Detektion des SOS erlauben (Zhu et al. 2012), wird



Abb. 5: Früher Zeitpunkt der Nadelentfaltung von *L. decidua* im Vergleich zur Definition der ZAMG (2016). Kollert 2016

der gewählte Ansatz als ausreichend eingeschätzt, da nur eine Art untersucht wird (Reed et al. 2003). Der Schwellenwert wurde anhand von in-situ Beobachtungen der PhenoWatch-Datenbank kalibriert, um der Definition der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für die Nadelentfaltung (SOS) von *L. decidua* zu entsprechen. Gemäß dieser Definition ist die Nadelentfaltung (SOS) erreicht, wenn die Blätter (Nadeln) an drei Stellen eines Baums voll entwickelt sind, dabei aber noch nicht ihre endgültige Länge erreicht haben (ZAMG 2016). Abbildung 5 zeigt einen Zustand vor diesem Zeitpunkt.

3.4 Variabilität und Temperatursensitivität der Nadelentfaltung

Die Temperaturzeitreihen zur Regressionsanalyse mit dem SOS stammen aus dem Historical Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region (HISTALP) Projekt (Auer et al. 2007). Die Temperaturaufzeichnungen der verwendeten Station Universität Innsbruck („Innsbruck-Universität [INN]“; 47° 15′ 40“ N – 11° 23′ 06“ O) enthalten monatliche, dreimonatliche und jährliche Lufttemperaturen mit einer Genauigkeit von einem Zehntel °C. Die Station befindet sich auf einer Höhe von 609 m ü. M. und liegt demnach nicht innerhalb des Höhenbereichs der Lärchenbestände. Dieser Umstand wurde jedoch in dieser Studie vernachlässigt und eine ähnliche Variabilität

der Lufttemperatur angenommen: Aufgrund fehlender lokaler Temperaturdaten, konnte nicht untersucht werden, ob die Variabilität der Lufttemperatur im Bereich der Lärchenbestände von derer der Station Innsbruck-Universität abweicht.

Auf Basis der Stationsdaten wurde der Mittelwert für den Zeitraum von Januar bis April berechnet, um die Korrelation mit verschiedenen Perioden zu untersuchen. Es wurde die Korrelation des SOS mit der mittleren Lufttemperatur der Zeiträume Januar–April, März–Mai und dem jährlichen Mittelwert untersucht. Dabei wurde für jedes Jahr der mittlere Zeitpunkt der Nadelentfaltung aller Bestände herangezogen.

Anhand der topographischen Einordnung der einzelnen Bestände des *L. decidua* Datensatzes (Abschnitt 3.1.2), lässt sich der Zusammenhang von Seehöhe, Himmelsrichtung und SOS analysieren. Da die Abhängigkeit dieser Parameter für jedes Jahr der Zeitreihe berechnet werden kann, ist es ebenfalls möglich zu untersuchen, ob sich in Abhängigkeit von der Seehöhe unterschiedliche Dynamiken des SOS feststellen lassen. Die Verteilung der mittleren Zeitpunkte des SOS jedes Bestandes wurde in einer linearen Regression durch die Seehöhe als erklärende Variable beschrieben. Der Gradient des SOS in Abhängigkeit von der Seehöhe entspricht dem Regressionskoeffizienten. Die Dynamik des SOS („wie viele Tage pro Jahr sich der SOS verschiebt“) wurde für jeden Bestand ebenfalls durch eine lineare Regression festgestellt. Dabei wurde die Zeit (Jahre) als erklärende Variable genutzt. Der Regressionskoeffizient beschreibt dabei, wie viele Tage pro Zeiteinheit (z. B. ein Jahr) sich der SOS verschiebt. Je höher der Betrag dieser Änderungsrate ausfällt, desto schneller verfrüht oder verspätet sich der SOS. Wäre die Änderungsrate null, fände keine Veränderung statt. Anhand des

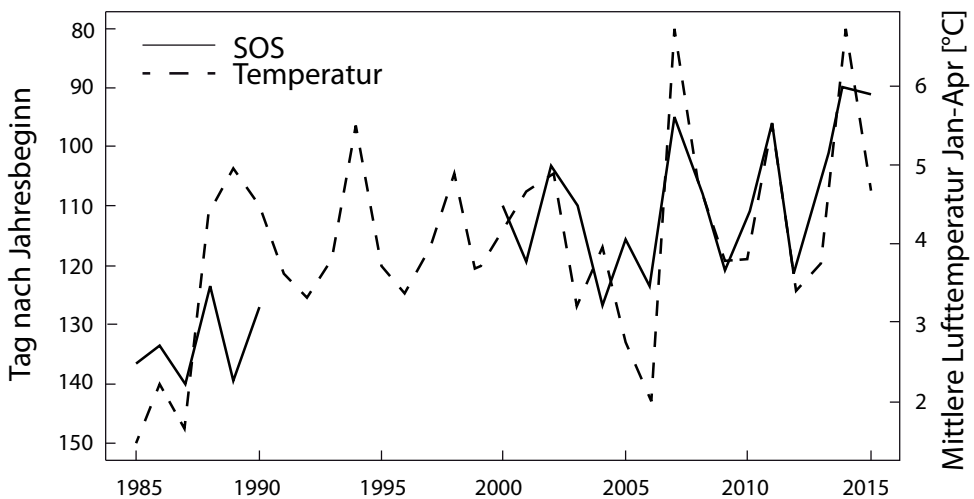


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf von Nadelentfaltung (SOS) und mittlerer Lufttemperatur der Monate Januar–April (Station Innsbruck-Universität). Datengrundlage HISTALP-Projekt, Auer et al. 2007.

parameterfreien Kruskal-Wallis-Tests wurde zudem untersucht, ob die Himmelsrichtung einen signifikanten Einfluss aufweist.

4 Ergebnisse

Über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigt sich ein Trend zur Verfrühung des SOS von *L. decidua* (Abb. 6). Im Mittel rückt der SOS um 1,39 Tage/Jahr näher in Richtung Jahresanfang. Aufgrund der Datenlücke in den 1990er Jahren kann der Wert jedoch nur als Hinweis für einen allgemeinen Trend gesehen werden.

Die lineare Regression des SOS mit der mittleren Lufttemperatur für die Zeiträume Januar–April, März–Mai und dem jährlichen Mittelwert ergibt Korrelationskoeffizienten zwischen 0,6 und 0,9. Die temperaturbezogenen Gradienten für die Verfrühung des SOS betragen 7,37 Tage/°C (9,27 Tage/°C, 18,40 Tage/°C) in Abhängigkeit der mittleren Lufttemperatur von Januar–April (März–Mai, jährlicher Mittelwert). Die linearen Modelle sind jeweils mit $p < 0.001$ (0.0015, 0.001) statistisch signifikant.

Abb. 7 zeigt die räumlichen Muster des mittleren Zeitpunkts des SOS für alle *L. decidua*-Bestände im Untersuchungszeitraum. Es zeigt sich ein verspätetes Eintreten

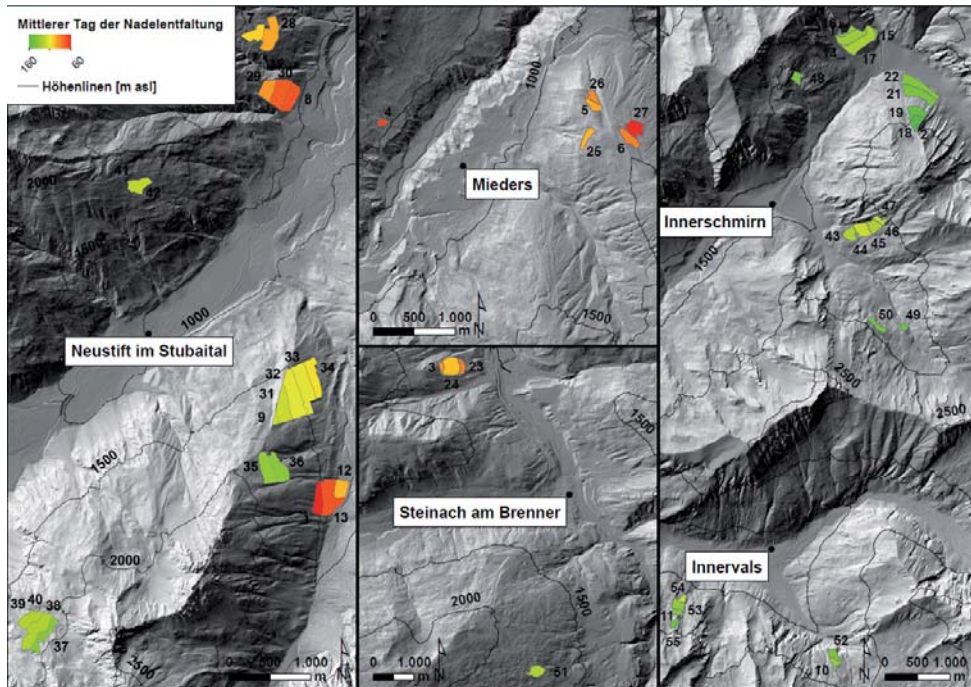


Abb. 7: Räumliche Ausprägung der Nadelentfaltung im gesamten Untersuchungsgebiet für jeden erfassten Bestand.

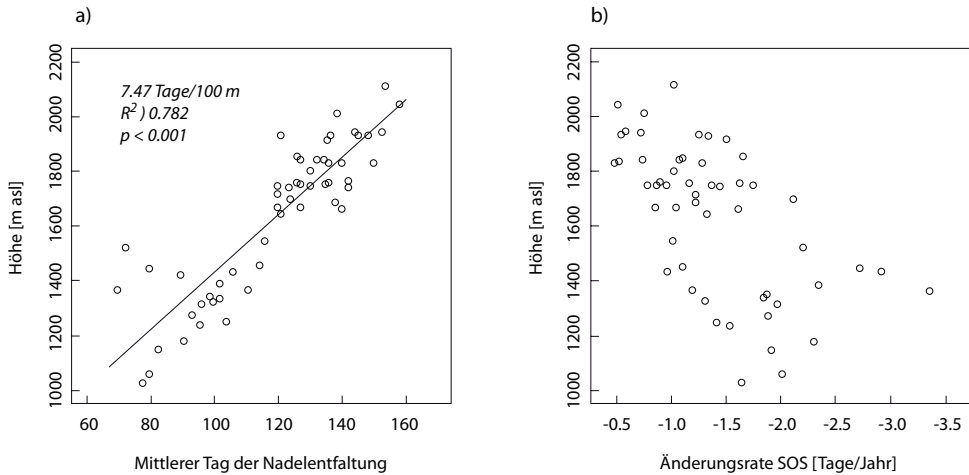


Abb. 8: Zusammenhang der Seehöhe und des mittleren Zeitpunkts des SOS jedes Bestands (a) und Dynamik des SOS für jeden Bestand im gesamten Untersuchungszeitraum (b).

des SOS mit zunehmender Höhe. Die Beziehung zwischen der mittleren Seehöhe und dem mittleren Eintrittszeitpunkt des SOS jedes Bestands ergibt einen Gradienten von 7,47 Tage/100 m ($p < 0.001$; Abb. 8a). Die spätesten Eintrittszeitpunkte finden sich in nördlich ausgerichteten Flächen auf rund 2000 m ü. M. (Abb. 7, Bestände 18/19/21/22). Unterhalb von 1500 m ü. M wird der SOS immer vor dem 120. Tag des Jahres erreicht. Ein Einfluss der Himmelsrichtung auf den SOS lässt sich hingegen nicht nachweisen.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet ergeben sich Änderungsraten des SOS von rund 0,5 bis zu 3 Tagen pro Jahr für verschiedene Bestände in Abhängigkeit von der Höhe (Abb. 8b). Bestände, welche auf einer niedrigeren Seehöhe liegen, weisen ein schnelleres Voranschreiten des SOS auf und umgekehrt. Gleichzeitig steigt die Variabilität des SOS mit abnehmender Seehöhe.

5 Diskussion

Die Regressionsanalyse zeigt, dass die Gradienten des SOS stark vom Zeitraum (bzw. dessen Mitteltemperatur) abhängen, der als erklärende Variable gewählt wird. Die lineare Regression durch die jährliche Mitteltemperatur ergibt einen Gradienten von 18,4 Tage/°C und weicht damit stark von bekannten Werten ab (vgl. Busetto et al. 2010, Moser et al. 2010). Dies lässt darauf schließen, dass die jährliche Mitteltemperatur schlecht geeignet ist, um den SOS zu beschreiben. Dieser Befund steht im Einklang mit Körner (2003), der die mittlere jährliche Lufttemperatur als zu stark vom Grad der Kontinentalität und der Ruhephase im Winter geprägt ansieht. Die in dieser Studie verwendete Periode März–Mai scheint im Vergleich zur mittleren jährliche Lufttemperatur besser geeignet, ergibt allerdings einen höheren Gradienten

(9,27 Tage/°C) im Vergleich zum Wert der von uns herangezogenen Referenzstudie von Busetto et al. (2010) für dieselbe Periode (7,30 Tage/°C). Aufgrund der Tatsache, dass wir eine frühe Phase der Nadelentfaltung erfassen und diese je nach Zeitpunkt des SOS auch von der Temperatur der vorhergehenden Monate geprägt ist, ergibt die mittlere Lufttemperatur von Januar–April einen Gradienten (7,37 Tage/°C), der am besten mit dem von Busetto et al. (2010) angegebenen Wert übereinstimmt. Für einen 40-jährigen Untersuchungszeitraum (1962–2002) erhalten Köstner et al. (2005) Werte um 5 Tage/°C für den Beginn der Nadelentfaltung von *L. decidua* in Abhängigkeit der mittleren Temperatur von März und April. Dabei ist zu beachten, dass die Länge des Untersuchungszeitraums die Gradienten des SOS beeinflussen kann.

Menzel et al. (2005) zeigen, dass der Unterschied zwischen der Verwendung einer nationalen Mitteltemperatur und Temperaturaufzeichnungen nahe den phänologischen Beobachtungen gering ist. Es ist unklar, ob dies auch für das alpine Untersuchungsgebiet der vorgestellten Studie gilt, da sich die Untersuchung von Menzel et al. (2005) auf verschiedene Standorte in ganz Deutschland bezieht und die direkte Übertragung der Erkenntnisse von Menzel et al. (2005) auf den Alpenraum daher zu hinterfragen ist. Der limitierende Aspekt hierbei ist jedoch die Verfügbarkeit von langen und kontinuierlichen Temperaturaufzeichnungen in der näheren Umgebung der Beobachtungen.

Idealerweise sollten Werte aus verschiedenen Studien das Verhalten der Vegetation in Abhängigkeit vom Klima widerspiegeln. Es zeigt sich jedoch, dass die Werte sowohl von der Länge des Untersuchungszeitraums abhängen, welcher oftmals von einigen Jahren bis hin zu einigen Dekaden reicht, als auch von der Periode eines Jahres, die als erklärende Variable genutzt wird und von der Mitteltemperatur eines Monats bis hin zu mehreren Monaten schwankt. Zudem ist die Repräsentativität der verwendeten Temperaturaufzeichnungen (s. Diskussion im vorherigen Absatz) zu beachten. Hierbei reichen die Anwendungen von Temperaturaufzeichnungen am Untersuchungsobjekt bzw. einzelnen Baum (z. B. Moser et al 2010) bis zur Verwendung von Stationsdaten, die einige zehn Kilometer vom Untersuchungsobjekt entfernt sind (z. B. vorliegende Studie, teilw. Menzel et al. 2005).

Im Gegensatz zur Seehöhe kann kein statistisch signifikanter Einfluss der Exposition auf den SOS nachgewiesen werden. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Moser et al. (2010), welche ebenfalls den Einfluss der Himmelsrichtung untersuchten und keinen statistisch signifikanten Unterschied feststellen konnten. Problematisch sind hierbei jedoch die geringe Größe der Stichprobe und die inhomogene Verteilung der Bestände auf die Sektoren in der vorliegenden Studie, welche die Aussagekraft dieses Aspekts mindern.

Der SOS von *L. decidua* verzögert sich um 7,47 Tage/100 m mit zunehmender Höhe (s. Abb. 8a). Dieser Wert liegt deutlich über vergleichbaren Werten. Der Vergleich mit Studien von Moser et al. (2010) (3,6 Tage/100 m) und Migliavacca et al. (2008) (3,7 Tage/100 m), für Gebiete in den Italienischen und Schweizer Alpen, ist durch die

Eigenschaften der verschiedenen Untersuchungsgebiete jedoch ebenfalls schwierig. Die Untersuchungen von Moser et al. (2010) und Migliavacca et al. (2008) beziehen sich auf Bestände, die zwischen 1300 m und 2150 m ü. M liegen. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf Bestände ab 1000 m ü. M. und nur wenigen Beständen oberhalb von 2000 m ü. M. Es ist unklar, ob die unterschiedlichen Höhenbereiche die Werte stark beeinflussen. Basierend auf Friedl (1967) stellt Körner (2012) zudem fest, dass der Zeitpunkt des SOS von *L. decidua* kein lineares Verhalten in Abhängigkeit von der Seehöhe aufweist. Diese Tatsache beeinflusst ebenfalls die Werte, wenn ein lineares Modell verwendet wird. Außerdem sind die Bestände der vorliegenden Arbeit nicht homogen über den gesamten Bereich der Seehöhe verteilt. Im Gegensatz zu den temperaturabhängigen Gradienten des SOS unterscheiden sich die höhenabhängigen Gradienten des SOS von Werten ähnlicher Untersuchungen, was vermutlich an den beschriebenen Unsicherheiten liegt.

Es zeigt sich, dass sich der SOS für niedrigere Bestände schneller Richtung Jahresbeginn verlagert (Abb. 8b). Dies könnte ein Hinweis sein, dass niedriger gelegene Bestände stärker auf einen Anstieg der Lufttemperatur reagieren (Abb. 8b). Diese Überlegung lässt sich jedoch nicht belegen, da keine Informationen über die Variabilität der Temperatur mit der Seehöhe vorliegen und auch keine weiteren Variablen berücksichtigt wurden. Die Änderungsrate des SOS bewegt sich zwischen 0,5 und 3 Tage/Jahr in Abhängigkeit zur Seehöhe. Eine Veränderung des SOS von 3 Tage/Jahr für *L. decidua* erscheint bei einem Vergleich mit dem in Kolodziej (2007) vorgefundenen Wertebereich außergewöhnlich schnell. Kolodziej (2007) untersucht verschiedene Arten und verschiedene phänologische Phasen für den Raum Deutschland und erhält dabei den höchsten Wert für die Blüte von *Salix caprea* mit 0,46 Tagen/Jahr. Die Unterschiede in der Länge des Untersuchungszeitraums, den klimatischen Bedingungen während des Untersuchungszeitraums und der Datenlücke von 1990 bis 2000 erlauben keinen Vergleich absoluter Werte der vorliegenden Arbeit mit anderen Studien. Abb. 8b zeigt zudem, dass die Variabilität innerhalb einer ähnlichen Seehöhe oftmals erheblich ist. Dies zeigt, dass der SOS auch durch eine Reihe von anderen Faktoren beeinflusst sein muss. Bei der Beurteilung der Änderungsrate ist zu beachten, dass ein Einfluss der Datenlücke in den Jahren 1990–2000 gegeben ist. Der Vergleich mit den Werten Kolodziejs (2007) deutet darauf hin, dass die Datenlücke von 1990–2000 in der vorliegenden Studie zu einer Überschätzung der Änderungsraten führt.

In der vorliegenden Studie fehlt eine Validierung des mittels Fernerkundung ermittelten Zeitpunkts des SOS. Die Kalibrierung des Schwellenwerts zur Bestimmung des SOS wurde anhand von einer einzigen phänologischen Beobachtungsstation mit lückenhaften phänologischen Aufzeichnungen durchgeführt, welche sich neben einem untersuchten Bestand befindet. Um eine sinnvolle Validierung durchführen zu können, wäre eine größere Anzahl solcher Beobachtungen in den untersuchten Gebieten notwendig. Der lange Untersuchungszeitraum dieser Studie und die Eigenschaften des

Untersuchungsgebiets mit seiner Lage im Gebirge stellen große Anforderung an die Planung zur Aufnahme von repräsentativen Referenzdaten.

6 Schlussfolgerung

Mittels Satellitenfernerkundung (Landsat-Zeitreihen) können kleinräumige phänologische Phänomene, wie z. B. höhen- und temperaturabhängige Gradienten der Nadelentfaltung einer einzelnen Art erfasst werden. Dies wurde exemplarisch für die Europäische Lärche (*Larix decidua*) in Tirol durchgeführt. Durch Anpassungen lässt sich die Vorgehensweise auch auf weitere Arten und Untersuchungsgebiete übertragen. Dabei ist zunächst eine zeitliche Auflösung der Satellitendaten von 16 Tagen ausreichend, um phänologische Phänomene zu beschreiben (Nijland et al. 2016). In Zukunft können durch die Kombination von Landsat 7/8 (ETM+/OLI) und Sentinel 2A/2B (MSI) Satelliten durch eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung noch genauere Ergebnisse erzielt werden. Dies leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis von regionalen phänologischen Vorgängen auch in Gebirgsräumen.

7 Literatur

- Abteilung Geoinformation Land Tirol. 2016. Tiroler Rauminformationssystem. <https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/tiris>; Zugriff: 26. August 2016.
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M et al. 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27:17–46.
- Busetto L, Colombo R, Migliavacca M, Cremonese E, Meroni M, Galvagno M, Rossini M, Siniscalco C, Morra Di Cella U, Pari E. 2010. Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Global Change Biology* 16: 2504–2517.
- Friedl H 1967. Der Verlauf der alpinen Waldgrenze im Rahmen anliegender Gebirgsgelände. *Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien* 75:81–172.
- Geburek T 2014: *Larix decidua*. In: Roloff A, Schütt P, Weisgerber H, Lang UM, Stimm B (Hrsg.). *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie*. Landsberg am Lech, Germany: Wiley-VCH Verlag.
- Google Earth Engine Team 2015. Google Earth Engine: A planetary-scale geo-spatial analysis platform. <https://earthengine.google.com>; Zugriff 26. August 2016.
- Handa IT, Körner C, Hättenschwiler S. 2006. Conifer stem growth at the altitudinal treeline in response to four years of CO₂ enrichment. *Global Change Biology* 12:2417–2430.
- IPCC 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri RK und Meyer LA (Hrsg.). Genf, Schweiz: IPCC, pp 1–151.
- Jeanneret F, Rutishauser T, Brügger R. 2011. *Phänologie und Saisonalität: Geschichte, Monitoring, Raumsprache*. Bern, Schweiz: Geographisches Institut der Universität Bern (Geographica Bernensia U).
- Ke Y, Im J, Lee J, Gong H, Ryu Y. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment* 164:298–313.
- Kolodziej A. 2007. *Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Auswirkungen auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen*. Offenbach am Main, Deutschland: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes).
- Körner C. 2003. *Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Berlin, Deutschland: Springer Berlin.
- Körner C. 2007. The use of ‘altitude’ in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* 22(11):569–574.

- Körner C. 2009. Mountain Vegetation under Environmental Change. In: Borsdorf A, Jandl R, Miegroet H, Lackner R, Psenner R (Hrsg.) *Global change and sustainable Development in Mountain Regions*: Innsbruck, Österreich: Innsbruck University Press (Alpine space--man & environment), pp 25–30.
- Körner C. 2012. *Alpine Treelines Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*. Basel, Schweiz: Springer.
- Köstner B, Niemand C, Prasse H. 2005. A 40-year study period of tree phenology at tharandt international phenological garden. *Arboreta Phaenologica* 48:19–23.
- Menzel A, Coops NC, Testka A. 2005. Temperature response rates from long-term phenological records. *Climate Research* 30:21–28.
- Migliavacca M, Cremonese E, Colombo R, Busetto L, Galvagno M, Ganis L, Meroni M, Pari E, Rossini M, Siniscalco C, Mora di Cella U. 2008. European larch phenology in the Alps: can we grasp the role of ecological factors by combining field observations and inverse modelling? *International Journal of Biometeorology* 52:587–605.
- Moser L, Fonti P, Buntgen U, Esper J, Luterbacher J, Franzen J, Frank D. 2010. Timing and duration of European larch growing season along altitudinal gradients in the Swiss Alps. *Tree Physiology* 30:225–233.
- National Aeronautics and Space Administration 2016. *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Greenbelt, United States of America: Landsat Project Science Office, NASA Goddard Space Flight Center. https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf; Zugriff: 25.06.2017.
- Nijland W, Bolton DK, Coops NC, Stenhouse G. 2016. Imaging phenology; scaling from camera plots to landscapes. *Remote Sensing of Environment* 177:13–20.
- Reed BC, White M, Brown JF. 2003. Remote Sensing Phenology. In: Schwartz MD (Hrsg.) *Phenology: An integrative environmental science*. Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers, pp 365–381.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA and Deering DW 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Fraden SC, Marcanti EP und Becker MA (Hrsg.), *Third ERTS-1 Symposium*, 10–14 Dez. 1973. Washington D.C., USA: NASA SP-351, pp. 309–317.
- Rutzinger M, Bremer M, Schmidner K. 2015. Phänologie mittels Fernerkundungsmethoden erfassen und simulieren. In: *Innsbrucker Geographische Gesellschaft (Hrsg.). Innsbrucker Jahresbericht 2014–2015*. Innsbruck, Österreich: Innsbrucker Geographische Gesellschaft, pp 71–80.
- Schönwiese CD. 2008. *Klimatologie*. Stuttgart, Deutschland: Ulmer.
- Schwartz MD (Hrsg.) 2003. *Phenology: an integrative environmental science*. Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers (Tasks for vegetation science).
- Veit H. 2002. *Die Alpen: Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. Stuttgart, Deutschland: Ulmer.
- Woodcock CE, Allen R, Anderson M, Belward A, Bindschadler R, Cohen W, Gao F, Goward SN, Helder D, Helmer E, Nemani R, Oreopoulos L, Schott J, Thenkabail PS, Vermote EF, Vogelmann J, Wulder MA et al. 2008. Free Access to Landsat Imagery. *Science* 320:1011a–1011a.
- ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) 2016. ZAMG-PhenoWatch. <http://www.phenowatch.at>; Zugriff: 26. August 2016.
- Zanter K (Hrsg.) 2016. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook – Version 2.0*. Sioux Falls, United States of America: U.S. Geological Survey. <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>; Zugriff: 25.06.2017.
- Zhu W, Mou M, Wang L, Jiang N. 2012. Evaluation of phenology extracting methods from vegetation index time series. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Geoscience and Remote Sensing Society, (Hrsg.) 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012)*: München, Deutschland, 22–27 Juli 2012; Tagungsbericht. Piscataway, United States of America: Institute of Electrical and Electronics Engineers.