

# Phänologie mittels Fernerkundungsmethoden erfassen und simulieren

von Martin Rutzinger, Magnus Bremer  
und Korbinian Schmidtner

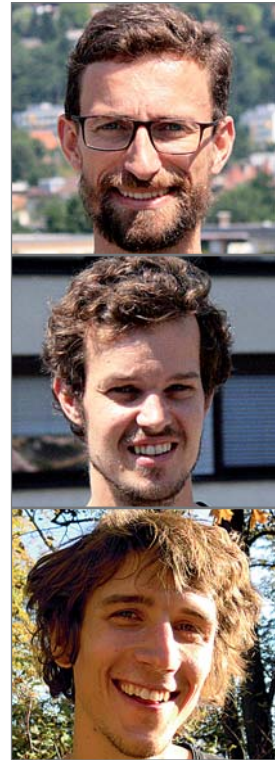
## 1. Einführung

### 1.1 Phänologische Beobachtungen

Die Phänologie beschreibt Naturphänomene, die sich im Jahreszyklus periodisch wiederholen. Dabei werden zum Beispiel das Verhalten von Tieren und verschiedene Phasen des jahreszeitlichen Pflanzenwachstums beobachtet. Phänologische Archive bestehen aus langjährigen Aufzeichnungen, die sich sehr gut als Klimaindikatoren und insbesondere für die Dokumentation von Veränderungen hinsichtlich langfristiger Klimatrends und -variabilität eignen (Hudson and Keatley 2010).

Phänologische Aufzeichnungen werden meist von Laien und Experten auf freiwilliger Basis geführt und dann in eine zentrale Datenbank übermittelt. Für Europa gibt es das Pan European Phenology Project (PEP725, <http://www.pep725.eu>), das eine Zusammenführung der europäischen phänologischen Daten und deren Veröffentlichung für wissenschaftliche Zwecke anstrebt. In Österreich werden phänologische Daten durch die Arbeitsgruppe Phänologie (<http://www.phenowatch.at/>) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) gesammelt und ausgewertet. Dabei wird in einem Erhebungsleitfaden und einem Auswertebogen detailliert beschrieben, welche Merkmale für phänologische Beobachtungen erfasst werden sollen (Koch & Hübner 2013, ZAMG 2015).

Im Projekt phenoSAT- $\alpha$  (<http://phenosat.mountain-research.at/>) wird der phänologische Kreislauf für die Europäische Lärche (*Larix decidua*) beobachtet (Geburek 2014). Die Zeitreihe für die Blattentfaltung der Lärche, die seit 1940 durch die ZAMG besteht, zeigt einen Trend



*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.*

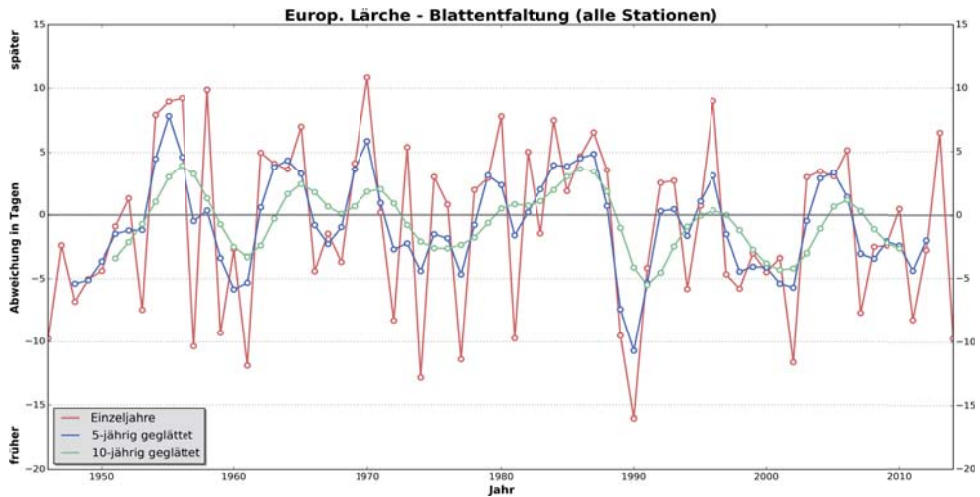


Abb. 1: Blattentfaltung der Europäischen Lärche (*Larix decidua*) für alle österreichischen Stationen ([www.phenowatch.at](http://www.phenowatch.at), 14.7.2015)

einer Verschiebung hin zu einer früheren Blattentfaltung im Jahr (Minimum: Ende April, Maximum: Mitte März). Darüber hinaus ist auch eine verstärkte Variabilität des Blattentfaltungszeitpunkts seit den späten 1980er Jahren zu erkennen (Abb. 1).

Es gibt immer weniger phänologische Beobachter, die über einen längeren Zeitraum konsistente Aufzeichnungen führen. Die österreichischen Beobachtungsnetzwerke der ZAMG zeigen auch eine nahezu lineare Abnahme der Beobachtungen für z.B. *Larix decidua* in den letzten 75 Jahren. Die Fernerkundung kann hier einen Beitrag leisten, in dem versucht wird phänologische Zyklen von ausgewählten Arten flächendeckend zu erfassen, zu klassifizieren und kontinuierlich zu beobachten.

## 1.2 Das Projekt phenoSAT- $\alpha$

Das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus/GMES (Global Monitoring for Environment and Security) wurde 1998 initiiert und hat die Aufgabe Geodaten zu vereinheitlichen, zusammenzuführen und für Wissenschaft, Forschung und Anwendungen in Umwelt- und Sicherheitsfragen zeitnah zur Verfügung zu stellen. Ein wesentlicher Teil dieses Programms sind die Sentinel-Satellitenmissionen. Im Juni 2015 wurde der Satellit Sentinel-2A für hochauflösende multispektrale Datenerfassung im sichtbaren und nahen infraroten Wellenlängenbereich erfolgreich gestartet (Drusch et al. 2012). Im Projekt phenoSAT- $\alpha$  werden für Satellitenszenen von operationell aufnehmenden Missionen wie Landsat-8 (Roy et al. 2014) und dem hochauflösenden SPOT-5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre, Gleyzes et al. 2003) die Möglichkeiten für die automatische Bestimmung der phänologischen Phasen von *Larix decidua* hinsichtlich späterer Implementierung für das Sentinel-Programm untersucht. Die Herausforderung ist dabei

die Reflexion des Sonnenlichts an Ästen und Nadeln der Lärchenbäume und die Reflexionen des Untergrunds je nach Jahreszeit bzw. phänologischer Phase nachzuvollziehen. Dabei werden Satellitenbilder hinsichtlich Geometrie- und Radiometriekomponenten der Oberfläche bzw. Objekte untersucht. Für diesen Zweck wurden hochauflösende 3D Punktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner (TLS) aufgenommen, daraus automatisiert 3D Baummodelle abgeleitet und schließlich die Strahlungsbedingungen zu den jeweiligen phänologischen Zeitpunkten mittels eines Strahlungstransfermodells (*radiative transfer model*) simuliert. Die Simulationsergebnisse werden mit den tatsächlich aufgenommenen Satellitenszenen für die Kalibrierung und Validierung des entwickelten Ansatzes miteinander verglichen.

## 2 Untersuchungsgebiet und Datensätze

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 2) ist ein 11 ha großer *Larix decidua* Bestand im Herzebenwald (Pinnistal, Neustift im Stubaital, Tirol), der nach Westen ausgerichtet ist und sich über eine Höhe von 1300 bis 1500 m ü. M erstreckt. Es handelt sich dabei um reine *Larix decidua* Bestände, mit unterschiedlichem Bedeckungsgrad, zusammenhängenden Baumgruppen von Alt- und Jungbeständen und freien Weideflächen.

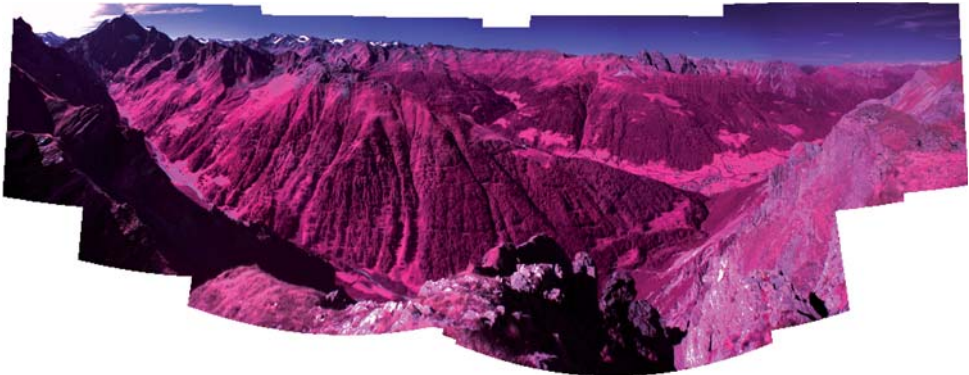


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Herzebenwald am Ausgang des Pinnistals (Neustift im Stubaital, Tirol) aufgenommen mit einer Kamera mit nahem Infrarotkanal (Foto: Rutzinger).

Der phänologische Zyklus von *Larix decidua* lässt sich in die Phasen Nadel- und Triebentfaltung, erweitertes Treibwachstum, Blüte, volle Benadelung, Nadelverfärbung und Nadelabwurf untergliedern. Theoretisch sind alle Phasen, außer die der Blüte, mittels Satellitenfernerkundung beobachtbar. An ausgewählten Standorten wurde zu neun Zeitpunkten während der Wachstumsperiode 2014 der phänologische Zustand dokumentiert und Referenzdaten erfasst. Abbildung 3 zeigt an einem Beispiel einer *Larix decidua* die beobachteten phänologischen Phasen im Jahreszyklus.

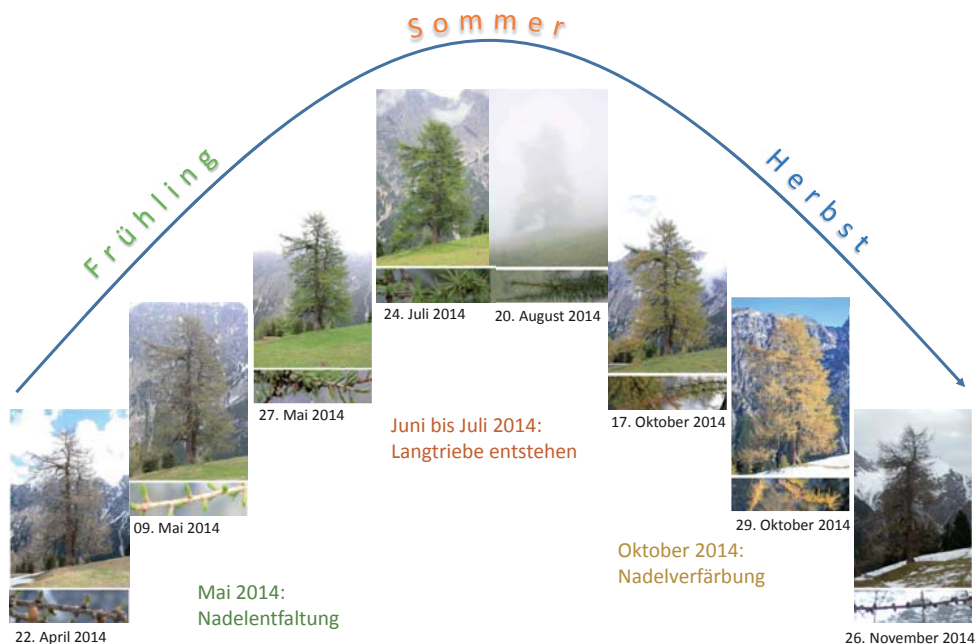


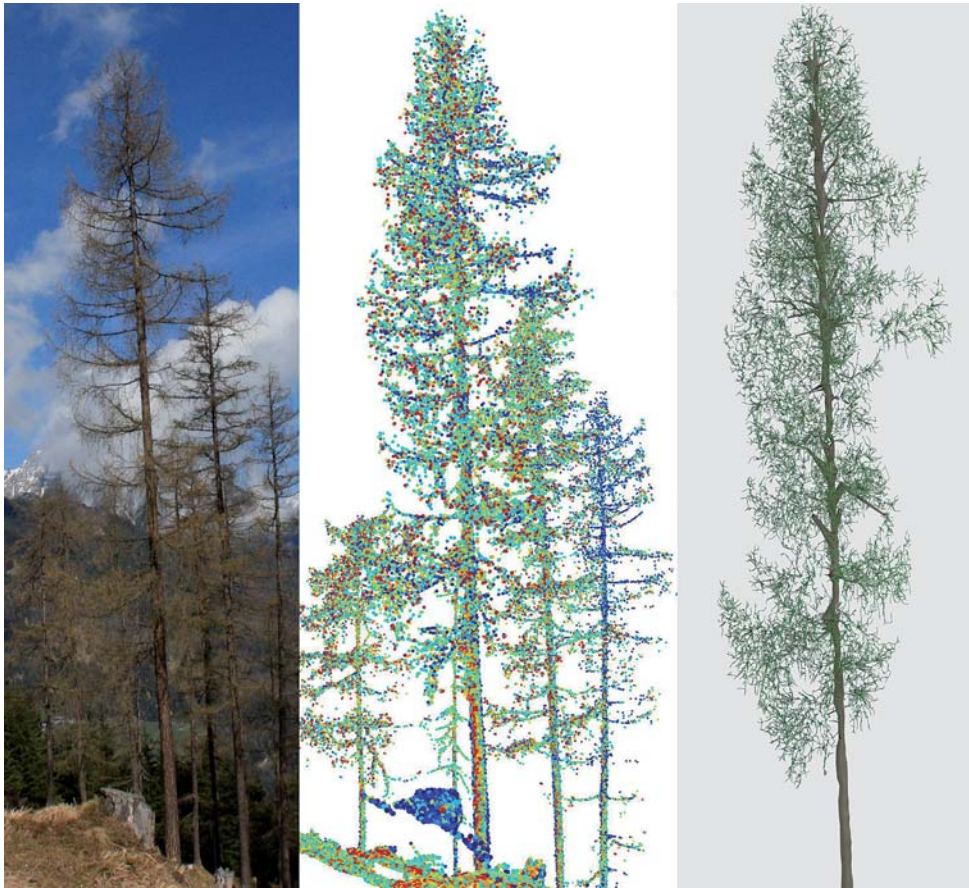
Abb. 3: Fotodokumentation eines Astes und eines frei stehenden *Larix decidua* Baums zu den phänologischen Phasen Nadelentfaltung, Triebentfaltung, volle Benadelung, eintretende Nadelverfärbung und eintretender Nadelabwurf im Jahr 2014 (Graphik: Schmidtner).

### 2.2 Erfassung von Vegetationsstrukturen mittels Terrestrischem Laserscanning

Im nadelfreien Zustand wurden mehrere TLS-Messungen vom Gegenhang bzw. direkt im Bestand aufgenommen. Die Aufnahmen wurden mit dem long-range Scanner Riegel VZ-6000 durchgeführt (Abb. 4). Die Aufnahmeplots bestehen aus ca. 42 bis 56 Mio. Punkten. An den Punktwolken wurden eine Co-Registrierung, Intensitätskorrektur und Geländefilterung durchgeführt. Anhand der Intensität wurden die Vegetationsbestandteile Baumstämme und Hauptäste getrennt und schließlich zu Einzelbaumobjekten zusammengefasst.

Abb. 4: Aufnahme des Lärchenbestands mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl VZ 6000 (Foto: Bremer).





*Abb. 5: Automatische Baummodellierung aus terrestrischen Laserscanningpunktwolken (Graphik: Bremer).*

Schließlich wurde mittels eines Skeletonisierungsverfahrens die Astartitektur der Einzelbäume rekonstruiert und 3D Baummodelle abgeleitet (Bremer et al. 2013). Das Ergebnis sind digitale Einzelbäume mit bis zu 15 Mio. modellierter Nadeln. Für diese Baummodelle wurden die einzelnen Nadeln der Lärchen je nach phänologischer Phase anhand der Feldaufnahmen rekonstruiert.

### *2.3 Satellitendaten*

Für die Kalibrierung und Evaluierung der phänologischen Simulationen wurden Satellitenaufnahmen von den Satelliten SPOT-5 und Landsat-8 verwendet. SPOT-5 wurde 2002 gestartet und hat eine Wiederholrate von 26 Tagen. Der multispektrale Sensor zeichnet im panchromatischen (5 m Auflösung), grünen, roten und nahen infraroten (10 m Auflösung) und im kurzwelligen infraroten (20 m Auflösung) Wellenlängenbereich auf.

Landsat-8 wurde 2013 gestartet und umfasst insgesamt 11 Bänder mit einer Auflösung von 15 m (panchromatisch), 30 m (multispektral) und 100 m Auflösung (thermal). Die Wiederholrate der Überflüge beträgt 16 Tage. Die Analysen dieser Satellitendaten sind Vorstudien für die soeben gestartete Sentinel-2 Mission der European Space Agency (ESA). Sentinel-2 umfasst 13 Bänder mit Auflösungen von 10 m, 20 m und 60 m mit einer Wiederholrate der Überflüge von 5 Tagen, wenn beide Satelliten (2A und 2B) operationell im Orbit sind (Abb. 6).

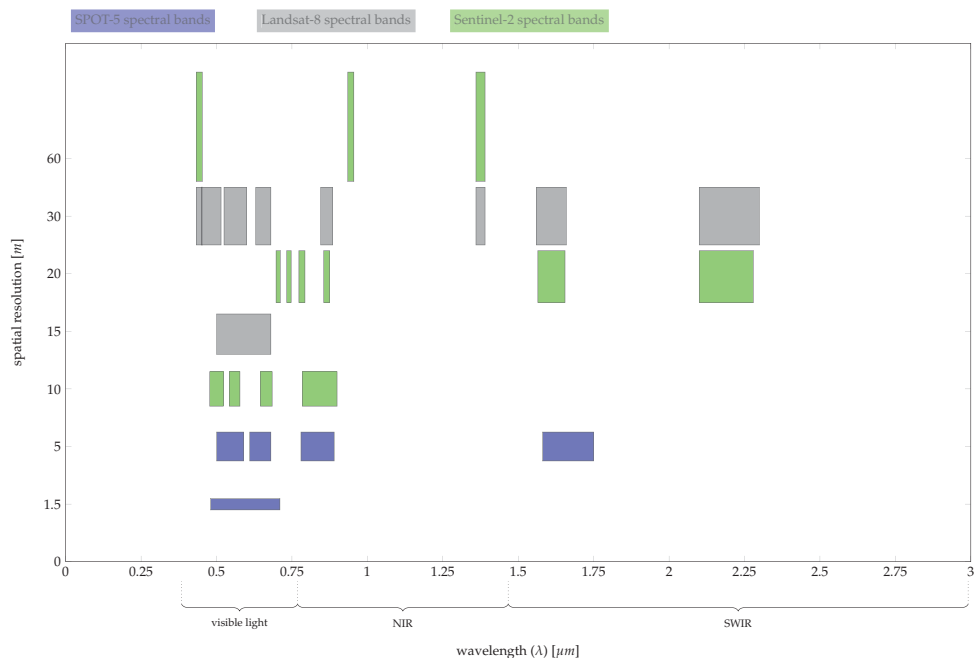


Abb. 6: Vergleich der Bänder und Wellenlängenabdeckungen von Sentinel-2, Landsat-8 und SPOT-5 (nach ESA 2012).

Für das Projekt phenoSAT- $\alpha$  wurden insgesamt vier SPOT-5-Szenen aufgenommen. Diese waren ursprünglich für Analysen der Frühjahrsphänologie geplant. Aufgrund der schlechten Witterungsbedingung und Wolkenbedeckung im Frühjahr 2014 konnten jedoch nur zwei Szenen für das Testgebiet realisiert werden, weshalb zwei weitere im Herbst 2014 aufgenommen wurden (Abb. 7). Darüber hinaus stehen für das Jahr 2014 insgesamt 14 wolkenfreie Landsat-8 Szenen für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

### 3 Simulation

Für die Simulation der Satellitenaufnahmen wird das Discrete Anisotropic Radiative Transfer Model (DART) verwendet. Dabei wird der Strahlengang und die Reflexion des Sonnenlichts auf den virtuell modellierten Einzelbäumen simuliert. Diese werden in ein

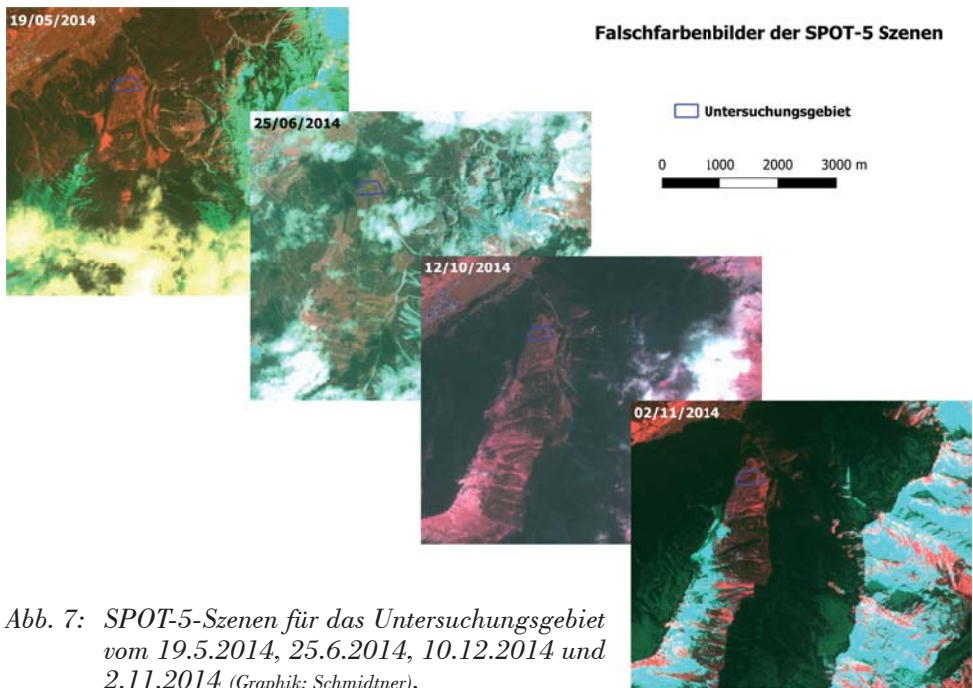


Abb. 7: SPOT-5-Szenen für das Untersuchungsgebiet vom 19.5.2014, 25.6.2014, 10.12.2014 und 2.11.2014 (Graphik: Schmidtner).

entsprechendes Format umgewandelt und anschließend in DART importiert. Das DART-Modell bietet die Möglichkeit sowohl Geometrie, Textur und spektrale Eigenschaften von Objekten in den Simulationen zu berücksichtigen. Je nach geforderten Detaillierungsgrad und Rechenaufwand, können Objektgeometrien als triangulierte Vektorobjekte oder als aggregierte Voxelobjekte in DART eingebunden werden (Gastellu-Etchegorry et al. 2015, Grau et al. 2013).

Im Untersuchungsgebiet wurden Trainingsflächen für einen homogenen *Larix decidua* Alt- und Jungbestand, extensiv genutzte Weideflächen und Grünland ausgewählt. Anhand dieser Flächen wurde das DART-Modell kalibriert. Für die vier Überflugszeitpunkte des SPOT-5-Satelliten (Mai, Juni, Oktober und November) wurde dann der normalisierte differenzierte Vegetationsindex (NDVI) abgeleitet und mit den tatsächlichen SPOT-5-Aufnahmen und den Simulationsergebnissen verglichen. Die vier Zeitpunkte entsprechen den Phasen Nadelentfaltung, Triebwachstum, beginnende Nadelverfärbung und beginnender Nadelfall.

#### 4 Ergebnisse

Mit dem in phenoSAT- $\alpha$  entwickelten Ansatz ist es möglich Reflexionen aus *Larix decidua* Beständen zu unterschiedlichen Satellitenüberflugszeitpunkten zu simulieren. Das ist zum einen die Grundlage für ein besseres Verständnis des Reflexionsverhaltens von Vegetation mit unterschiedlichen phänologischen Ausprägungen, andererseits

kann man nun versuchen phänologischen Phasen für größere Flächen automatisiert auszuwerten. Darüber hinaus konnte im Projekt ein Workflow für die automatische Modellierung der Baumarchitektur und der Phase der Benadelung implementiert werden, wobei die Baummodelle direkt in das Strahlungstransfermodell DART integriert werden. Einschränkungen bei dieser Pilotstudie entstanden vor allem durch Änderungen in der Planung der Satellitenbildaufnahmezeitpunkte durch die schlechten Wetterbedingungen im Frühjahr und Sommer 2014.

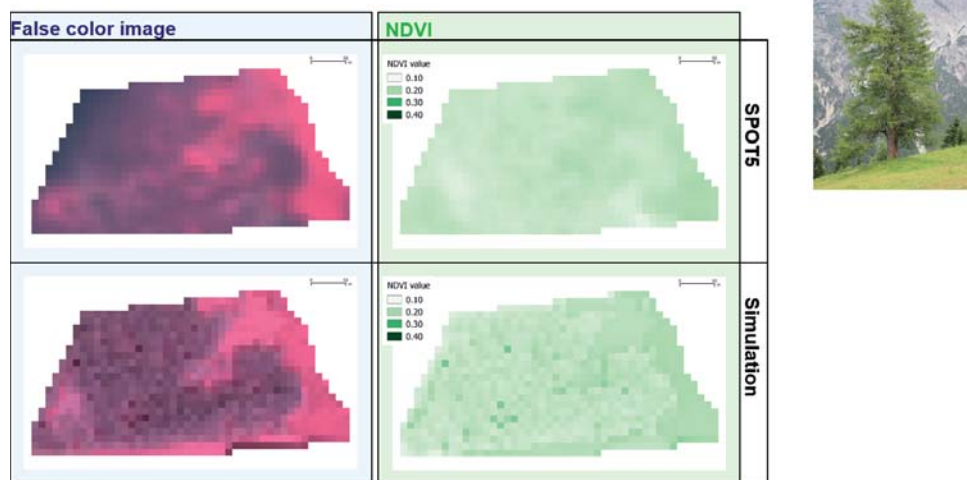


Abb. 8: Vergleich von Falschfarbenbild (links) und Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex (rechts) aus der Simulation (unten) und den SPOT-5-Satellitendaten (oben). Das Beispiel zeigt die Aufnahmen am 12.10.2014 zum Beginn der phänologischen Phase der Nadelverfärbung (Graphik: Schmidtner).

## 5 Ausblick

Für die gesicherte Trennung der Reflexionssignale aus Nadeln, Ästen und Untergrund sind noch weitere Analysen notwendig. Dabei ist die simultane Erfassung von Reflexionssignaturen mittels Feldspektrometer bei Satellitenüberflügen eine Voraussetzung. Einflüsse auf die Auswertungsgenauigkeit durch Georeferenzierung der Satellitenszenen und des Atmosphäreneinflusses auf die radiometrischen Eigenschaften der Satellitenszenen müssen ebenfalls weiter untersucht werden. Mit Hilfe der entwickelten Ansätze soll in Zukunft die Übertragbarkeit der Kartierung von phänologischen Phasen auf andere Gebiete und Pflanzenarten für die nun kommende operationelle Phase der Sentinel-Mission möglich sein. Die dadurch ermöglichten flächendeckenden phänologischen Auswertungen mittels Satellitenfernerkundung stellen einen wesentlichen Beitrag für die regionale und lokale Interpretation von Klimavariabilität da.



## 6 Zusammenfassung

Die Phänologie von Baumbeständen, deren räumliche Verteilung und die saisonale Variabilität sind grundlegende Informationen für verschiedenste Modellierungsansätze und finden zum Beispiel bei der Bestimmung von Biomasse, Holzvorrat und CO<sub>2</sub>-Senken Anwendung. Die saisonalen Veränderungen von Vegetationsparametern sind auch Indikatoren für lokale und regionale Klimaänderungen, wenn sie über längere Zeiträume beobachtet werden. Die Qualität von phänologischen Informationen, die aus Satellitendaten abgeleitet werden, ist stark abhängig von der Topographie des Untergrundes und der Struktur eines Baumbestandes. Im Allgemeinen ist es in multispektralen Satellitendaten nicht direkt möglich, Vegetationsstrukturen vertikal aufzulösen. In dieser Arbeit wird der Zusammenhang zwischen multispektralen Signaturen aus Satellitenbildern und Baumstrukturparametern unter sich ändernden phänologischen Bedingungen näher untersucht. Dabei werden Baumstruktur und Geometrie aus terrestrischen Laserscanningdaten abgeleitet und Reflexionseigenschaften zu unterschiedlichen phänologischen Zeitpunkten mit einem Strahlungstransfermodell für einen Lärchenbestand (*Larix decidua*) simuliert.

## 7 Referenzen

- Bremer, M., Rutzinger, M. und Wichmann, V. [2013]: Derivation of tree skeletons and error assessment using LiDAR point cloud data of varying quality. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 80, 39–50.
- Bremer, M., Schmidner, K. und Rutzinger, M. [2015]: Iterative and hierarchical forest plot reconstruction from terrestrial laser scanning point clouds for Canopy Radiative Transfer Modelling. In: Geospatial Week 2015 – SILVILASER. La Grande Motte, Frankreich, (in Druck).
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. und Bargellini, P. [2012]: Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. In: Remote Sensing of Environment, 120, 25–36.
- ESA [2012]: Sentinel-2 – ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. 1-80. ([http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-1322\\_2/offline/download.pdf](http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-1322_2/offline/download.pdf))
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Yin, T., Lauret, N., Cajfinger, T., Gregoire, T., Grau, E., Feret, J-B, Lopes, M., Guilleux, J., Dedieu, G., Malenovsky, Z., Cook, D, B, Morton, D, Rubio, J, Durrieu, S, Cazanave, G, Martin, E, und Ristorcelli, T. [2015]: Discrete anisotropic radiative transfer (DART 5) for modelling airborne and satellite spectrometer and LIDAR acquisitions of natural and urban landscapes. In: Remote Sensing, 7, 1667–1701.
- Geburek, T. [2014]: *Larix decidua*. In: Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U., Stimm, B. und Schutt, P. [Hrsg.] Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie. 1–20. Landsberg am Lech.
- Gleyzes, J. P., Meygret, A., Fratter, C., Panem, C., Baillarin, S. und Valorge, C. [2003]: SPOT5: system overview and image ground segment. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International, Toulouse, Frankreich, 300–302.
- Grau, E. und Gastellu-Etchegorry, J.-P. [2013]: Radiative transfer modeling in the earth-atmosphere system with DART model. In: Remote Sensing of the Environment, 139, 149–170.
- Hudson, I. L., und Keatley, M. R. [Hrsg.] [2009]: Phenological research: methods for environmental and climate change analysis. Springer Science & Business Media. Ort
- Koch, E. und Hübner, T. [Hrsg.] [2013]: Beobachtungsanleitung für die Phänologie. 1–40 ([http://www.phenowatch.at/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Beobachtungsanleitung2015\\_8.pdf](http://www.phenowatch.at/fileadmin/_migrated/content_uploads/Beobachtungsanleitung2015_8.pdf))

- Roy, D., P., Wulder, M., A., Loveland, T., R., Woodcock, C., E., Allen, R., G., Anderson, M., C., Helder, D., Irons, J., R., Johnson, D., M., Kennedy, R., Scambos, T., A., Schaaf, C., B., Schott, J., R., Sheng, Y., Vermote, E., F., Belward, A., S., Bindschadler, R., Cohen, W., B., Gao, R., Hipple, J., D., Hostert, P., Huntington, J., Justice, C., O., Kilic, A., Kovalskyy, V., Lee, Z., P., Lyburner, L., Masek, J., G., McCorkel, J., Shuai, Y., Trezza, R., Vogelmann, J., Wynne, R., H. und Zhu, Z. [2014]: Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. In: Remote Sensing of Environment, 145, 154–172.
- Schmidtner, K., Bremer, M. und Rutzinger, M. [2015]: Decomposing multispectral forest signatures of satellite imageries by modelling radiative transfers based on structural data from terrestrial laser scanning. In: 2nd EARSeL International Workshop on Temporal Analysis of Satellite Images. Stockholm, Sweden (in Druck).
- ZAMG [2015]: Phänologischer Auswertebogen für das Jahr .... 1-3 ([http://www.phenowatch.at/fileadmin/migrated/content/uploads/Beobachterbogen\\_lang.pdf](http://www.phenowatch.at/fileadmin/migrated/content/uploads/Beobachterbogen_lang.pdf))

## 8 Danksagung

Das Projekt phenoSAT- $\alpha$  wurde vom 10. Österreichischen Weltraumprogramm (Austrian Space Application Program, ASAP) der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert. Das Projekt wurde vom Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften geleitet und gemeinsam mit dem Institut für Geographie der Universität Innsbruck und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt.