

Waldmonitoring mit Sentinel-2 Satellitenbildern

Schlussbericht Projekt WHFF 2017.12

Dominique Weber und Christian Rosset

Version 1.0 September 2019

Impressum

Projektleitung

Dominique Weber (HAFL)

Projektsupervision

Christian Rosset (HAFL)

Projektmitarbeitende

Valère Martin (HAFL)

Gaspard Dumollard (HAFL)

Alexandra Erbach (HAFL)

Michaela Voleková (ehem. HAFL)

Externe Experten und Projektbegleitung

Christian Ginzler (WSL)

Leo Bont (WSL)

Projektpartner und Finanzierung

Kanton Bern, Amt für Wald KAWA

Kanton Glarus, Abteilung Wald und Naturgefahren

Kanton Graubünden, Amt für Wald und Naturgefahren

Kanton Tessin, Sezione Forestale

Kanton Waadt, Service des forêts, de la faune et de la nature

Kanton Zürich, Abteilung Wald

Forstbetrieb der Burgergemeinde Bern

BAFU, Wald- und Holzforschungsfonds

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Projektübersicht	5
3	Sentinel-2 Grundlagen	6
4	Erfassung von Waldveränderungen und Vitalitätsverlust	8
5	Klassifizierung von Waldtypen und Hauptbaumarten	11
6	Zeitreihenanalyse und Monitoring	14
7	Wissenstransfer und Sentinel-2 Toolbox	17
8	Schlussfolgerung und Ausblick	19
9	Dank	20
10	Literaturverzeichnis	21
11	Anhang	22

1 Zusammenfassung

Seit Ende 2015 sind Sentinel-2-Satellitendaten frei erhältlich und grossflächig verfügbar. Die häufige Wiederholung der Aufnahmen in für Vegetationsanalysen wichtigen Spektralbändern bietet dabei ein grosses Potenzial für die Nutzung im Waldbereich. Das Ziel dieses Projektes ist, das vielversprechende Potenzial von Sentinel-2 für die Waldwirtschaft zu nutzen und für die Praxis greifbar zu machen. Hierfür wurden praxistaugliche Methoden entwickelt, diese anhand konkreter Fallbeispiele getestet und die Resultate mit den Praxispartnern kritisch diskutiert.

Es konnte aufgezeigt werden, dass starke Waldveränderungen wie Holzschläge oder Sommersturmschäden bereits mit einer einfachen Methode zuverlässig detektiert werden können. Die Erkennung von schwachen Veränderungen, wie Durchforstung oder Vitalitätsverlust im Frühstadium, sollte anhand von konkreten Anwendungsfällen weiter untersucht werden. Die Klassifikation von Laubbzw. Nadelholzflächen und Hauptbaumarten erreichte eine praxistaugliche Genauigkeit. Dabei ist für die Klassifikation der Hauptbaumarten die Verfügbarkeit geeigneter Trainingsdaten entscheidend und gewisse Baumarten sind schwierig zu unterscheiden. Das Potenzial von Sentinel-2 für das Langzeit-Monitoring konnte an einigen Fallbeispielen (z.B. Trockenstress 2018) aufgezeigt werden und bestätigt den Mehrwert von dichten Satellitenzeitreihen für die detaillierte Wahrnehmung der komplexen Waldökosysteme und ihrer Dynamik.

Am Ende dieses Projektes wurde ein 5-tägiger Fortbildungskurs durchgeführt, um die Ergebnisse einem breiteren interessierten Publikum zugänglich zu machen. Im Rahmen dieser Kursreihe wurden methodische Grundlagen vermittelt und konkrete Fallbeispiele bearbeitet, sodass die Teilnehmenden am Ende in der Lage waren, die entwickelten Methoden selbstständig und zweckmäßig einzusetzen. An der HAFL werden Sentinel-2-Daten bereits in angewandten Forschungsprojekten und im Unterricht verwendet, und auch das Interesse in der Praxis nimmt stark zu.

2 Projektübersicht

2.1 Ausgangslage

Zur Planung und Kontrolle einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung sind Informationen über den Zustand und die Entwicklung des Waldes von zentraler Bedeutung. Die Fernerkundung bietet Möglichkeiten und Verfahren, um solche Daten effizient, flächendeckend und zeitnah zu erfassen. Mit der Sentinel-2 Satellitenmission der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) haben sich neue Perspektiven eröffnet. Sentinel-2-Satellitendaten sind seit Ende 2015 frei erhältlich, grossflächig verfügbar und die häufige Wiederholung der Aufnahmen in für Vegetationsanalysen wichtigen Spektralbändern bietet ein grosses Potenzial für die Nutzung im Waldbereich. Im Rahmen dieses Projektes wurde die praxistaugliche Nutzung von Sentinel-2-Daten für die Waldwirtschaft untersucht. Einige Inhalte dieses Berichts stützen sich auf einen bereits publizierten wissenschaftlichen Artikel (Weber et al. 2018).

2.2 Projektziele

Das Ziel dieses Projektes ist es, das vielversprechende Potenzial von Sentinel-2 für die Waldwirtschaft zu nutzen und für die Praxis greifbar zu machen.

- Im Vordergrund stehen dabei mindestens die Ermittlung des Laub- bzw. Nadelholzanteils, die Klassifizierung von Hauptbaumarten, die rasche Erfassung von abrupten Veränderungen wie Holzschlägen oder Sturmschäden sowie die zeitnahe Überwachung der Vitalität und Produktivität und das Erkennen von Trends. Die dafür entwickelten Methoden werden in einer zweckmässigen Form bereitgestellt und so dokumentiert, dass sie von einem GIS-Spezialisten angewendet werden können.
- Am Ende dieses Projektes stehen für ausgewählte Fallbeispiele praxistaugliche Daten und Kartenmaterial über den Waldzustand und die Waldentwicklung zur Verfügung, welche einen Mehrwert gegenüber der aktuellen Situation darstellen.
- Ein weiteres zentrales Ziel dieses Projektes ist der Kompetenzaufbau bezüglich Sentinel-2 in der Praxis und insbesondere bei den Projektpartnern. Um dies zu erreichen, werden regelmässige Workshops durchgeführt und am Ende des Projektes wird ein mehrtägiger Fortbildungskurs angeboten.

2.3 Vorgehen und Hauptergebnisse

Das Projekt gliedert sich in sechs Arbeitspakete (AP) (siehe Tab. 1). In AP 1 bis AP 3 wurden Methoden entwickelt und getestet um das Potenzial von Sentinel-2 mit zunehmendem Umfang und Detaillierungsgrad auszuschöpfen. In enger Zusammenarbeit mit Vertretern aus der Praxis (Begleitgruppe, siehe Anhang 11.1) wurden diverse Fallbeispiele bearbeitet und die Resultate im Rahmen von zwei Workshops kritisch diskutiert.

Die Daten und entwickelten Methoden wurden in AP 4 als «Sentinel-2 Toolbox» organisiert und konnten somit den Projektpartnern und einer interessierten «Community» in einer zweckmässigen Form zur Verfügung gestellt werden.

In AP 5 wurde der Wissenstransfer in die Praxis sichergestellt. Neben den projektinternen Workshops wurde im Rahmen von FOWALA¹ eine mehrtägige Kursreihe durchgeführt, um die Ergebnisse und Erfahrungen dieses Projektes einem breiteren interessierten Publikum zugänglich zu machen. Am Ende dieser Kursreihe waren die Teilnehmenden in der Lage, die entwickelten Methoden selbständig und zweckmässig einzusetzen.

In AP 6 wurden das Projektmanagement und die Projektdokumentation bearbeitet. So wurden zum Beispiel alle Unterlagen der FOWALA-Kursreihe auf planfor.ch bereitgestellt.

Die Projektziele wurden erreicht, das Budget eingehalten und die Organisation sowie der Ablauf des Projektes entsprechen dem Antrag. Einzig die Projektdauer wurde nach Rücksprache mit allen

¹ Fortbildung Wald und Landschaft (FOWALA) Kurs Nr. 294 April bis Mai 2019

Beteiligten aus organisatorischen Gründen (Planung und Durchführung des Fortbildungskurses) angepasst und bis Ende Sept. 2019 verlängert.

Arbeitspakete (AP)	
AP 1	Potenzialabschätzung und erste Anwendungen mit Sentinel-2 Schätzung des Laub- bzw. Nadelholzanteils und der Vitalität, Erkennung von Holzschlägen und anderen starken Veränderungen, Fallbeispiele und Kompetenzaufbau bei der Praxis
AP 2	Detaillierte Analysen und Kombination mit anderen Daten Klassifizierung von Hauptbaumarten und Weiterentwicklung der Methoden aus AP 1, Fallbeispiele und Kompetenzaufbau bei der Praxis
AP 3	Langzeit-Monitoring und Schnittstellen zu anderen Tools Grundlagen für ein Langzeit-Monitoring, Beispielanwendungen, weitere Projektpartner-spezifische Anwendungen und Schnittstellen zu Tools, Kompetenzaufbau bei der Praxis
AP 4	Sentinel-2 Toolbox Datenmanagement (Sentinel-2, Referenzflächen etc.), Organisation und Bereitstellung der entwickelten Methode inkl. Dokumentation
AP 5	Wissenstransfer Publikation und mehrtägiger Fortbildungskurs
AP 6	Projektmanagement und Projektdokumentation

Tab. 1 : Übersicht und kurze Beschreibung der Arbeitspakete (AP) gemäss Projektantrag

Highlights

- Praxistaugliche Methoden für die rasche Erfassung von Waldveränderungen sowie die Klassifizierung von Laub- bzw. Nadelholzflächen und Hauptbaumarten wurden entwickelt und bereitgestellt.
- Mehrere Fallbeispiele wurden in enger Zusammenarbeit mit der Praxis bearbeitet und der Mehrwert von Sentinel-2-Daten für das Management der Waldökosysteme konnte aufgezeigt werden.
- Der Wissenstransfer und Kompetenzaufbau bei der Praxis wurden durch ein Kickoff-Meeting, zwei Workshops, einen FOWALA-Vortrag, eine 5-tägige FOWALA-Kursreihe und eine Fachpublikation wesentlich gefördert. Insbesondere wurde die FOWALA-Kursreihe von den Teilnehmenden sehr positiv bewertet.

3 Sentinel-2 Grundlagen

3.1 Daten

Die Sentinel-2 Satellitenmission besteht aus zwei Satelliten, dem Sentinel-2A (ab 2015) und Sentinel-2B (ab 2017) und ist Teil des Erdbeobachtungsprogramms «Copernicus» der Europäischen Kommission. Mit dem Satellitenpaar werden alle fünf Tage auf einem 290 km breiten Aufnahmestreifen Bilder der Schweiz aufgenommen. An Bord der Satelliten befindet sich ein Multispektrales Aufnahmegerät (MSI), welches Informationen in 13 Spektralbändern und in einer räumlichen Auflösung von 10 – 60 m erfasst. Dabei werden neben dem sichtbaren Lichtspektrum (Rot, Grün, Blau) speziell auch die für Vegetationsanalysen wichtigen Bereiche im nahen bis kurzwelligen Infrarot abgedeckt (Abb. 1). Sentinel-2-Daten werden in zwei verschiedenen Verarbeitungsstufen angeboten, den Level-1C und Level-2A Produkten (Drusch et al. 2012). Neben geometrischer und radiometrischer Korrektur sind die Level-2A Produkte zusätzlich atmosphärisch korrigiert und werden inklusive Szenenklassifikation (Landbedeckungstypen, Wolkenmaske) bereitgestellt. Sentinel-2-Daten können im SAFE-Format² und als 100 x 100 km² Kacheln kostenlos heruntergeladen werden (siehe Anhang 11.2.1). Die eigentlichen Bilddaten bzw. die einzelnen Bänder sind im JPEG2000 (*.jp2) Format abgespeichert.

² Standard Archive Format for Europe (SAFE) → <http://earth.esa.int/SAFE>

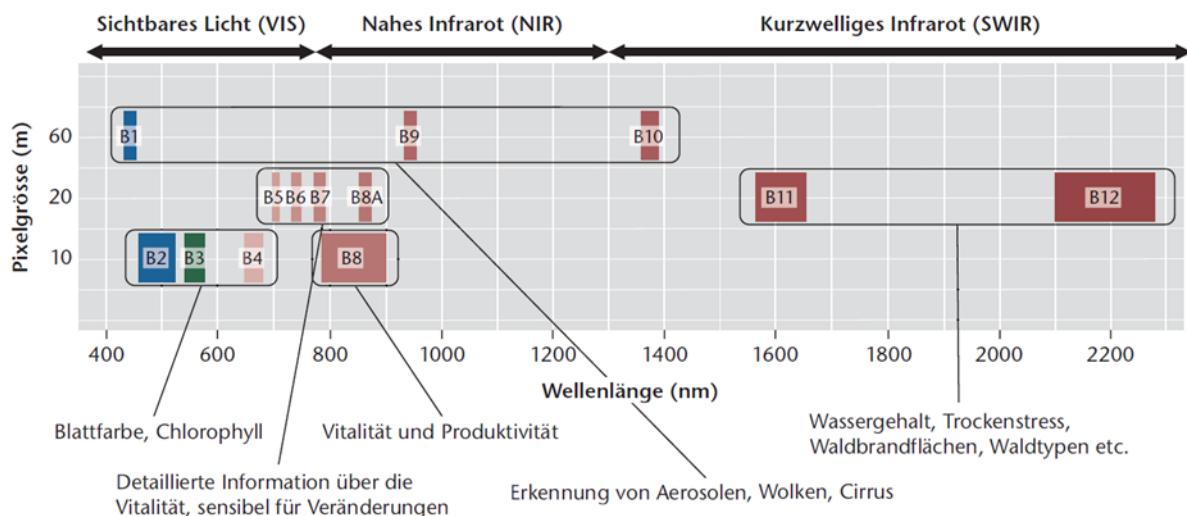


Abb. 1: Die 13 Spektralbänder (B) von Sentinel-2 und deren Bedeutung für die Vegetationsanalyse. Grafik übernommen aus Weber et al. (2018).

3.2 Zugang

Sentinel-2-Daten sind weltweit frei verfügbar und eine langfristige Datenkontinuität ist vorgesehen. Für die lokale Verwendung können Sentinel-2-Daten über die offizielle Plattform der ESA via Webplattform oder APIs kostenlos heruntergeladen werden, dazu ist lediglich eine Registrierung notwendig (siehe scihub.copernicus.eu). Es gibt diverse Alternativen, nationale Archive und Cloud Anbieter wie Amazon oder Google. Weblösungen bieten einen raschen online Zugriff und immer vielfältigere Visualisierungs- und Analysemöglichkeiten (z.B. www.sentinel-hub.com) bis hin zu vollumfänglichen, leistungsstarken und skalierbaren Cloud-Lösungen wie der Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017). Eine Zusammenstellung der wichtigsten Tools, APIs und Tutorials wird hier laufend aktualisiert (Stand Juni 2019): <https://github.com/Fernerkundung/awesome-sentinel>.

3.3 Verwendung

Sentinel-2-Daten können in GIS (ArcGIS, QGIS etc.) und mit einer breiten Palette weiterer Programme (SNAP, Monteverdi etc.) sowie gängigen Skriptsprachen (Python, R etc.) verwendet werden, entweder im SAFE-Format (via XML File) oder die einzelnen Bilddaten gespeichert im JPEG2000 Format. Dazu kommen die bereits erwähnten Weblösungen, welche mit zunehmendem Funktionsumfang und vereinfachtem Zugang zu Daten und Software immer attraktiver werden.

Die Nutzung von Sentinel-2-Daten und die methodischen Ansätze sind sehr vielfältig und erstrecken sich von der einfachen Bilddarstellung bis hin zur vollautomatischen Auswertung von Zeitreihen. Nachfolgend wird eine grobe Übersicht gegeben, wobei die Reihenfolge in etwa der Chronologie eines typischen Workflows entspricht.

- Datenvorbereitung:** Radiometrische, geometrische und atmosphärische Korrekturen verbessern die Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Daten für die Vegetationsanalyse. Die von der ESA bereitgestellten Level-1C und insbesondere die Level-2A Produkte erfüllen einen Grossteil dieser Anforderungen und können direkt so verwendet werden (siehe Kapitel 3.1). Ergänzende Vorbereitungsschritte wie das Maskieren von Wolken oder das Zusammenfügen von mehreren Bildausschnitten (Mosaiken) sind je nach Anwendung und Gebiet notwendig. Zudem erleichtert ein «Resampling» aller Spektralbänder auf 10 m und das Abspeichern als Multiband Raster (z.B. GeoTIFF) für viele Anwendungen die Arbeit.
- Bilddarstellung:** Für die einfache Visualisierung werden oft drei Spektralbänder kombiniert, normalerweise Rot, Grün, Blau; auch Echtfarben-RGB genannt. Für die Charakterisierung der Vegetation eignen sich auch andere Kombinationen mit den Infrarotbändern; z.B. NIR, Rot, Grün; auch Farbinfrarot-RGB genannt (Beispiele siehe Anhang 11.2.2). Für die visuelle Interpretation ist

- die Bildverbesserung (z.B. Kontraststreckung) entscheidend, da z.B. Wälder im sichtbaren Spektrum relativ dunkel erscheinen.
3. **Berechnung von Vegetationsindizes:** Vegetationsindizes werden aus der Kombination mehrerer Spektralbänder berechnet und eignen sich zur Beschreibung spezifischer Eigenschaften der Vegetation. Etablierte Indizes sind zum Beispiel der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NBR (Normalized Difference Burn Ratio) bzw. NDII (Noramlized Difference Infrared Index) oder NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) (siehe Anhang 11.2.3). Dies ist z.B. für die zeitliche Überwachung der Vegetation (im Hinblick auf Holzschläge, Trockenstress etc.) ein einfacher methodischer Ansatz, da mit einem einzigen normalisierten Index gearbeitet werden kann.
 4. **Automatische Bildklassifizierung:** Ziel der Bildklassifizierung ist die Erarbeitung von thematischen Karten, in welchen alle Pixel einer Klasse zugewiesen werden. Eine typische Anwendung ist die Klassifikation von Waldtypen oder Hauptbaumarten mittels überwachter Klassifikation. Dabei werden Referenzflächen als sogenannte Trainingsdaten verwendet, um einen Algorithmus (z.B. Random Forest) zu trainieren. Wichtiger Bestandteil ist die unabhängige Validierung der Resultate und die Ermittlung der Kartengenauigkeit (z.B. Anteil der korrekt klassifizierten Pixel).
 5. **Erkennung von Veränderungen und Zeitreihenanalyse:** Multitemporale Satellitendaten erlauben die Erkennung von Veränderungen durch die Analyse von mindestens zwei Bildaufnahmen. Die Methoden erstrecken sich von der einfachen Differenzbildung bis hin zur mehrjährigen Zeitreihenanalyse mit komplexen Algorithmen. Die Herausforderung sind die Vergleichbarkeit der Bilder, die Berücksichtigung von Saisonalität, Trends und abrupten Veränderungen, und das Unterscheiden verschiedener Veränderungstypen.

3.4 Einschränkungen

Die Anzahl der effektiv nutzbaren Sentinel-2-Daten wird durch Wolken stark reduziert und durch Schattenwurf an steilen Nordhängen, insbesondere im Winter, weiter beeinträchtigt. Vor allem für grosse Gebiete stellt dies eine Herausforderung dar und erfordert evtl. die Generierung von wolkenfreien Mosaiken mit Aufnahmen aus verschiedenen Zeitpunkten. Mit einer räumlichen Auflösung von 10 – 20 m können kleinräumige Strukturen oder Einzelbäume nur bedingt oder nicht erfasst werden und die spektralen Informationen sind immer eine Mischung der verschiedenen Bodenbedeckungstypen (Wald, Lücken, Wege etc.) pro Pixel/Fläche. Sentinel-2-Daten sind zwar frei erhältlich, die Einarbeitungszeit, der Aufwand der Datenvorbereitung und die benötigten IT-Ressourcen, insbesondere für die Bearbeitung am eigenen Computer, sind jedoch nicht zu unterschätzen.

4 Erfassung von Waldveränderungen und Vitalitätsverlust

Die hohe zeitliche Auflösung von Sentinel-2-Daten ist ein grosser Mehrwert gegenüber existierenden Fernerkundungsdaten und bietet die Möglichkeit, Waldveränderungen zeitnah und für grosse Flächen zu erfassen. Es wurden mehrere einfache und praxistaugliche Methoden entwickelt und getestet, die einen Mehrwert gegenüber der aktuellen Situation aufweisen.

4.1 Jährliche Waldveränderungen

Sentinel-2-Daten bieten die Basis für eine objektive Einschätzung der jährlichen Veränderungen, welche effizient und für grosse Flächen erfasst werden können, sei es auf Betriebs- oder Kantonsebene. Für die automatische Detektion von Veränderungsflächen wurden die Unterschiede zwischen zwei zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Sentinel-2-Datensätzen mit geeigneten Vegetationsindizes untersucht. Idealerweise werden wolkenfreie Bilder im Frühsommer nach dem Blattaustrieb verwendet, da zu diesem Zeitpunkt die Veränderungen im Winter (z.B. Holzschläge, Sturmschäden) noch gut erkennbar sind. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Vegetationsindizes NDVI und NBR bzw. deren Differenzbildung (z.B. $\Delta NDVI = NDVI_{2018} - NDVI_{2017}$) verwendet. Die effektiven Veränderungsflächen wurden mittels Schwellwert ausgeschieden (z.B. $\Delta NDVI \leq -0.1$). Die hier beschriebene Methode wurde unter anderem zur Detektion der forstlichen Eingriffe in den Wäldern der Burgergemeinde Bern (Abb. 2) getestet und zeigte eine hohe Übereinstimmung mit den Angaben des Forstbetriebs (Weber et al. 2018). Bei der Diskussion mit den Projektpartnern überzeugte die Methode durch ihre einfache Anwendung und die zuverlässige Detektion von groben Veränderungen. In einem nächsten Schritt

könnte die Erkennung von schwächeren Veränderungen (z.B. Durchforstung), die detaillierte Charakterisierung (Typ, Stärke, Zeitpunkt) und die Ausarbeitung von konkreten Anwendungsfällen angegangen werden. Für weitere Informationen zu dieser Methode wurden ein Merkblatt inkl. R-Skript (Anhang 11.4.) und Unterlagen aus dem Fortbildungskurs (siehe Kapitel 7) bereitgestellt.

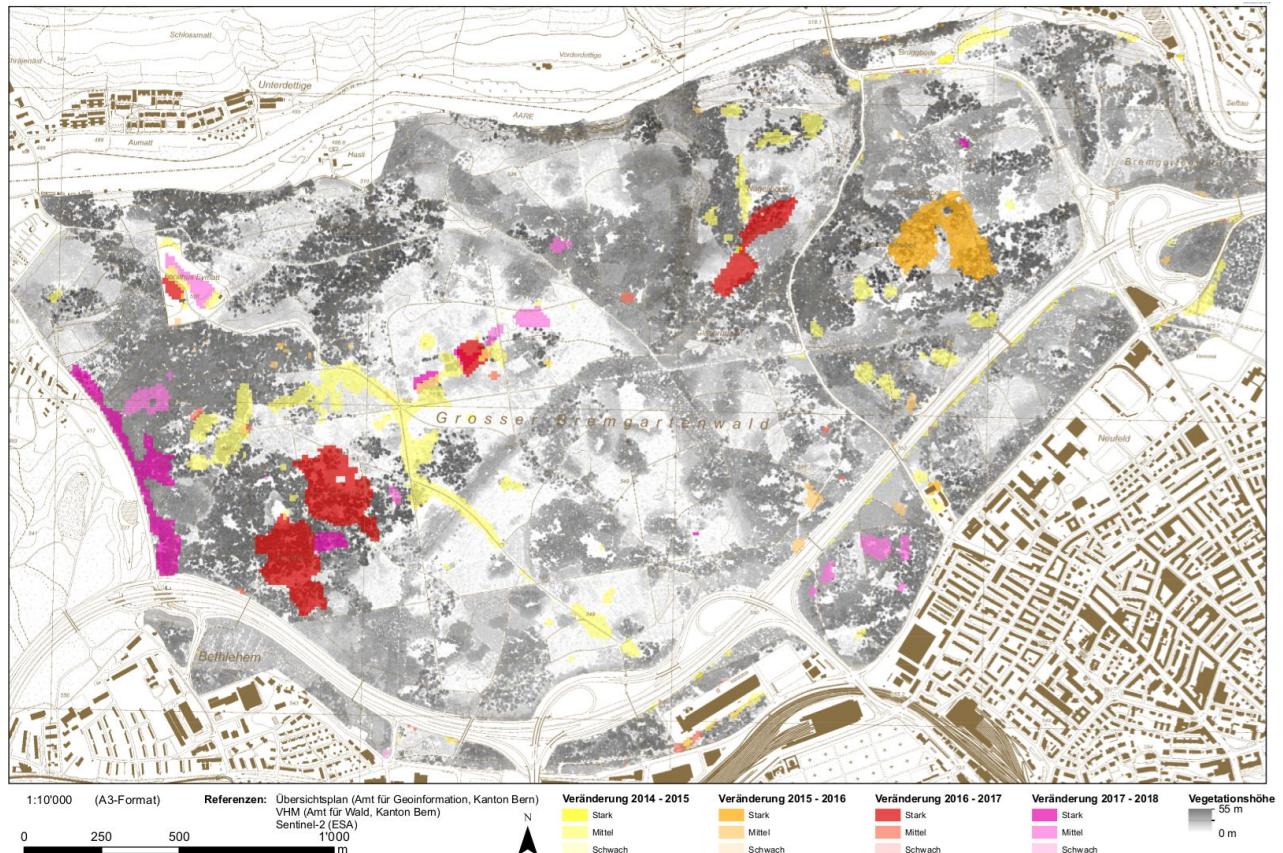


Abb. 2: Detektierte Waldveränderungen für die Jahre 2014 - 2018 in einem Waldgebiet der Burgergemeinde Bern mit dem Vegetationshöhenmodell (ca. Jahr 2012) im Hintergrund (© Hintergrundkarten Amt für Wald / Geoinformation, Kt. Bern).

4.2 Natürliche Störungen

Stehen wolkenfreie Bilder kurz nach einem Störungereignis zur Verfügung, bietet Sentinel-2 die Möglichkeit, sich rasch einen Überblick über die Situation zu verschaffen. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Detektion von Waldbrandflächen und Sommersturmschäden untersucht. Es wurde der gleiche methodische Ansatz wie für das Erkennen der jährlichen Waldveränderungen gewählt, jedoch mit dem Vegetationsindex NBR, welcher sich für die Detektion von verschiedenen Störungstypen eignet (Kennedy, Yang et Cohen 2010). Am Beispiel der Waldbrandfläche im Bremgartenwald bei Bern (10.4.2017) und der Sommersturmschäden bei Egg ZH (22.7.2017) und Nussbaumen TG (2.8.2017) konnte aufgezeigt werden, dass durch natürliche Störungen verursachte starke und flächige Waldveränderungen zeitnah erkannt werden können (Abb. 3). Der entscheidende Faktor ist die Verfügbarkeit von wolkenfreien Bildern. Dazu kommt, dass die oft im Winter auftretenden Sturmschäden bei Bäumen im laublosen Zustand schwierig zu detektieren sind und durch weitere Einflüsse wie Schatten, Schnee etc. erschwert wird. Beim Wintersturm Burglind (2.1.2018) standen lange Zeit keine wolkenfreien Bilder zur Verfügung und die Detektion von Streuschäden an Einzelbäumen stellte sich als schwierig heraus. In diesem Zusammenhang sollte auch das Projekt an der WSL «Erarbeitung der Grundlagen für rasche Hinweiskarten nach Sturmereignissen» verfolgt werden. Dabei werden Sentinel-1 Radardaten verwendet, welche auch bei Bewölkung eingesetzt werden können. Für weitere Informationen zu dieser Methode wurden ein Merkblatt inkl. R-Skript (Anhang 11.4.) und Unterlagen aus dem Fortbildungskurs (siehe Kapitel 7) bereitgestellt.



Abb. 3: Detektion der Sommersturmschäden vom 2. August 2017 (Nussbaumen TG). Dargestellt sind die Sentinel-2-Bilder vor (2. Juli) und nach dem Sturm (15. August), die potenziellen Sturmschadflächen (gelb) und ein aktuelles, hochauflösendes Satelliten-Referenzbild (© Google Maps).

4.3 Vitalität

Eine zeitnahe Überwachung der Vitalität ist eine Voraussetzung, um bei Verschlechterung rechtzeitig allfällige Massnahmen einzuleiten. Sentinel-2 könnte dazu insbesondere dank den Spektralbändern im «Red-Edge»³ und Infrarotbereich wertvolle Daten in einer hohen zeitlichen Auflösung liefern (Abdullah et al. 2019). Im Rahmen dieses Projektes wurden dazu erste Analysen mit verfügbaren Referenzdaten (z.B. bezüglich Borkenkäfer, Föhrensterben, Eschentriebsterben) gemacht (z.B. Veränderung des NDVI als Vitalitätsindikator), was sich aber aufgrund der Lagegenauigkeit der Referenzdaten und deren häufigem Bezug auf Einzelbäume als schwierig herausstellte. Deshalb wurde eine relativ einfache Methode für die unüberwachte Klassifizierung entwickelt, welche sich ohne Referenzflächen und vollautomatisch anwenden lässt. Der verwendete Algorithmus für die Clusteranalyse (SOM, Self-Organizing Map) weist alle Flächen, die sich zwischen zwei Sentinel-2-Aufnahmen ähnlich entwickelt haben, einer Gruppe zu (Abb. 4). Auffällige oder sehr untypische Entwicklungen (Gruppen mit wenigen «Pixeln») können somit als Verdachtsflächen ausgeschieden werden. Die Methode eignet sich aufgrund ihrer raschen und einfachen Anwendung und liefert erste Hinweise, wo eine auffällige Entwicklung stattfand. Die Unterscheidung von Vitalitätsverlust und anderen Veränderungen (z.B. Holzschlag) ist eine Herausforderung. Auch ist nicht klar, ab welchem Stadium Vitalitätsprobleme detektierbar sind und wie gross die betroffene Fläche für eine robuste Erkennung sein muss. Die Entwicklung von spezifischen Indizes, die Kombination mit anderen Daten, sowie die Kalibrierung und Validierung mit geeigneten Referenzdaten sollten detaillierter untersucht werden. Es braucht weitere Bestrebungen, um die Methode praxistauglich zu machen.

³ Die Spektralbänder B5, B6 und B7 im Red-Edge-Bereich zwischen Rot und Infrarot können wichtige Informationen über den Gesundheitszustand der Vegetation liefern, da sich in diesem Bereich die Reflexion in Abhängigkeit vom Chlorophyllgehalt der Pflanzen und der Zellstruktur der Blätter sehr schnell ändert.

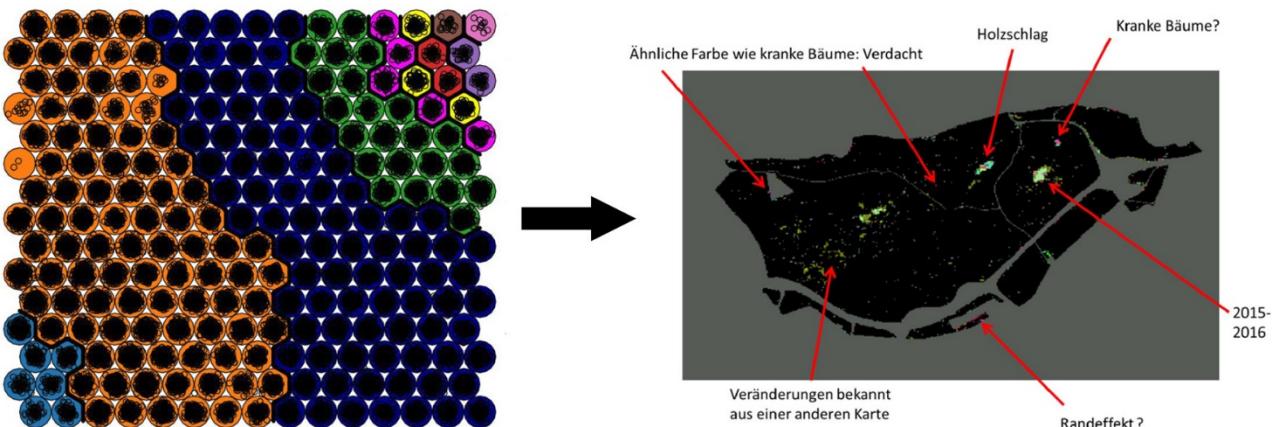


Abb. 4: Grafische Darstellung der Methode der zweistufigen Clusteranalyse (links) und der Anwendung auf ein Waldgebiet in der Nähe von Bern (rechts), auf welchem die möglichen Veränderungen als Hinweis auf Vitalitätsverlust farblich dargestellt sind. Die Farben der Kreise auf dem Bild links zeigen die aufgrund ihrer spektralen Distanz derselben Gruppe zugewiesenen Pixel (kleine schwarze Kreise), wobei Gruppen mit wenig Pixeln (z.B. oben rechts) auf verdächtige Entwicklungen hindeuten.

5 Klassifizierung von Waldtypen und Hauptbaumarten

Aktuelle und flächendeckende Informationen über die räumliche Verteilung von Waldtypen (Laub-/Nadelholz, Gebüschwald etc.) und Hauptbaumarten sind für die Waldbewirtschaftung von zentraler Bedeutung. Die Verfügbarkeit von Sentinel-2-Bildern zu verschiedenen Jahreszeiten, in einer für die meisten Anwendungen ausreichenden räumlichen Auflösung von 10 m, bietet eine ideale Grundlage, um solche Informationen effizient und für grosse Gebiete bereitzustellen.

5.1 Klassifikation von Laub- bzw. Nadelholzflächen

Laub- bzw. Nadelholzflächen lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen spektralen Signatur und Blattentwicklung mit Sentinel-2-Daten gut unterscheiden (siehe Datenauswertung Anhang 11.3). Mindestens ein wolkenfreies Winter- und Sommerbild sollten verwendet werden, wobei zusätzliche Bilder die Genauigkeit erhöhen. Im Winter ist der Sonnenstand relativ tief und es gibt einen erhöhten Schattenwurf, weshalb Bilder zu einem möglichst späten Zeitpunkt, jedoch noch vor dem Blattaustrieb der Laubbäume (ca. Ende März), am besten geeignet sind. Für die Klassifizierung wurde Random Forest verwendet, ein auf Entscheidungsbäumen basierendes Verfahren, welches für die überwachte Bildklassifizierung eingesetzt werden kann (Breiman 2001). Um den Algorithmus zu trainieren werden Referenzflächen mit einer Angabe zu Laub-/Nadelholz benötigt. Diese können aus Inventurdaten oder der Luftbildinterpretation stammen. Die Positionsgenauigkeit, Validität und Häufigkeitsverteilung der Referenzflächen sind entscheidend. Die Anzahl der benötigten Referenzflächen ist abhängig von der Gebietsgrösse, der Heterogenität des Geländes und der Waldstruktur sowie von der angestrebten Genauigkeit, wobei weniger als 30 Flächen pro Klasse selten ausreichend sind. Die Klassifikation von Laub- bzw. Nadelholzflächen wurde für die Wälder der Burgergemeinde Bern und mit zur Verfügung stehenden MOTI⁴ Inventurdaten ($n=327$) getestet und erreichte eine Genauigkeit von ca. 90 % (Abb. 5; Weber et al. 2018). Vergleichbare Resultate wurden für weitere Testgebiete in den Kantonen BE, GR, GL, TI, VD erreicht und die Genauigkeit wurde von den Projektpartnern positiv eingeschätzt. In diversen Projekten an der HAFL wird diese Methode bereits in der Praxis eingesetzt, z.B. bei der Erarbeitung von Bestandeskarten oder bei der Hiebsatzbestimmung. Primäre Fehlerquellen sind Schatten aufgrund der Topografie, lückige Bestände, Waldstrassen und andere nicht bewaldete Flächen. Sehr kleinräumige Muster und Einzelbauminformationen können zudem nicht erfasst werden. Für weitere Informationen zu dieser Methode wurden ein Merkblatt inkl. R-Skript (Anhang 11.4.) und Unterlagen aus dem Fortbildungskurs (siehe Kapitel 7) bereitgestellt.

⁴ MOTI ist eine an der HAFL entwickelte Smartphone Applikation zur Unterstützung von Waldinventuren (www.moti.ch)

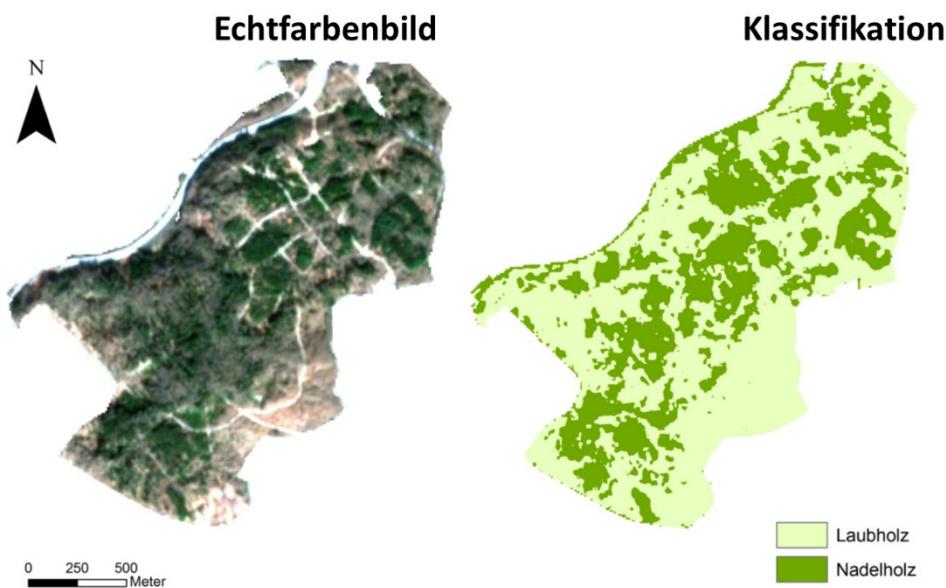


Abb. 5: Sentinel-2-Echtfarbenbild und Klassifikation von Laub- bzw. Nadelholz im Könizbergwald in der Nähe von Bern.

5.2 Klassifikation von Hauptbaumarten

Die Klassifizierung von Hauptbaumarten mittels Fernerkundung, vor allem für grosse Flächen und in einer praxistauglichen Genauigkeit, ist nach wie vor eine grosse Herausforderung (Fassnacht et al. 2016). Die hohe zeitliche Auflösung von Sentinel-2 liefert detaillierte Informationen über die Phänologie (Blattentwicklung, Blüte etc.), und dies in einer für grosse Gebiete homogenen Qualität. Damit könnte Sentinel-2 einen wesentlichen Beitrag zur Erarbeitung von Baumartenkarten auf Betriebsebene oder auf kantonaler, gar nationaler Ebene leisten. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Klassifikation von sieben Hauptbaumarten für Wälder der Burgergemeinde Bern getestet (Abb. 6). Es wurden 9 über das Jahr 2017 verteilte Sentinel-2-Aufnahmen und Daten aus der Betriebsinventur des Forstbetriebs (MOTI Inventurdaten) verwendet. Für die Klassifizierung wurde Random Forest (siehe Kapitel 5.1) eingesetzt und mit den Inventurdaten trainiert. Der Trainingsdatensatz wurde auf max. 100 Flächen pro Baumart begrenzt, um zu verhindern, dass die häufigsten Baumarten (Buche, Fichte) zu stark gewichtet werden. Es wurde eine Gesamtgenauigkeit von 70 % erreicht, wobei die Fehlerraten pro Baumart stark variierten (siehe Tab. 2). Die Resultate wurden während eines Workshops mit den Projektpartnern im Wald kritisch diskutiert und von der Mehrheit als wertvoll und praxistauglich eingestuft. Die Anzahl und Qualität der Trainingsdaten waren entscheidend und hatten den grössten Einfluss auf die Modellgenauigkeit. Darüber hinaus wurde die Klassifizierung der Hauptbaumarten auch im Kanton Zürich getestet. Dabei stammten die Trainingsdaten aus der Bestandeskarte und die Resultate bestätigten in etwa die in Bern gemachten Erfahrungen. Für Gebiete und Baumarten mit genügend Trainingsdaten wurden befriedigende Resultate erzielt, in den anderen Fällen nur bedingt. Eine effiziente Erhebung und Nutzung von Trainingsdaten sollte weiter optimiert und mit Vertretern der Praxis diskutiert werden. Einzelne Bäume, wie z.B. über ein Waldgebiet verstreute Kirschbäume, sind aufgrund der räumlichen Auflösung von Sentinel-2 schwierig zu erfassen. Zudem sind Bäume in der Unterschicht bei Überschirmung vermutlich nicht erkennbar (Beispiel Eibe Kanton Zürich). Mischbestände mit einer grossen Feinmischung und die Übertragbarkeit dieser Methode auf weitere Gebiete sollten untersucht werden, wie auch die Kombination mit anderen Daten (LiDAR, Radar etc.).

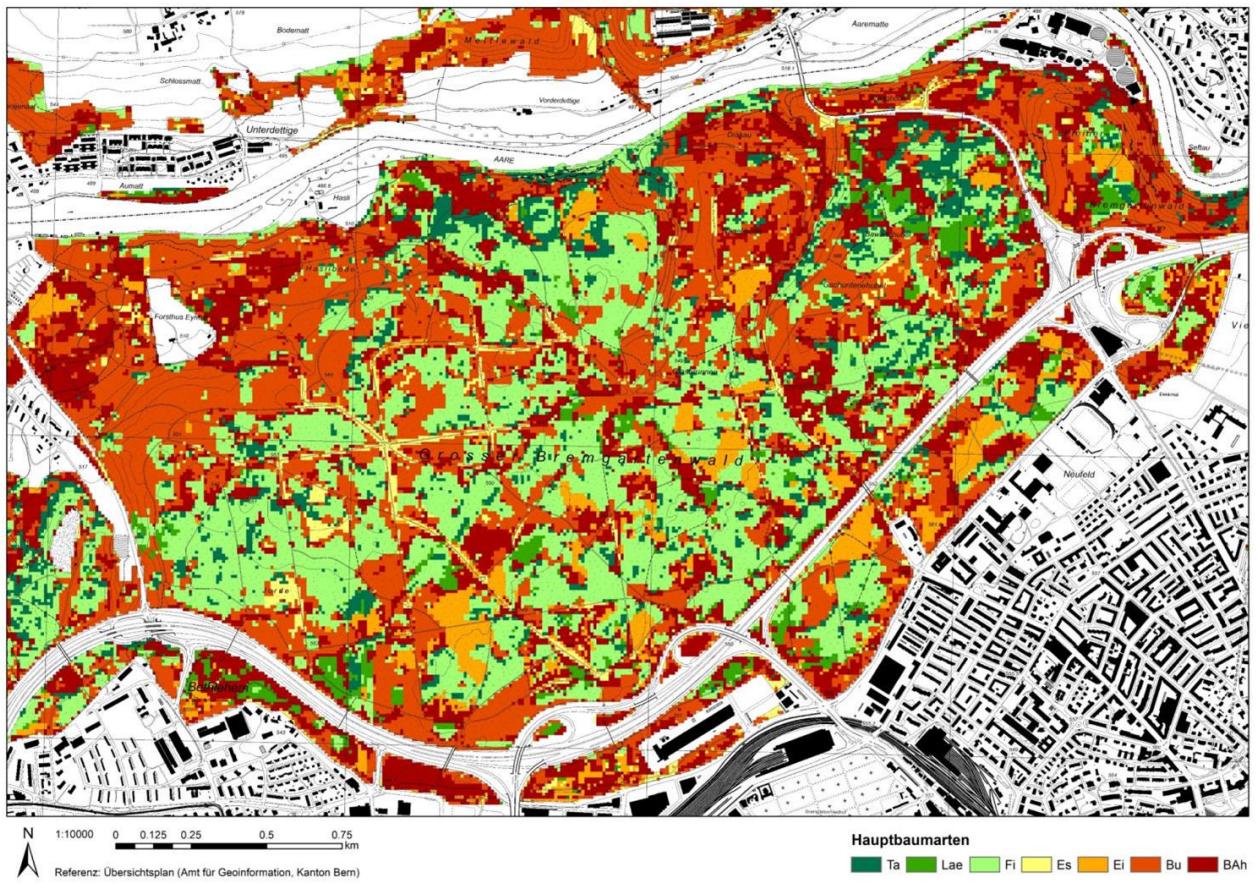


Abb. 6: Räumliche Darstellung der Klassifikation der Baumarten Tanne (Ta), Lärche (Lae), Fichte (Fi), Esche (Es), Eiche (Ei), Buche (Bu) und Bergahorn (BAh) für ein Waldgebiet in der Nähe von Bern.

		Modellvorhersage							
MOTI	BAh	Bu	Ei	Es	Fi	Lae	Ta	Summe	Fehler
BAh	45	8	8	1	7	1	2	72	0.38
Bu	8	83	3	2	4	0	0	100	0.17
Ei	6	4	64	0	6	0	0	80	0.20
Es	12	11	3	4	1	1	0	32	0.88
Fi	2	8	1	0	81	1	7	100	0.19
Lae	3	3	1	0	2	34	2	45	0.24
Ta	3	4	1	0	17	0	30	55	0.45
Summe	79	121	81	7	118	37	41	484	
Richtig klassifiziert: 341							Gesamtgenauigkeit: 70.45%		

Tab. 2: Die Konfusionsmatrix für die Klassifikation der sieben Hauptbaumarten Bergahorn (BAh), Buche (Bu), Eiche (Ei), Esche (Es), Fichte (Fi), Lärche (Lae) und Tanne (Ta) für Wälder der Burgergemeinde Bern zeigt die Fehlerrate pro Baumart und die erreichte Gesamtgenauigkeit (Out-of-bag-Fehler von Random Forest). Die Werte in den Zeilen entsprechen den Angaben aus dem Feld (MOTI) und die Spalten der Modellvorhersage. Beispielsweise wurde der Bergahorn 45 Mal richtig und in 8 Fällen fälschlicherweise als Eiche (Ei) klassifiziert.

5.3 Klassifikation von Gebüschwaldflächen

Basierend auf der Methode zur Baumartenklassifikation wurde mit dem Kanton Graubünden als Projektpartner die Klassifikation von Gebüschwaldflächen, in einem separaten kleinen Projekt durchgeführt (Abb. 7). Die Gebüschwälder Alpenerle, Legföhre und Hasel wurden mit Hilfe von einigen Referenzflächen und Fernerkundungsdaten flächendeckend und weitgehend objektiv für den ganzen

Kanton Graubünden kartiert. Neben den Sentinel-2-Daten wurden auch Sentinel-1-Daten (Radar-Sensor), das nationale Vegetationshöhenmodell des LFI sowie das digitale Höhenmodell swissALTI3D von swisstopo verwendet, was sich aufgrund der Komplementarität der Daten positiv auf die Klassifikation auswirkte. Es wurde eine Gesamtgenauigkeit von ca. 85% erreicht, wobei es Unterschiede zwischen den drei Gebüschwaldarten gab. Für Alpenerle und Legföhre war die Genauigkeit höher (ca. 90%), für Hasel deutlich tiefer (ca. 70%). Die genannten Werte sind Modellgenauigkeiten und beziehen sich auf die verwendeten Referenzflächen (Out-of-bag-Fehler von Random Forest). Für eine unabhängige Validierung lagen uns keine Daten vor, wir schätzen die tatsächlichen Genauigkeitswerte jedoch etwas niedriger ein. Die Resultate wurden im Rahmen der FOWALA-Kursreihe präsentiert. Die Validierung mit LFI⁵-Daten und eine Fachpublikation sind geplant.

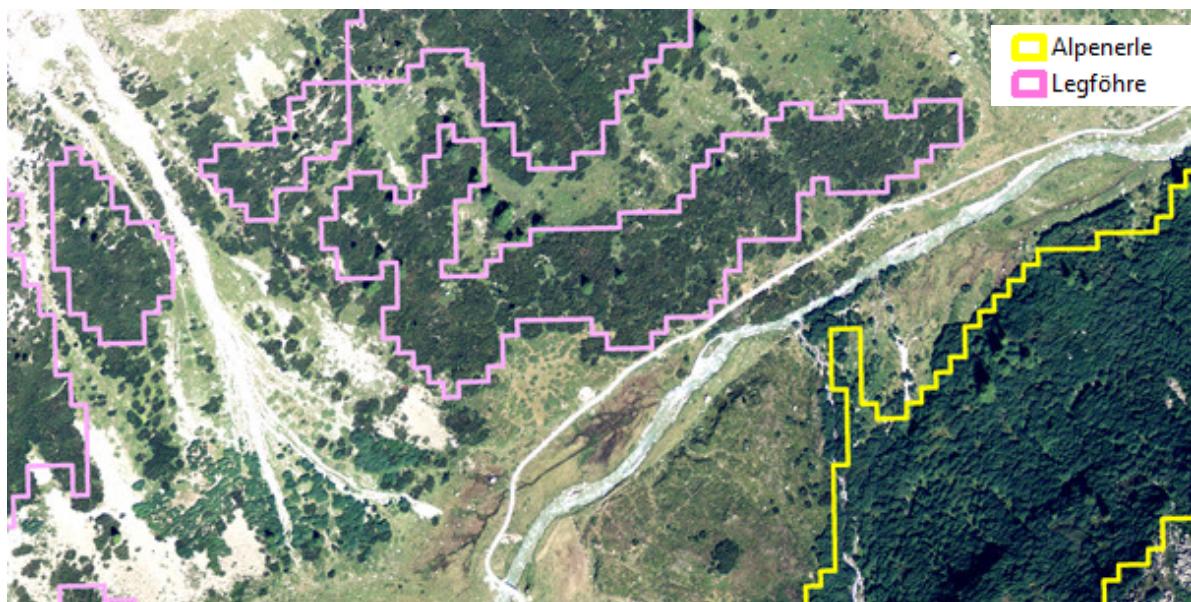


Abb. 7: Ausschnitt der Gebüschwaldklassifikation mit dem Luftbild im Hintergrund (swissimage © 2019 swisstopo).

6 Zeitreihenanalyse und Monitoring

Die bereits beschriebenen und im Rahmen dieses Projektes entwickelten Methoden (Detektion von Waldveränderungen, Unterscheidung von Laub- bzw. Nadelholzflächen, Klassifikation der Hauptbaumarten) können für das jährliche Monitoring eingesetzt werden. Dazu werden die Analysen jährlich wiederholt, die Resultate verglichen und die wesentlichen Veränderungen festgehalten. Das Potenzial ist damit aber noch lange nicht ausgeschöpft. Im Gegensatz zu vielen anderen Fernerkundungsdaten liefert Sentinel-2 sehr dichte Zeitreihen (alle 5 Tage) und zudem ist eine langfristige Datenkontinuität vorgesehen. Daraus ergibt sich eine wertvolle Datengrundlage um historische und aktuelle Veränderungen sowie langfristige Trends und Anomalien zu erfassen, und um deren zeit-räumliche Muster besser zu verstehen. Detaillierte Informationen über die historische Entwicklung einer Fläche könnten zudem für die Früherkennung von Veränderungen und vielleicht sogar für Prognosen genutzt werden.

Das Ziel ist die zeitnahe, kontinuierliche und automatisierte Überwachung von praxistauglichen Indikatoren und darauf basierend die Bereitstellung von flächendeckenden Informationen über deren Veränderungen und Trends. Für diesen Zweck werden häufig Vegetationsindizes wie der NDVI oder der NBR verwendet, welche eine starke Korrelation mit bestimmten Vegetationsmerkmalen zeigen (Chlorophyllgehalt, Blattwassergehalt etc.). Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene methodische Ansätze und verfügbare Tools getestet und das Potenzial an konkreten Fallbeispielen aufgezeigt. Weiter wird ein einfaches, praxistaugliches Verfahren für die schweizweite Erfassung von Waldveränderungen vorgeschlagen.

⁵ Schweizerisches Landesforstinventar (LFI)

Die im Rahmen dieses Projektes gemachten Erfahrungen bieten eine gute Basis, die Komplexität und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Zeitreihenanalyse erfordern aber weitere Untersuchungen und die Ausarbeitung von konkreten Anwendungen in Zusammenarbeit mit der Praxis. Aufgrund der beschränkten zeitlichen Verfügbarkeit von Sentinel-2-Daten (seit 2015) wurden auch Landsat-Zeitreihen verwendet. Die beiden Datensätze sind vergleichbar, wobei Sentinel-2 einen höheren Detaillierungsgrad (räumlich, zeitlich und spektral) aufweist.

6.1 Zeitreihenanalyse und verfügbare Tools

Für die Zeitreihenanalyse ist das Intervall (jährlich, wöchentlich etc.), die betrachtete Grösse (Mischungsgrad, Vegetationsindex etc.), die eingesetzte Methode und die Zielgrösse (z.B. langfristige Trends) entscheidend. Es existieren zahlreiche Methoden und Lösungsansätze. Nachfolgend werden die im Rahmen des Fortbildungskurses behandelten Tools zur einfachen Visualisierung und Analyse von Satellitenzeitreihen kurz vorgestellt.

EO Browser: Mit dem EO Browser von Sentinel Hub (www.sentinel-hub.com) kann auf die kompletten Sentinel-2-Archive online und kostenlos zugegriffen werden. Neben der Visualisierung des aktuellen Zustandes oder dem Vergleich zweier Zustände können auch Zeitreihen einfach dargestellt werden. Die Darstellung von Zeitreihen erlaubt vergangene und aktuelle Entwicklungen detaillierter beurteilen zu können (z.B. Beginn des Trockenstresses, Zeitpunkt des Holzschlages). Direkt online können Polygone digitalisiert und z.B. NDVI-Zeitreihen für diese Fläche erstellt werden. Ein Beispiel dazu findet sich im Anhang 11.5.2.

LandTrendR: Mit diesem Tool können Satellitenzeitreihen automatisch in spektral-temporale Segmente unterteilt und für die Analyse von Trends und abrupten Veränderungen verwendet werden (Kennedy, Yang et Cohen 2010). Das attraktive an diesem Tool ist, dass neu eine Implementierung in der Google Earth Engine (GEE) frei zur Verfügung gestellt wird (Kennedy et al. 2018). Es müssen keine Daten heruntergeladen oder Software installiert werden. Beliebige Regionen und Zeitabschnitte können direkt online analysiert werden. Dabei wird jeweils ein Wert pro Jahr verwendet (Vegetationsindex oder Spektralband) und Wolken werden automatisch gefiltert. Eine ausführliche Anleitung, erklärende Visualisierungen und die Links zu den Tools sind Online zu finden (<https://emapr.github.io/LT-GEE>). Momentan werden Landsat-Daten (1984 bis 2019) verwendet, die Methode könnte aber auch für Sentinel-2-Daten eingesetzt werden (Runge et Grosse 2019).

BFAST: Mit diesem Framework können komplexe Satellitenzeitreihen für die automatische Erkennung von Trends und abrupten Veränderungen sowie für die zeitnahe Überwachung genutzt werden (Verbesselt et al. 2010). Mit einer Komponentenzerlegung wird eine Zeitreihe mindestens in die Komponenten Saison und Trend zerlegt, was für Vegetationsanalysen zentral ist, um das jährliche Muster der Vegetationsaktivität zu berücksichtigen (siehe Anhang 11.5.3). Wolken müssen vorgängig maskiert werden, z.B. mit der in den Level-2A Produkten bereitgestellten Szenenklassifikation (siehe Kapitel 3.1). BFAST wird als R-Package bereitgestellt. Ein Beispiel einer solchen Analyse für eine bekannte Waldfläche in der Nähe von Bern ist in Anhang 11.5.4 abgebildet.

6.2 Fallbeispiele Trockenstress und Dauerbeobachtungsflächen

Trockenstress: Der Trockenstress 2018 führte dazu, dass in der Region Walensee das Laub verschiedener Baumarten ab Mitte Juli verdorrte (Wohlgemuth et al. 2018). Mit einer ersten qualitativen Analyse wurde untersucht, inwiefern dieses Muster mit Sentinel-2-Zeitreihen abgebildet werden kann, welche Indikatoren sich eignen und ob eine automatische Kartierung gestresster Flächen realisierbar wäre. Für die Generierung der Zeitreihen wurde die Google Earth Engine (GEE) verwendet. Es wurden die Vegetationsindizes NDVI, NDII und NDRE verwendet (siehe Anhang 11.2.3). Ab Ende Juli war eine starke Abnahme der Werte in allen drei Indizes auf den untersuchten Flächen gut erkennbar und die niedrigsten Werte wurden Mitte August erreicht (Abb. 8). Die detaillierten Verläufe der Indizes waren nicht identisch und so erholteten sich z.B. die Werte des NDVI ab Mitte August stärker im Vergleich zu den anderen Indizes. Grundsätzlich scheinen sich alle drei Indizes zu eignen, wobei deren spezifischen Vor- und Nachteile sowie deren Bedeutung für die Praxis weiter untersucht werden sollten. Die

grossflächige Kartierung von Trockenstress scheint realistisch, weitere Untersuchungen und die Validierung mit Feldaufnahmen wären dafür jedoch notwendig.

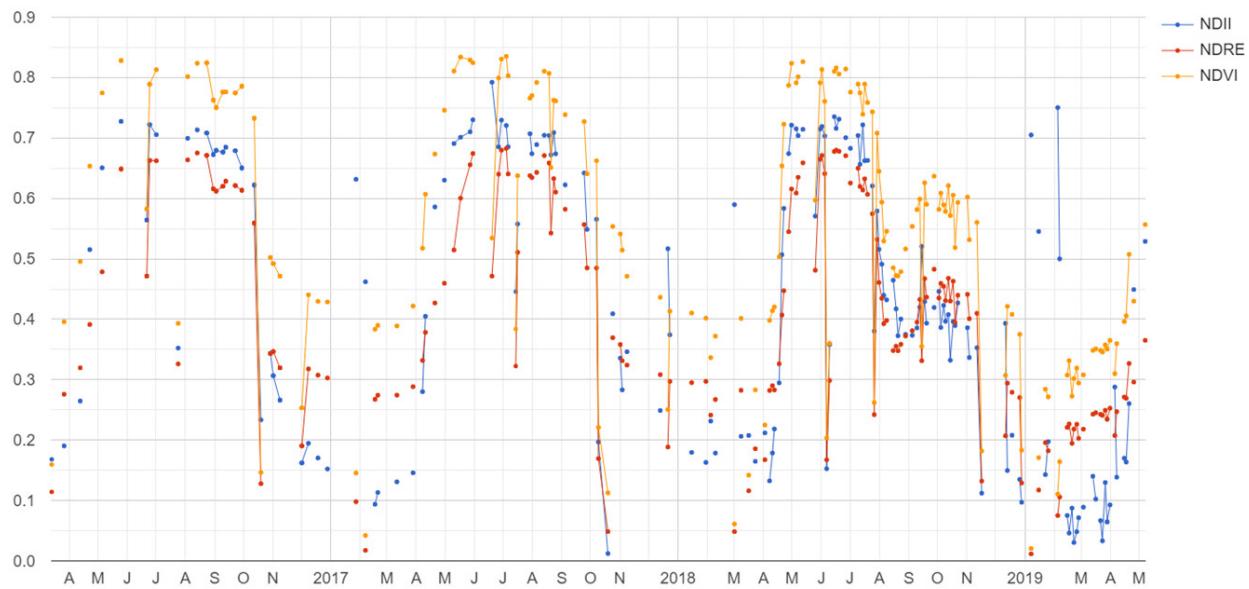


Abb. 8: Sentinel-2-Zeitreihe für eine Waldfläche mit sichtbarem Trockenstress oberhalb des Bahnhofs Ziegelbrücke (GL).

Dauerbeobachtungsflächen (PPSS): Die waldbaulichen Dauerbeobachtungs- und Trainingsflächen (auch PPSS genannt, siehe Rosset et al. 2019) sind gut dokumentiert und wurden verwendet, um die Muster von Landsat- und Sentinel-2-Zeitreihen zu interpretieren und deren Informationsgehalt zu evaluieren. Dazu wurden die unter 6.1 beschriebenen Tools und die Google Earth Engine verwendet. Grobe Trends und starke Veränderungen waren gut erkennbar (Lothar Sturmschäden, Räumungen, starke Eingriffe), für weitere Aussagen braucht es jedoch zusätzliche Untersuchungen. Grundsätzlich scheint der Vegetationsindex NDII (auch NBR genannt) sensibler und langfristiger auf strukturelle Veränderungen zu reagieren als z.B. der NDVI. Dies sind erste wertvolle Hinweise, welche den Mehrwert der Bänder im kurzweligen Infrarotbereich hervorheben. Beispiel-Zeitreihen zu den PPSS Flächen sind im Anhang 11.5.6 abgebildet.

6.3 Schweizweite Erfassung von Waldveränderungen

Die im Kapitel 4.1 beschriebene Methode zur Erfassung von jährlichen Waldveränderungen mittels Δ NDVI ist sehr effizient und einfach anzuwenden. Problematisch wird es für sehr grosse Gebiete, für welche zu einem gegebenen Zeitpunkt selten flächendeckend wolkenfreie Bilder zur Verfügung stehen. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine einfache Methode verwendet, um aus verschiedenen Aufnahmen innerhalb eines definierten Zeitfensters automatisch ein möglichst wolkenfreies Mosaik zu generieren (engl. Best-Available-Pixel (BAP) Composite). Wird pro Jahr für jeden Pixel der höchste NDVI-Wert aller verfügbaren Sommerbilder übernommen, werden damit Wolken und Schatten automatisch herausgefiltert, da diese deutlich tiefere NDVI-Werte haben als grüne Vegetation. Diese Methode ist relativ robust, einfach anzuwenden und kann für die Erarbeitung von kantonalen und nationalen Veränderungskarten eingesetzt werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein erster Versuch mit Bildern aus dem Juni und Juli der Jahre 2017 und 2018 gemacht und die Resultate als WMS bereitgestellt (siehe Anhang 11.5.7). Die Rückmeldungen aus der Praxis waren sehr positiv, vor allem die effiziente und vollautomatische Bereitstellung, sowie deren Integrationsmöglichkeiten in GIS und Webplattformen überzeugte. In einem nächsten Schritt sollte geprüft werden, wie und für welche Tätigkeiten diese Informationen konkret eingesetzt werden könnten (z.B. Nachhaltigkeitsberichterstattung).

7 Wissenstransfer und Sentinel-2 Toolbox

7.1 Wissenstransfer und Kompetenzaufbau

Ein zentrales Ziel dieses Projektes war der Wissenstransfer und der Kompetenzaufbau in der Praxis, vor allem bei den Projektpartnern, damit sie in der Lage sind das Potenzial von Sentinel-2 eigenständig zu nutzen. Dazu wurden ein Kickoff-Meeting, zwei projektinterne Workshops sowie eine 5-tägige Kursreihe durchgeführt. Es wurden auch ein Fachartikel publiziert und ein Vortrag im Rahmen eines weiteren Kurses gehalten (siehe Tab. 3). Der Austausch mit den Projektpartnern und externen Experten war für die Projektsteuerung sehr wertvoll. Ursprünglich war ein dritter projektinterner Workshop geplant, welcher aber in Absprache mit den Projektpartnern in die abschliessende Kursreihe integriert wurde.

Sept. 2017 Kickoff Meeting

Frühzeitiger Einbezug der Projektpartner, Projektorganisation, Einführung zu Sentinel-2; Erwartungen, Prioritäten und Testgebiete für Arbeitspaket (AP) 1.

Dez. 2017 Projekt-Workshop 1

Projektstand und Ergebnisse aus AP 1, Kompetenzaufbau und erste Übungen mit Sentinel-2; Erwartungen, Prioritäten und Testgebiete für AP 2.

Jan. 2018 SZF-Artikel «Wissen»

In der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen (SZF) wurde ein peer-reviewed Artikel «*Potenzial von Sentinel-2-Satellitendaten für Anwendungen im Waldbereich*» publiziert, der einen guten Einstieg für Sentinel-2 und erste, für die Praxis nützliche Forschungsergebnisse liefert.

Juni 2018 Projekt-Workshop 2

Projektstand und Ergebnisse aus AP 2, erweiterter Kompetenzaufbau, Rundgang und Diskussion im Wald (Hauptbaumarten, Veränderungen); Erwartungen, Prioritäten und Testgebiete für AP 3.

Nov. 2018 FOWALA Vortrag

Vortrag im Rahmen der Veranstaltung «*Fernerkundung und Wald – Update Grundlagen und Werkzeuge*» zum Thema «*Waldmonitoring mit Sentinel-2 Satellitenbildern*». Präsentation unter www.planfor.ch.

April, Mai 2019 FOWALA Kursreihe

Kursreihe «*Waldmonitoring mit Sentinel-2-Satellitenbildern*» verteilt auf 5 Kurstage mit aufbauenden Inhalten. Dieser Fortbildungskurs wurde öffentlich ausgeschrieben, um die Ergebnisse dieses Projektes einem breiteren interessierten Publikum zugänglich zu machen. Die Kurse stiessen auf grosses Interesse (ca. 20-30 Kursteilnehmende pro Tag) und die Evaluationen fielen sehr positiv aus. Am Ende der Kursreihe wurde der Aufbau einer «Community» diskutiert, was von einigen Teilnehmenden stark gewünscht wurde. Als erster Schritt in diese Richtung wurden alle Kursunterlagen inkl. Übungsdaten auf www.planfor.ch bereitgestellt.

Tab. 3: Auflistung der wesentlichen Beiträge des Projektes für den Wissenstransfer und Kompetenzaufbau bei der Praxis in chronologischer Reihenfolge

7.2 Sentinel-2 Toolbox

Die entwickelten Methoden wurden in Form einer «*Sentinel-2 Toolbox*» organisiert, bereitgestellt und so dokumentiert, dass ein GIS-Spezialist sie anwenden kann. Einige der Methoden und Anleitungen wurden für GIS (QGIS oder ArcGIS) und R (Statistiksoftware), und andere ausschliesslich für R bereitgestellt.

Im Rahmen der FOWALA-Kursreihe wurden Videoanleitungen und Übungsdaten für mindestens folgende Anwendungen zur Verfügung gestellt:

Anwendung und Fallbeispiele	Bereitgestellte Unterlagen
Jährliche Waldveränderungen (ΔNDVI) Differenzbildung zwischen den NDVI-Werten aus zwei Jahren und Ausscheidung der potenziellen Veränderungsflächen mittels Schwellenwert. <u>Fallbeispiel:</u> Veränderungen 2015 bis 2018 Region Bern	→ Videoanleitung für ArcGIS oder QGIS → R-Skript inkl. Dokumentation
Detektion von Sommersturmschäden (ΔNBR) Differenzbildung zwischen den NBR-Werten aus Aufnahmen vor und nach dem Sturm und Ausscheidung der potenziellen Sturmschadflächen mittels Schwellenwert. <u>Fallbeispiele:</u> Sommersturmschäden bei Egg ZH (22.7.2017) und Nussbaumen TG (2.8.2017)	→ Videoanleitung für ArcGIS oder QGIS → R-Skript inkl. Dokumentation
Klassifikation Laub- / Nadelholzflächen (ΔNDVI) Differenzbildung von NDVI-Werten zwischen Aufnahmen im Sommer und Winter und Klassifikation von Laub- bzw. Nadelholzflächen mittels Schwellenwert. <u>Fallbeispiel:</u> Wälder in der Region Bern	→ Videoanleitung für ArcGIS oder QGIS → R-Skript inkl. Dokumentation
Klassifikation Laub- / Nadelholzflächen (Random Forest) Überwachte Bildklassifizierung mit Random Forest Algorithmus und per Luftbildinterpretation generierten Trainingsdaten. <u>Fallbeispiel:</u> Wälder in der Region Bern	→ Videoanleitungen → R-Skript inkl. Dokumentation
Klassifikation Hauptbaumarten (Random Forest) Überwachte Bildklassifizierung mit Random Forest Algorithmus und Trainingsdaten aus der Betriebsinventur (mit MOTI-Aufnahmen). <u>Fallbeispiel:</u> Wälder der Burgergemeinde Bern	→ R-Skript inkl. Dokumentation
Jährliche Waldveränderungen (ΔNDVI_{\max}) Differenzbildung zwischen den maximalen NDVI-Sommerwerten aus zwei Jahren und Ausscheidung der potenziellen Veränderungsflächen mittels Schwellenwert. <u>Fallbeispiel:</u> Veränderungen 2017 bis 2018 Region Lausanne	→ Videoanleitung für ArcGIS oder QGIS → R-Skript inkl. Dokumentation

Tab. 4 : Übersicht der im Rahmen des Fortbildungskurses behandelten Anwendungen/Fallbeispiele und den auf planfor.ch bereitgestellten Unterlagen.

Alle Unterlagen der Kursreihe wurden auf www.planfor.ch unter «Für die Praxis», «Veranstaltungen», «Sentinel-2 Kursreihe» öffentlich bereitgestellt: <https://www.planfor.ch/de/content/april-mai-2019-sentinel-2-kursreihe>. Der Aufbau einer «Community» und die Bereitstellung weiterer Tools und Skripte ist geplant, z.B. auf einem öffentlich zugänglichen GitHub repository. Zudem gibt es zu den bereits etablierten, konsolidierten «Tools» Merkblätter im Anhang 11.4.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes konnte aufgezeigt werden, dass Sentinel-2-Daten einen Mehrwert für das Monitoring und Management der Waldökosysteme bieten, und dabei komplementär sind zu anderen Fernerkundungsdaten. Die Kombination aus hoher räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung und der freien Verfügbarkeit ist einzigartig. Damit können aktuelle und grossflächige Informationen über den Waldzustand und die Waldentwicklung in einem für viele Anwendungen ausreichenden Detaillierungsgrad bereitgestellt werden.

Praxistaugliche Methoden für die Kartierung von Laub- und Nadelholzflächen, Hauptbaumarten und Waldveränderungen (Holzschläge, Sturmschäden etc.) wurden entwickelt, im Rahmen eines mehrtägigen Fortbildungskurses vermittelt und der Praxis zur Verfügung gestellt. In verschiedenen Projekten der HAFL und im Unterricht werden Sentinel-2-Daten bereits erfolgreich verwendet und liefern wertvolle Grundlagen für das Waldmanagement, z.B. bei der Erarbeitung von Bestandeskarten mit TBk (Toolkit Bestandeskarte) und für die Betriebsplanung mit WIS.2 Cockpit⁶. Aus Sentinel-2-Daten gewonnene Informationen wie die räumliche Verteilung der Baumarten und die Chronologie der markanten Veränderungen sind dabei wichtige Eingangsgrössen für die genannten Tools. Damit leistet Sentinel-2 einen wesentlichen Beitrag für die ganzheitliche Wahrnehmung der komplexen Waldökosysteme und ihrer Dynamik und unterstützt das Waldmanagement mit wertvollen Informationen. Der Zugang und die Verwendung dieser Daten werden dank den rasanten Entwicklungen im ICT-Bereich (z.B. Cloud-Lösungen) und den Trends zu Open Data und Open Source immer einfacher und attraktiver für die Praxis.

Es gilt zu berücksichtigen, dass für einige Anwendungen mit Sentinel-2 terrestrische Referenzdaten benötigt werden, deren Erhebungsaufwand nicht zu unterschätzen ist. Die Bearbeitung am eigenen Computer kann zudem sehr rechen- und datenintensiv sein und erfordert erweiterte GIS-Kenntnisse oder eine spezifische Weiterbildung. Wolken schränken die effektiv zur Verfügung stehenden Daten ein und die räumliche Auflösung von 10 – 20 m stellt für kleinräumige Analysen eine Herausforderung dar.

Das Projekt war sehr wertvoll, um erstmals aufzuzeigen, wie Sentinel-2-Satellitedaten für die Praxis mit einem vielseitigen Nutzen eingesetzt werden können. Weiter konnte dank den verschiedenen Workshops und dem Fortbildungskurs ein Dialog zwischen Forschung und Praxis über diese Thematik aufgebaut werden, und die Grundlage für den Aufbau einer «Community» für weitergehenden Austausch und Zusammenarbeit wurde geschaffen. Dieses Projekt liefert nicht nur die Basis, um konkrete Anwendungsfälle zu bearbeiteten und entsprechende Methoden für die Praxis zu entwickeln, sondern auch, um weitere Nutzungsmöglichkeiten zu erkunden, die noch vertieft untersucht werden sollten (z.B. Vitalität, Produktivität). Für ein bestmögliches Ergebnis sollte dies mit der Fortführung der Zusammenarbeit mit der Praxis geschehen, aber auch gemeinsam mit anderen Forschungsinstituten wie der WSL.

⁶ Beschreibung der Tools TBk und WIS.2 Cockpit unter <https://www.planfor.ch/de/content/tools>

9 Dank

Wir bedanken uns beim Wald- und Holzforschungsfonds für das Vertrauen und die finanzielle Unterstützung und speziell bei Thomas Bettler (BAFU) für die aktive und konstruktive Projektbegleitung. Weiter bedanken wir uns bei den Projektpartnern aus den Kantonen Bern, Glarus, Graubünden, Tessin, Waadt und Zürich für die Mitfinanzierung, die aktive Teilnahme an den Workshops, die wertvollen Rückmeldungen und das Bereitstellen von Daten. Ein spezieller Dank geht an Christian Ginzler und Leo Bont (beide WSL) für die Projektbegleitung und ihre Expertise, an Stefan Flückiger (FBB) für die enge Zusammenarbeit, für spezifische Feldverifizierungen, der Bereitstellung von Daten, Räumlichkeiten und das Mitwirken bei der Fachpublikation in der SZF.

10 Literaturverzeichnis

- Abdullah, Haidi; Skidmore, Andrew K.; Darvishzadeh, Roshanak; Heurich, Marco (2019) Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. In : *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, vol. 5, n° 1, p. 87-106. DOI: 10.1002/rse2.93.
- Breiman, Leo (2001) Random Forests. In : *Machine Learning*, vol. 45, n° 1, p. 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- Drusch, M.; Del Bello, U.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F. et al. (2012) Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. In : *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, p. 25-36.
- Fassnacht, Fabian Ewald; Latifi, Hooman; Stereńczak, Krzysztof; Modzelewska, Aneta; Lefsky, Michael; Waser, Lars T. et al. (2016) Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. In : *Remote Sensing of Environment*, vol. 186, p. 64-87. DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.013.
- Gorelick, Noel; Hancher, Matt; Dixon, Mike; Ilyushchenko, Simon; Thau, David; Moore, Rebecca (2017) Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. In : *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, p. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Kennedy, Robert; Yang, Zhiqiang; Gorelick, Noel; Braaten, Justin; Cavalcante, Lucas; Cohen, Warren; Healey, Sean (2018) Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. In : *Remote Sensing*, vol. 10, n° 5, p. 691. DOI: 10.3390/rs10050691.
- Kennedy, Robert E.; Yang, Zhiqiang; Cohen, Warren B. (2010) Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms. In : *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n° 12, p. 2897-2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
- Rosset; Sciacca; Flückiger; Fiedler (2019) Exercices de martelage et suivi sylvicole sur martelage.sylvotheque.ch (MSC). In : *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 170, n° 2, p. 94-109. DOI: 10.3188/szf.2019.0094.
- Runge, Alexandra; Grosse, Guido (2019) Applying both Landsat and Sentinel-2 data to LandTrendr for detection of landscape change trends in Arctic permafrost regions.
- Verbesselt, Jan; Hyndman, Rob; Newham, Glenn; Culvenor, Darius (2010) Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. In : *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n° 1, p. 106-115. DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.014.
- Verbesselt, Jan; Zeileis, Achim; Herold, Martin (2011) Near real-time disturbance detection in terrestrial ecosystems using satellite image time series: drought detection in Somalia. *Working Papers in Economics and Statistics*.
- Weber, Dominique; Ginzler, Christian; Flückiger, Stefan; Rosset, Christian (2018) Potenzial von Sentinel-2-Satellitendaten für Anwendungen im Waldbereich. In : *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 169, n° 1, p. 26-34. DOI: 10.3188/szf.2018.0026.
- Wohlgemuth, T.; Forster, B.; Gessler, A.; Ginzler, C.; Queloz, V.; Vitasse, Y.; & Rigling, A. (2018) Sommertrockenheit. Zunehmend eine Herausforderung für den Wald. In : *Wald und Holz*, vol. 99, n° 9, p. 18-19.

11 Anhang

11.1 Begleitgruppe

Die Begleitgruppe dieses Projektes setzt sich zusammen aus den Projektpartner und den externen Experten der WSL und hat durch ihre Beiträge an den Workshops einen wesentlichen Teil zum Projekterfolg beigetragen.

Projektpartner

Kanton Bern: Tuxa Ayús, Daniel Trüssel

Kanton Glarus: Maurus Frei

Kanton Graubünden: Riet Gordon

Kanton Tessin: Giorgio Moretti

Kanton Waadt: Thomas Zumbrunnen

Kanton Zürich: Denise Lüthy, Viktor Holdener

Forstbetrieb der Burgergemeinde Bern (FBB): Stefan Flückiger

BAFU, WHFF: Thomas Bettler

Externe Experten und Projektbegleitung

Christian Ginzler (WSL)

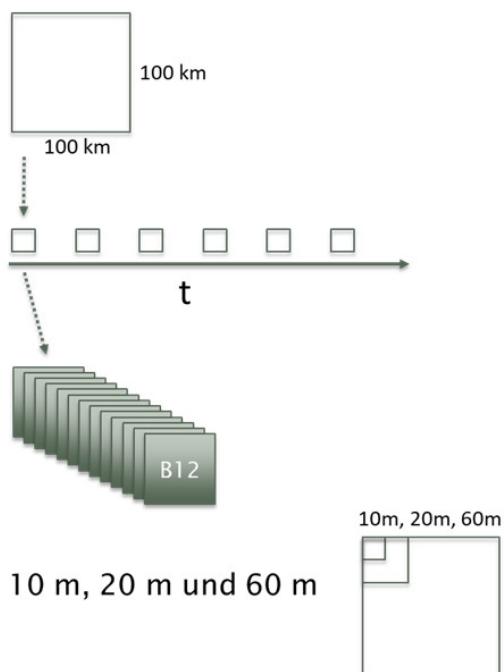
Leo Bont (WSL)

11.2 Ergänzende Informationen zu den Sentinel-2 Grundlagen

In diesem Kapitel finden Sie ergänzende Unterlagen zu den Sentinel-2 Grundlagen.

11.2.1 Übersicht Sentinel-2 Datenstruktur und Format

- ▶ Kachelgrösse 100 x 100 km



- ▶ Mind. alle 5 Tage eine Bild
(Achtung: Wolken etc.)

- ▶ 13 Bänder pro Aufnahme

- ▶ Rasterdaten mit Pixelgrössen von 10 m, 20 m und 60 m

Abb. 9: Sentinel-2-Daten werden als 100 x 100 km² Kacheln, alle 5 Tage mit 13 Spektralbändern als Rasterdaten bereitgestellt. Je nach Spektralband beträgt die räumliche Auflösung 10 m, 20 m oder 60 m.

Übersicht Kacheln im UTM-Grid für die Schweiz:

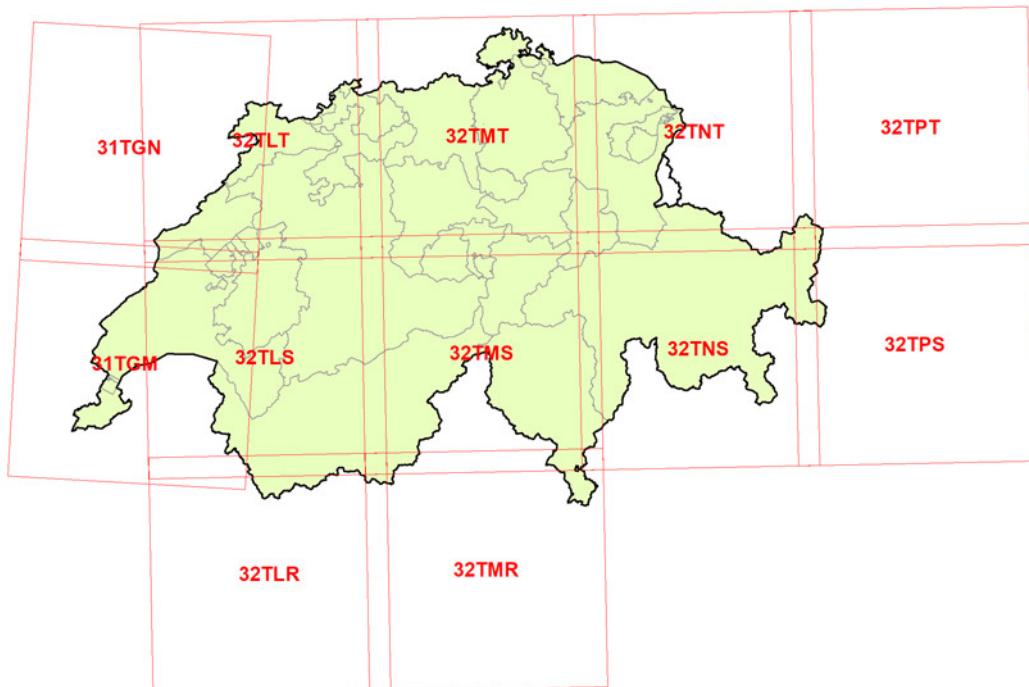


Abb. 10: Übersicht der im UTM-Grid bereitgestellten Sentinel-2-Daten für die Schweiz mit den dazugehörigen Bezeichnungen.

11.2.2 Typische RGB-Kombinationen

Sentinel-2-Daten werden typischerweise als RGB-Bilder dargestellt, dazu eignen sich verschiedene Kombinationen. Nachfolgend ein paar typische Beispiele:

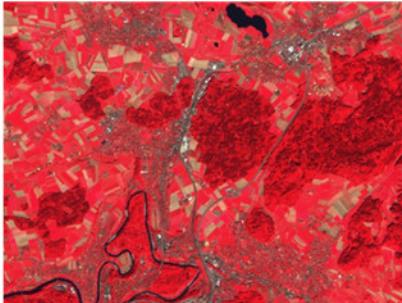
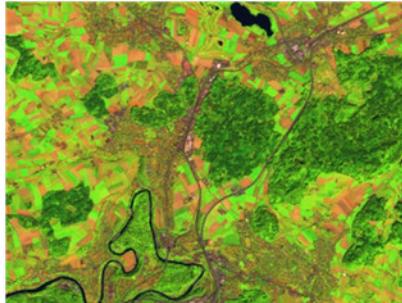
Echtfarbenbild	Farbinfrarot	Infrarot-RGB
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Reihenfolge (RGB): B4, B3, B2 ▶ Sichtbarer Spektralbereich ▶ Vertraut, einfache Interpretation ▶ Wälder erscheinen relativ dunkel 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Reihenfolge (RGB): B8, B4, B3 ▶ Beinhaltet Nahinfrarotbereich ▶ Wichtige Information bzgl. Vegetationszustand 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Reihenfolge (RGB): B11, B8, B2 ▶ Nahinfrarot (NIR) und Infrarot (SWIR) ▶ Vegetationszustand, z.B. im Winter (Laub- / Nadelholz) 

Abb. 11: Beispiele und grobe Beschreibung typischer Sentinel-2 RGB-Kombination mit der Angabe der Spektralbänder (B)

11.2.3 Vegetationsindizes

Nachfolgende Tabelle zeigt die im Rahmen dieses Projektes verwendeten Vegetationsindizes mit den entsprechenden Formeln.

Index	Beschreibung	Formel
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index Der NDVI ist der meistverbreitete Vegetationsindex. Das Verhältnis der Reflexionen im roten und nahen infraroten Spektralbereich ist ein Indikator für die Vitalität und die Produktivität von Pflanzen.	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$
NBR (NDII)	Normalized Difference Burn Ratio (mit Band 11) Der NBR wird auch NDII genannt (Normalized Difference Infrared Index). Der NBR wird häufig für die Erkennung von Waldbrandflächen aber auch für die Detektion anderer Waldveränderungen verwendet. Alternativ kann dieser Index auch mit dem Band 11, dem zweiten Band im kurzweligen Infrarotbereich, berechnet werden.	$(B8 - B12) / (B8 + B12)$ <i>Alternative:</i> $(B8 - B11) / (B8 + B11)$
NDRE	Normalized Difference Red-Edge Index Im Red-Edge-Bereich ändert sich die Reflexion in Abhängigkeit vom Chlorophyllgehalt der Pflanzen und der Zellstruktur der Blätter sehr schnell womit die NDRE-Indizes (auch mit B6 oder B7) für die Beurteilung der Vitalität geeignet sind.	$(B8 - B5) / (B8 + B5)$ <i>Alternative:</i> $(B8 - B6) / (B8 + B6)$ $(B8 - B7) / (B8 + B7)$

Tab. 5: Berechnung verschiedener, typischer Vegetationsindizes mit den Sentinel-2-Bändern (B).

11.3 Laub- / Nadelholz: Spektrale Signaturen und Phänologie

Mit der spektralen Signatur ist das Muster der Reflexionswerte über die verschiedenen Spektralbänder gemeint. Die spektralen Signaturen zwischen Laub- und Nadelholz sind unterschiedlich und dies bildet die Basis für eine automatische Klassifizierung (Abb. 12).

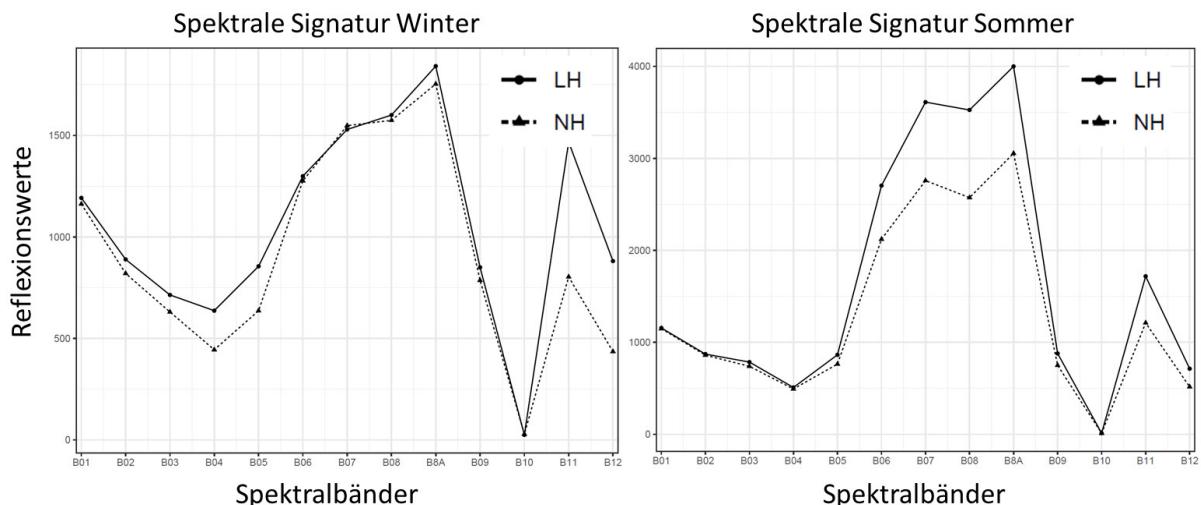


Abb. 12: Darstellung der spektralen Signatur der 13 Spektralbändern von Sentinel-2 für eine Aufnahme im Winter und Sommer und für die Kategorien Laubholz (LH) und Nadelholz (NH). Die Felddaten stammen aus der Betriebsinventur des Forstbetriebs der Burgergemeinde (MOTI Inventurdaten, ca. 2000 Flächen).

Der Jahresverlauf des Vegetationsindex NDVI verläuft in Abhängigkeit vom Mischungsgrad unterschiedlich. Die Verwendung von Sentinel-2-Daten zu geeigneten Zeitpunkten ist für die Unterscheidung wichtig (Abb. 13).

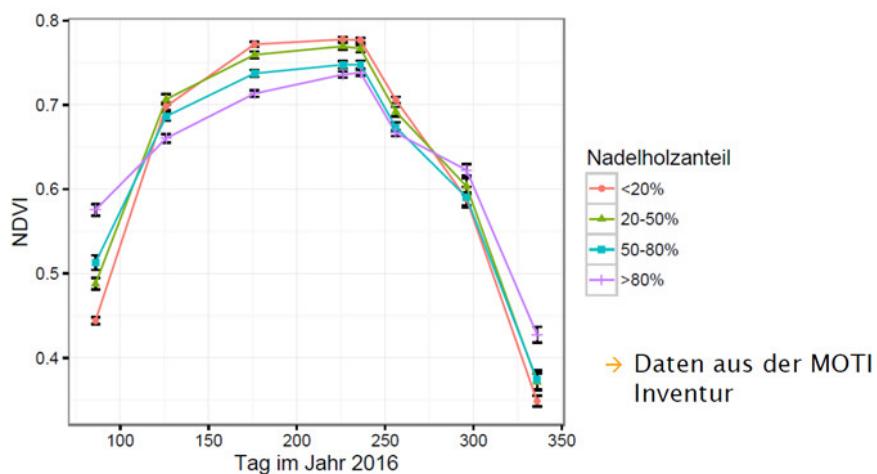


Abb. 13: Dargestellt des Jahresverlauf des Vegetationsindexes NDVI in Beständen unterschiedlichen Mischungsgrades aus der Betriebsinventur des Forstbetriebs der Burgergemeinde (MOTI Inventurdaten, ca. 2000 Flächen)

11.4 Merkblätter

Die Merkblätter dienen als Dokumentation für die Anwendung der entwickelten Methoden. Im Rahmen der FOWALA-Kursreihe werden auch Videoanleitungen und Übungsdaten bereitgestellt (siehe Kapitel 7.2).

11.4.1 Merkblatt jährliche Waldveränderungen

Dank der hohen zeitlichen Auflösung von Sentinel-2-Daten stehen mit hoher Wahrscheinlichkeit jedes Jahr wolkenfreie Sommerbilder zur Verfügung und diese können für die Erfassung von jährlichen Veränderungen genutzt werden. Dabei werden die Unterschiede zwischen zwei Zeitpunkten berechnet und die Veränderungsflächen mittels geeigneten Schwellenwerts ausgeschieden. Informationen für die objektive Einschätzung und das Monitoring der forstlichen Eingriffe können somit relativ einfach und grossflächig generiert werden. Aufgrund der räumlichen Auflösung von 10 m und der Sicht von oben werden primär flächige Veränderungen (ab mehreren Bäumen) im Kronendach (Hautschicht) erkannt.

Methode

Für die Erkennung von forstlichen Eingriffen eignet sich die jährliche Auflösung: Damit können Sommerbilder mit vergleichbarem Vegetationszustand (z.B. Juli) verwendet werden und Holzschläge, welche meist im Winter stattfinden, sind im immer noch gut erkennbar. Veränderungen im Kronendach lassen sich am besten mit Vegetationsindizes wie dem NDVI oder NBR erkennen (siehe Tab. 5). Detektiert werden diese mittels Differenzbildung, z.B. zwischen den NBR-Werten aus den Jahren 2016 und 2017 ($\Delta\text{NBR} = \text{NBR}_{2017} - \text{NBR}_{2016}$). Das Resultat dieser Differenzbildung ist ein Raster, welcher die Veränderung pro Pixel (10 m Auflösung) darstellt. Um daraus die effektiven Veränderungsflächen auszuscheiden, wird ein Schwellwert festgelegt. Dieser kann durch Stichproben in bekannten Veränderungsflächen, durch Expertenwissen oder exploratives Ausprobieren bestimmt werden. Ein Wert von 0.1 bildet eine gute Basis für eine erste grobe Einschätzung (getestet mit Level-1C Daten).

Grobes Vorgehen

1. Zwei wolkenfreie Sentinel-2-Sommerbilder aussuchen und herunterladen (Level-1C)
2. Berechnung des Vegetationsindizes (NDVI, NBR) pro Zeitpunkt (z.B. ArcGIS Raster Calculator)
3. Differenzbildung zwischen den zwei Zeitpunkten (z.B. ArcGIS Raster Calculator)
4. Festlegen eines Schwellenwertes, Generierung der Veränderungskarte (z.B. ArcGIS Reclassify)
5. Umwandlung des Veränderungsraster in ein Shapefile (z.B. ArcGIS Raster to Polygon)
6. Berechnung der mittleren Ab- oder Zunahme des Vegetationsindizes

Resultat

Das Resultat ist ein ESRI Shapefile mit den detektierten Waldveränderungen, dargestellt als Polygone. Pro Polygon kann der Typ (positiv, negativ) und die Stärke der Veränderung ermittelt werden. Im Falle von $\Delta\text{NBR} = \text{NBR}_{2017} - \text{NBR}_{2016}$ beschreiben positive Werte eine Zunahme der Vegetationsaktivität, also z.B. die Erholung nach einem Holzschlag zwischen 2016 und 2017, negative Werte hingegen, dass ein forstlicher Eingriff zwischen 2016 und 2017 stattfand. Die Veränderungsflächen können in einem GIS dargestellt werden und z.B. mit anderen Daten (Vegetationshöhenmodell, Bestandeskarte, Laub-/Nadelholzkarte) überlagert werden.

Einschränkungen und Schlussfolgerung

Die Bestimmung eines geeigneten Schwellenwertes ist zentral. Ist dieser zu hoch, werden nur grobe Veränderungen erkannt, ist dieser tief, steigt die Wahrscheinlichkeit das Flächen ausgeschieden werden, auf denen keine Veränderung stattfand. Ein Schwellenwert von 0.1 (also z.B. für Abnahmen ≤ -0.1) ist eine gute Richtgröße (für Level-1C Daten getestet), könnte durch Stichproben in bekannten Veränderungsflächen, durch Expertenwissen oder exploratives Ausprobieren noch genauer bestimmt werden. Eine dynamische Anpassung des Schwellenwerts je nach Anwendung, Gebiet oder Walstrukturtyp gilt es zu prüfen. Innerhalb des definierten Zeitfensters können verschiedene Veränderungen auftreten (z.B. forstliche Eingriffe, Sturmschäden, Vitalitätsverlust), die jedoch schwierig zu unterscheiden sind. Für grosse Gebiete kann die Verfügbarkeit von komplett wolkenfreien Bildern

problematisch sein. Eine einfache Methode dieses Problem zu umgehen ist in Kapitel 6.3 mit der NDVI_{max} Methode beschrieben.

Beispiel R-Skript ($\Delta\text{NDVI}_{2018-2017}$)

```
#####
# Simple annual change detection using Sentinel-2 data and ndvi threshold
#
# Script prepared by Dominique Weber, HAFL, BFH
#####

library(raster)
library(sp)
library(rgdal)

# forest mask
sp = readOGR("../perimeter/waldmaske_wgs84.shp")

# 2018 ndvi
b4_2018 =
raster("../sentinel2/S2A_MSIL1C_20180704T103021_N0206_R108_T32TLT_20180704T174024.SAFE/GRAN
ULE/L1C_T32TLT_A015835_20180704T103023/IMG_DATA/T32TLT_20180704T103021_B04.jp2")
b8_2018 =
raster("../sentinel2/S2A_MSIL1C_20180704T103021_N0206_R108_T32TLT_20180704T174024.SAFE/GRAN
ULE/L1C_T32TLT_A015835_20180704T103023/IMG_DATA/T32TLT_20180704T103021_B08.jp2")
ndvi_2018 = (b8_2018 - b4_2018) / (b8_2018 + b4_2018)

# 2017 ndvi
b4_2017 =
raster("../sentinel2/S2A_MSIL1C_20170619T103021_N0205_R108_T32TLT_20170619T103021.SAFE/GRAN
ULE/L1C_T32TLT_A010401_20170619T103021/IMG_DATA/T32TLT_20170619T103021_B04.jp2")
b8_2017 =
raster("../sentinel2/S2A_MSIL1C_20170619T103021_N0205_R108_T32TLT_20170619T103021.SAFE/GRAN
ULE/L1C_T32TLT_A010401_20170619T103021/IMG_DATA/T32TLT_20170619T103021_B08.jp2")
ndvi_2017 = (b8_2017 - b4_2017) / (b8_2017 + b4_2017)

# NDVI diff
ndvi_diff = ndvi_2018 - ndvi_2017

# crop & clip to forest mask
ndvi_diff = crop(ndvi_diff, sp)
ndvi_diff = mask(ndvi_diff, sp)
writeRaster(ndvi_diff, "results/ndvi-diff.tif")

# classify change
hist(getValues(ndvi_diff), breaks=100)
strong_decrease = ndvi_diff < -0.1
medium_decrease = ndvi_diff < -0.05

# plot change
par(mfrow=(c(1,2)))
plot(strong_decrease, main="NDVI decrease > 0.1")
plot(medium_decrease, main="NDVI decrease > 0.05")
par(mfrow=(c(1,1)))

# write result
writeRaster(strong_decrease, "results/ndvi_diff_forest_01.tif", datatype="INT1U", overwrite=T)
```

11.4.2 Merkblatt natürliche Störungen

Die hohe zeitliche Auflösung (mind. alle 5 Tage) von Sentinel-2-Daten bietet die Möglichkeit natürliche Störungen wie Sommersturmschäden oder Waldbrände zeitnah zu erfassen. Zahlreiche spezifische Indizes und Bandkombinationen stehen bereits zur Verfügung, die für die Erkennung von verschiedenen Typen von Störungen eingesetzt werden können. Dabei werden die Veränderungen zwischen zwei Zeitpunkten mittels geeigneten Schwellenwerts ausgeschieden und können als ESRI Shapefile zur Verfügung gestellt werden. Somit bietet Sentinel-2 die Möglichkeit für das rasche Schaffen von Übersichten nach natürlichen Störungen. Aufgrund der räumlichen Auflösung von 10 m und der Sicht von oben werden primär flächige Veränderungen (ab mehreren Bäumen) im Kronendach (Hautschicht) erkannt. Der methodische Ansatz ist identisch zur Erfassung jährliche Waldveränderungen (siehe Merkblatt).

Methode

Für die Erkennung von natürlichen Störungen werden die Unterschiede zwischen Sentinel-2-Daten kurz vor und nach dem Störungseignis mit einem geeigneten Vegetationsindex untersucht. Entscheidend für eine zeitnahe Erfassung der Veränderung und eine dem Ereignis explizite Zuweisung ist dabei die Verfügbarkeit von wolkenfreien Bildern. Wie für forstliche Eingriffe eignen sich auch hier die Vegetationsindexe NDVI oder NBR (siehe Anhang 11.4.1, Tab. 5). Detektiert werden die Veränderungen mittels Differenzbildung, z.B. zwischen den NBR-Werten vor und nach einem Sturm ($\Delta\text{NBR} = \text{NBR}_{\text{vor_Sturm}} - \text{NBR}_{\text{nach_Sturm}}$). Das Resultat dieser Differenzbildung ist ein Raster, welcher die Veränderung pro Pixel (10m Auflösung) aufzeigt, wobei hohe Werte darauf hindeuten, dass der Anteil an gesunder Vegetation stark abgenommen hat. Um daraus die effektiven Schadflächen auszuscheiden, wird ein Schwellwert festgelegt. Dieser kann durch Stichproben in bekannten Gebieten, durch Expertenwissen oder exploratives Ausprobieren bestimmt werden.

Grobes Vorgehen

1. Zwei wolkenfreie Sentinel-2-Sommerbilder aussuchen und herunterladen (Level-1C)
2. Berechnung des Vegetationsindexes NBR pro Zeitpunkt (z.B. ArcGIS Raster Calculator)
3. Differenzbildung zwischen den zwei Zeitpunkten (z.B. ArcGIS Raster Calculator)
4. Festlegen eines Schwellenwertes, Generierung der Veränderungskarte (z.B. ArcGIS "Reclassify")
5. Umwandlung des Veränderungsraster in ein Shapefile (z.B. ArcGIS Raster to Polygon)
6. Berechnung der mittleren Ab- oder Zunahme des Vegetationsindexes

Resultat

Das Resultat ist ein ESRI Shapefile mit den detektierten Veränderungsflächen, dargestellt als Polygone. Pro Polygon kann die Stärke der Störung/Veränderung ermittelt werden. Die Veränderungsflächen können in einem GIS dargestellt werden und z.B. mit anderen Daten (Vegetationshöhenmodell, Bestandeskarte, Laub-/Nadelholzkarte) überlagert werden.

Einschränkungen und Schlussfolgerung

Die Anzahl der effektiv nutzbaren Sentinel-2-Daten wird von Wolken stark beeinflusst, insbesondere in gewissen Jahreszeiten und Regionen. Die zeitnahe Erfassung von Veränderungen ist abhängig von wolkenfreien Bildern. Stehen kurz vor und nach dem Störungseignis keine wolkenfreien Bilder zur Verfügung, sind die Veränderungen nicht mehr eindeutig identifizierbar, bzw. kaum zu unterscheiden von Aufräumarbeiten, Holzschlägen und anderen Veränderungen. Für die zuverlässige Erkennung von Veränderungen müssen die zwei Zeitpunkte vergleichbar sein (Vegetationszustand). Z.B. lassen sich Bilder zwischen März und Juni schlecht vergleichen, da der Vegetationszustand und die Beleuchtung (Belaubung, Sonnenstand, Schattenwurf) sehr unterschiedlich sind. Veränderungen in Laubholzflächen im Winter sind schwierig zu detektieren, da die spektralen Eigenschaften im laublosen Zustand von einer Störung wenig beeinflusst werden. Die Bestimmung eines geeigneten Schwellenwertes ist zentral. Ist dieser zu hoch, werden nur grobe Veränderungen erkannt, ist dieser sehr tief, steigt die Wahrscheinlichkeit das Flächen ausgeschieden werden, auf denen keine Veränderung stattfand.

Beispiel R-Skript ($\Delta\text{NBR}_{\text{Aug2017-Jul2017}}$)

```
#####
# Summer strom damage detection using Sentinel-2 data
#
# Script prepared by Dominique Weber, HAFL, BFH
#####

library(raster)
library(sp)
library(rgdal)

# pre storm image and NBR
pre_strom = stack("../sentinel2/S2A_MSIL1C_20170706_sub.tif")
names(pre_strom) = c("B01", "B02", "B03", "B04", "B05", "B06", "B07", "B08", "B08A", "B09", "B10", "B11", "B12")
nbr_pre_strom = (pre_strom$B08 - pre_strom$B12) / (pre_strom$B08 + pre_strom$B12)

# post storm image and NBR
post_strom = stack("../sentinel2/S2A_MSIL1C_20170815_sub.tif")
names(post_strom) = c("B01", "B02", "B03", "B04", "B05", "B06", "B07", "B08", "B08A", "B09", "B10", "B11", "B12")
nbr_post_strom = (post_strom$B08 - post_strom$B12) / (post_strom$B08 + post_strom$B12)

# NBR diff
nbr_diff = nbr_post_strom - nbr_pre_strom

# plot overview
plotRGB(post_strom, 4, 3, 2, stretch="lin", axes=T)

# crop & clip to forest mask
nbr_diff = crop(nbr_diff, drawExtent())

# classify change
hist(getValues(nbr_diff), breaks=100)
strong_decrease = nbr_diff < -0.1
medium_decrease = nbr_diff < -0.05

# plot change
par(mfrow=(c(1,2)))
plot(strong_decrease, main="NBR decrease > 0.1")
plot(medium_decrease, main="NBR decrease > 0.05")
par(mfrow=(c(1,1)))

# write result
writeRaster(strong_decrease, "nbr_diff_01.tif", datatype="INT1U", overwrite=T)
```

11.4.3 Merkblatt Klassifikation von Laub- bzw. Nadelholzflächen

Dank der hohen zeitlichen Auflösung von Sentinel-2, dürfte für jede beliebige Region in der Schweiz ein aktuelles und wolkenfreies Winter- wie auch Sommerbild verfügbar sein. Dies ermöglicht eine zuverlässige Unterscheidung von Laub- und Nadelholzflächen aufgrund der spektralen Eigenschaften (z.B. Blattfarbe) und der zeitlichen Entwicklung (belaubt/nicht belaubt). Um diese Informationen flächendeckend zu generieren, wird eine auf Referenzdaten (Stichproben) basierende überwachte Klassifizierung durchgeführt.

Methode

Für die Klassifizierung von Laub- und Nadelholzflächen werden mehrere wolkenfreie Sentinel-2-Bilder ausgewählt. Diese sollen mindestens den Winter- und Sommerzustand abdecken, wobei die Modelgenauigkeit mit zusätzlichen Bildern (z.B. Frühling, Herbst) erhöht werden kann. Für die überwachte Klassifizierung wird *Random Forest*, ein auf Entscheidungsbäumen basierendes Verfahren eingesetzt (Breiman 2001). Dabei werden sogenannte Trainingsdaten verwendet, um statistische Beziehungen zwischen den Zielklassen (Laub- / Nadelholz, evtl. Mischwald) und den spektralen Informationen der Sentinel-2-Daten herzustellen. Mit den daraus generierten Entscheidungsbäumen können Laub- und Nadelholzflächen grossflächig kartiert werden. Die Trainingsdaten sollen möglichst repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet sein und können sowohl aus Feldaufnahmen wie auch aus Luftbildinterpretationen stammen. Die Qualität der Trainingsdaten ist für die Modelgenauigkeit entscheidend.

Generelles Vorgehen

1. Mindestens ein Winter- und Sommerbild aussuchen und herunterladen. Die Bilder sollen wolkenfreie und möglichst homogen für das gesamte Untersuchungsgebiet. (Vegetationszustand, Beleuchtung etc.) sein.
2. Trainingsdaten generieren: Repräsentative Stichproben (Feldaufnahme oder Luftbildinterpretation) für die gewünschten Zielklassen (Laub- / Nadelholz, evtl. Mischwald) als ESRI-Shapefile (Punkte oder Polygone) bereitstellen. Dabei soll jede Klasse mindestens ca. 30-mal vorkommen, bei grösseren Untersuchungsgebieten (Ebene Kanton) besser ca. 100-mal.
3. Spektrale Informationen extrahieren: Für alle Trainingsdaten und Sentinel-2-Bilder werden die spektralen Informationen aller Bänder und zusätzlicher Vegetationsindizes extrahiert und als Tabelle abgespeichert.
4. Random Forest Modell anwenden: Auf Basis der extrahierten spektralen Informationen werden mit Random Forest Entscheidungsbäume für die überwachte Klassifizierung generiert (R-Package).
5. Räumliche Vorhersage: Das Random Forest Modell wird für die flächendeckende Klassifizierung aller Pixel in Laub- bzw. Nadelholz auf das gesamte Untersuchungsgebiet angewendet.

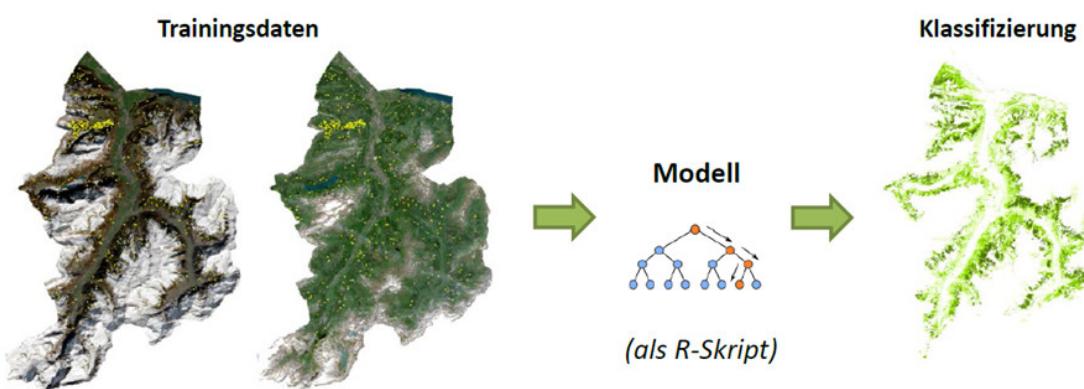


Abb. 14: Grobe Übersicht des Vorgehens am Beispiel vom Kanton Glarus bei welchem mit zwei Sentinel-2-Bildern, 375 Trainingsdaten eine Gesamtgenauigkeit von ca. 85% erreicht wurde für die Klassen Laubholz, Mischwald, Nadelholz.

Resultat

Das Resultat ist eine flächendeckende Klassifizierung aller Pixel (10 m Auflösung) in Laub- bzw. Nadelholz, bereitgestellt als Rasterdatei. Auch zusätzliche Klassen wie Mischwald können in

Abhängigkeit der Trainingsdaten generiert werden. Random Forest kann auch für die stufenlose Bestimmung (Regression) des Laub- bzw. Nadelholzanteils eingesetzt werden. Zusätzlich stehen nach jeder Klassifikation Informationen über die Modelgenauigkeit, sowie Angaben zur Wahrscheinlichkeit der Vorhersage pro Pixel zur Verfügung. Alle räumlichen Informationen (Rasterdaten) können in einem GIS dargestellt werden und z.B. mit anderen Daten (Vegetationshöhenmodell, Bestandeskarte etc.) überlagert werden.

Einschränkungen und Schlussfolgerung

Die entwickelte Methode ist relativ einfach und wurde anhand verschiedener Gebiete getestet. Es wird eine für die Praxis zweckmässige Genauigkeit erreicht und die Informationen können ohne grossen Aufwand aktualisiert werden. Die Modelgenauigkeit ist stark von den Trainingsdaten abhängig. Diese sollen möglichst repräsentativ für das gesamte Gebiet sein (Waldstrukturen, Topographie, Klima etc.). Die Anzahl der effektiv nutzbaren Sentinel-2-Daten wird von Wolken stark beeinflusst, insbesondere in gewissen Jahreszeiten und Regionen. Für grossflächige Anwendungen (Kanton, Schweiz) müssen allenfalls wolkenfreie Mosaiken aus mehreren Zeitpunkten generiert werden. Für eine zuverlässige Klassifizierung muss die Lärche bei den Trainingsdaten repräsentativ vertreten sein und es braucht zusätzliche Sentinel-2-Bilder im Frühling und Herbst oder die Lärche kann als separate Klasse betrachtet werden. Schatten, insbesondere in steilen Nordhängen können zu Fehlklassifizierungen führen und müssen evtl. im Vorhinein ausmaskiert werden.

11.5 Zeitreihenanalyse

Ergänzendes Bildmaterial zum Kapitel 6, Zeitreihenanalyse und Monitoring

11.5.1 Übersicht der Auswertung von Satellitenzeitreihen am Beispiel des NDVI

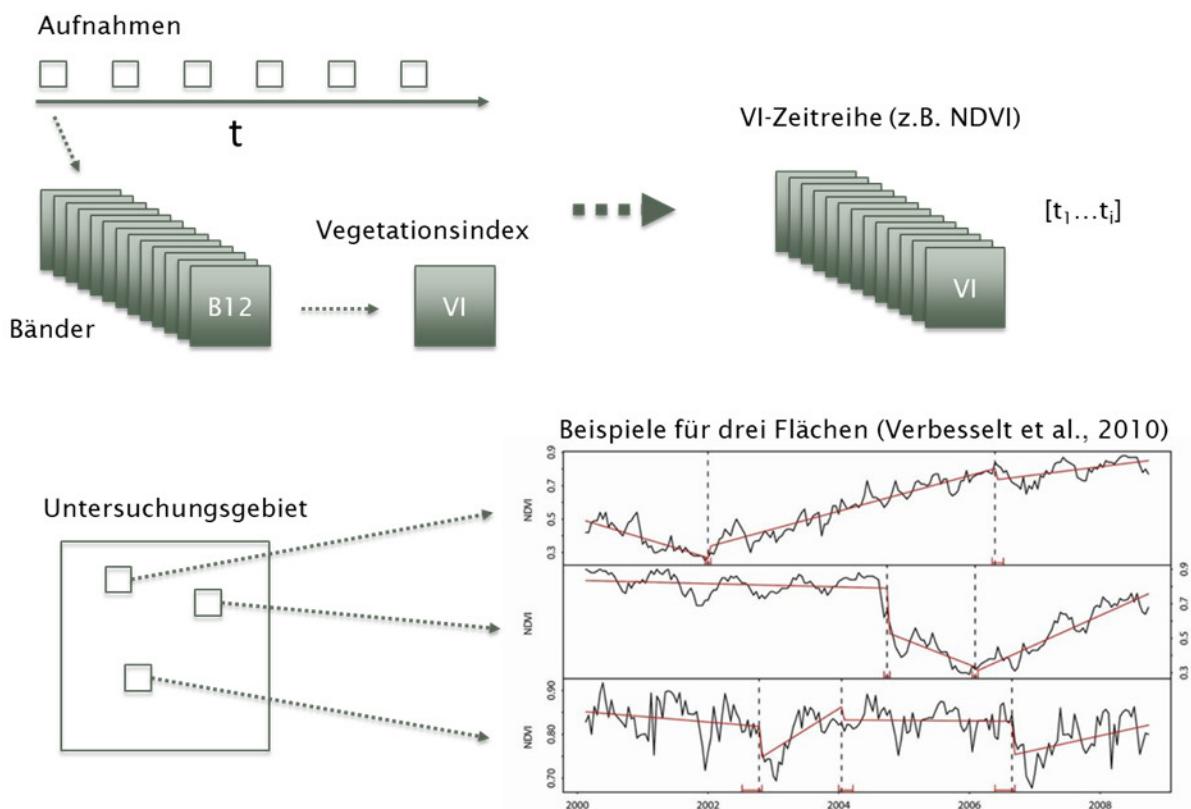


Abb. 15: Übersicht der Auswertung von Satellitenzeitreihen am Beispiel des NDVI: Sentinel-2-Daten stehen alle 5 Tage zur Verfügung (links oben), daraus können Vegetationsindizes und Zeitreihen generiert (rechts oben) und für jeden Pixel (links unten) Veränderungen und Trends detektiert werden (rechts unten).

11.5.2 Darstellung von NDVI-Zeitreihen im EO-Browser

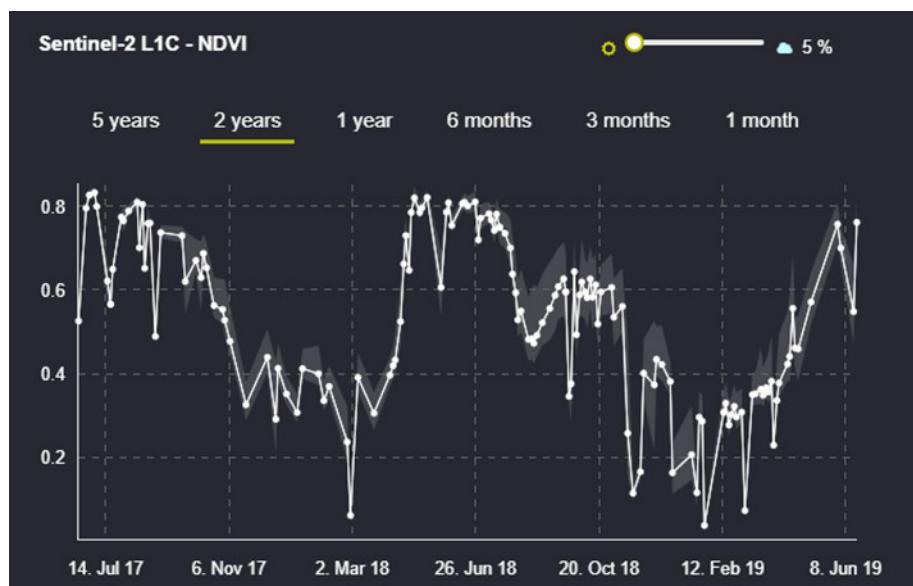


Abb. 16: Beispiel einer NDVI-Zeitreihe für eine vom Trockenstress 2018 betroffene Fläche (Ziegelbrücke) mit dem EO-Browser von Sentinel Hub (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>). Der NDVI-Einbruch ab Juli 2018 ist gut ersichtlich.

11.5.3 Analyse von Satellitenzeitreihen mit BFAST

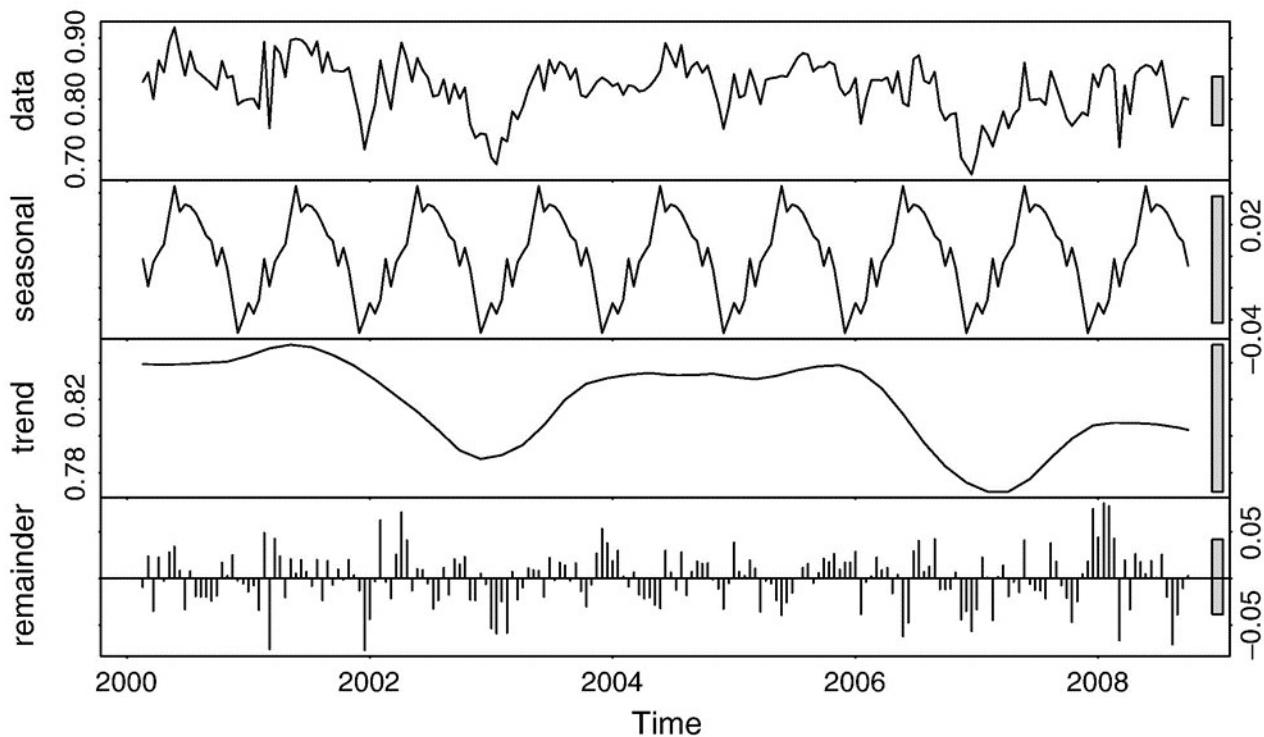


Abb. 17: Beispiel der Komponentenzerlegung von Satellitenzeitreihen in Saison, Trend und «Rest» mit BFAST, einem Tool für die automatische Detektion von Trends und abrupten Veränderungen (Verbesselt et al. 2010).

11.5.4 Beispiel einer Auswertung mit BFAST Monitor

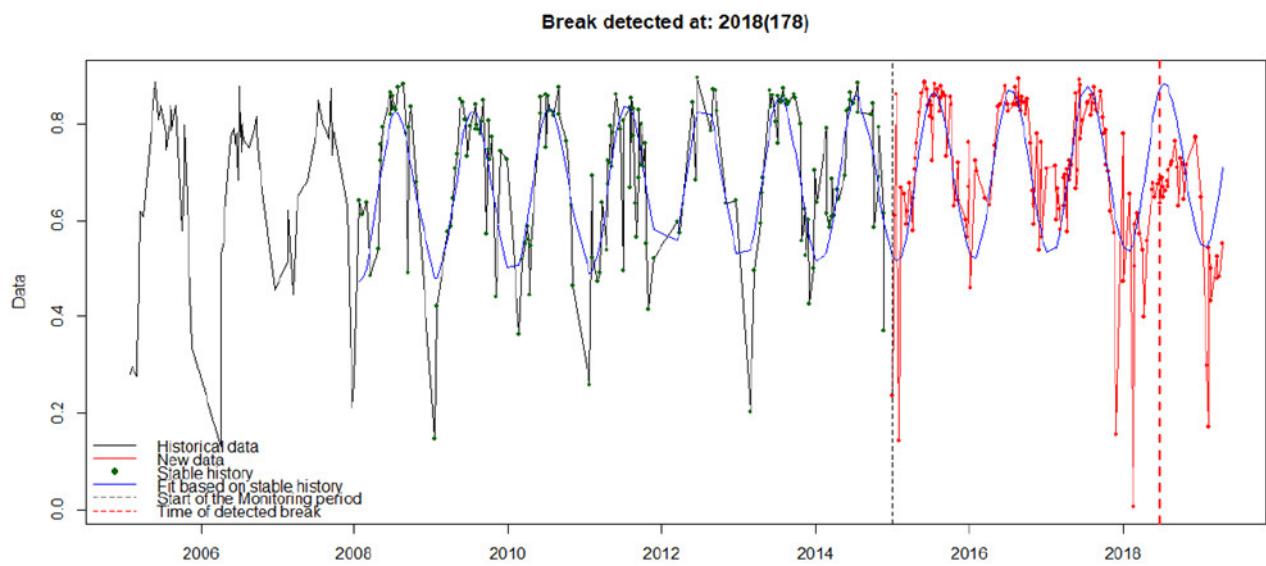


Abb. 18: Auswertung mit BFAST Monitor (Verbesselt, Zeileis et Herold 2011) für eine Beispieldfläche in der Nähe von Bern, auf welcher ca. 2018 eine Räumung stattfand. Diese starke Veränderung wurde im überwachten Zeitfenster (ab 2015, roter Bereich) automatisch vom Algorithmus erkannt (rote vertikale Linie).

11.5.5 Trockenstress 2018 in der Region Walensee

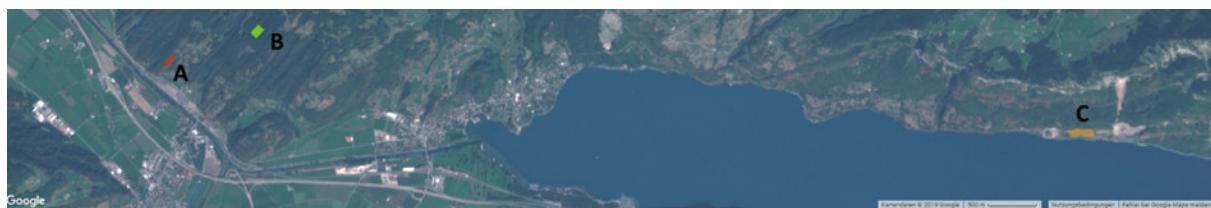


Abb. 19: Übersicht der untersuchten Waldflächen mit sichtbaren Trockenstress (A, C) und ohne sichtbaren Trockenstress (B) in der Region Walensee.

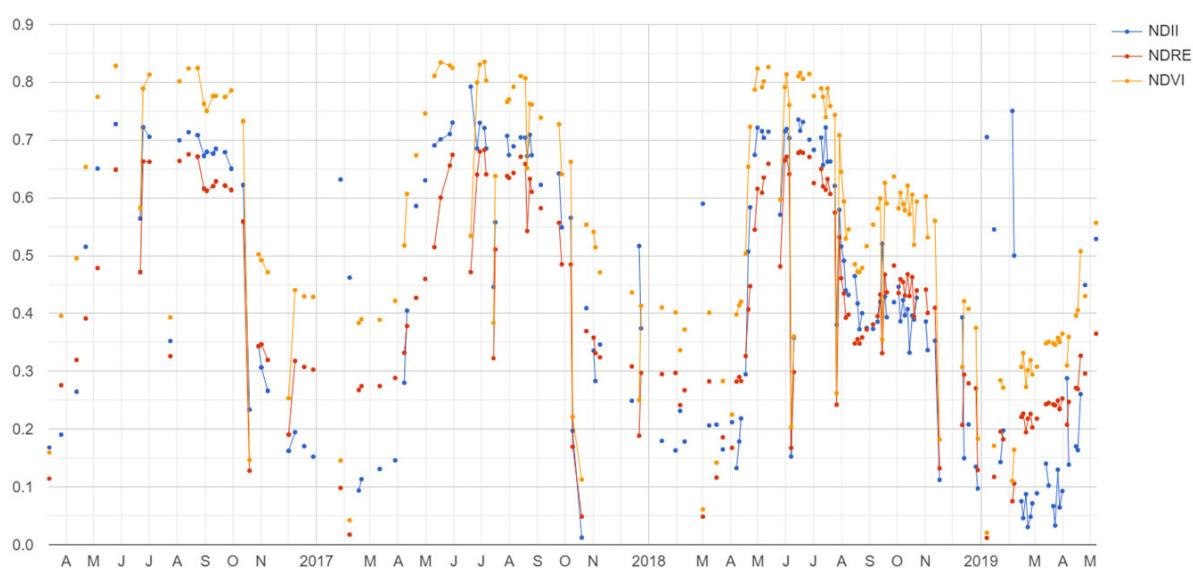


Abb. 20: Waldfläche mit sichtbaren Trockenstress oberhalb des Bahnhof Ziegelbrücke (Fläche A). Die Zeitreihe wurde mit der Google Earth Engine generiert.

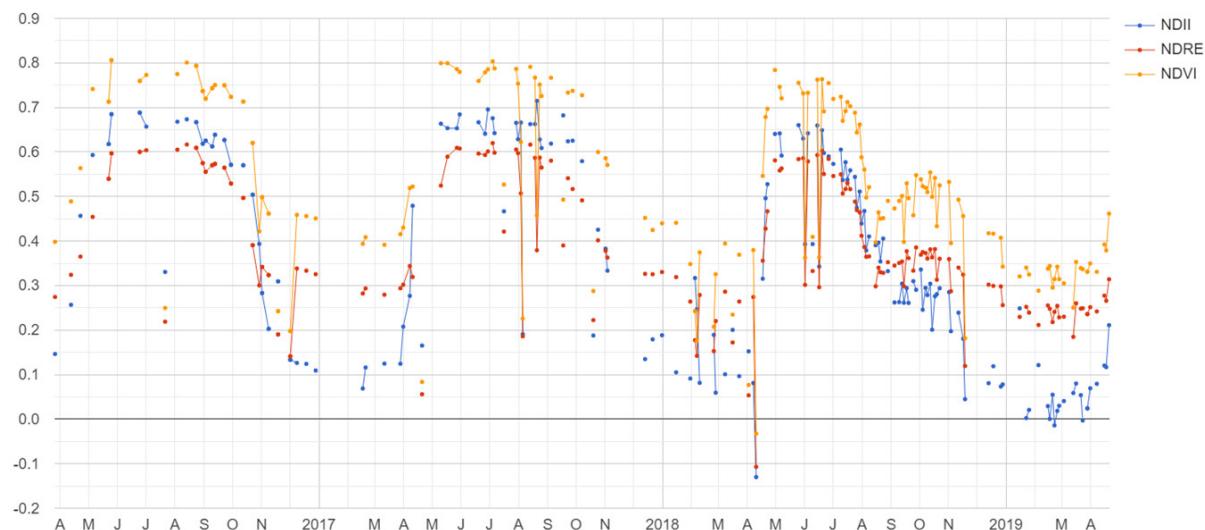


Abb. 21: Waldfläche mit sichtbaren Trockenstress nördlich des Walensee (Fläche C). Die Zeitreihe wurde mit der Google Earth Engine generiert.

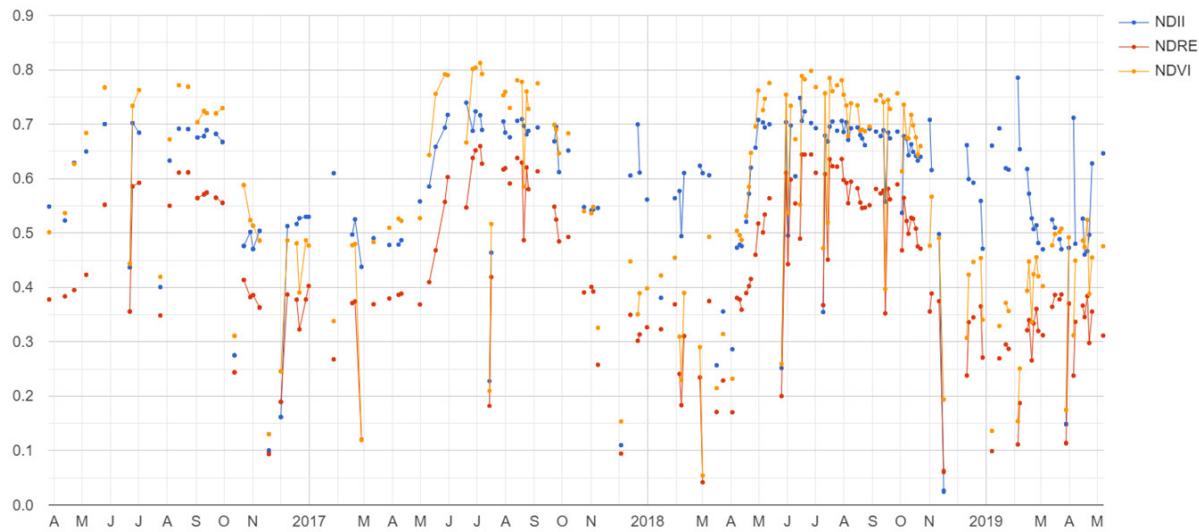


Abb. 22: Waldfläche ohne sichtbaren Trockenstress (Fläche B). Die Zeitreihe wurde mit der Google Earth Engine generiert.

11.5.6 Dauerbeobachtungsflächen (PPSS)

Nachfolgend eine Landsat-Zeitreihe für die Fläche «PPSS 06»:

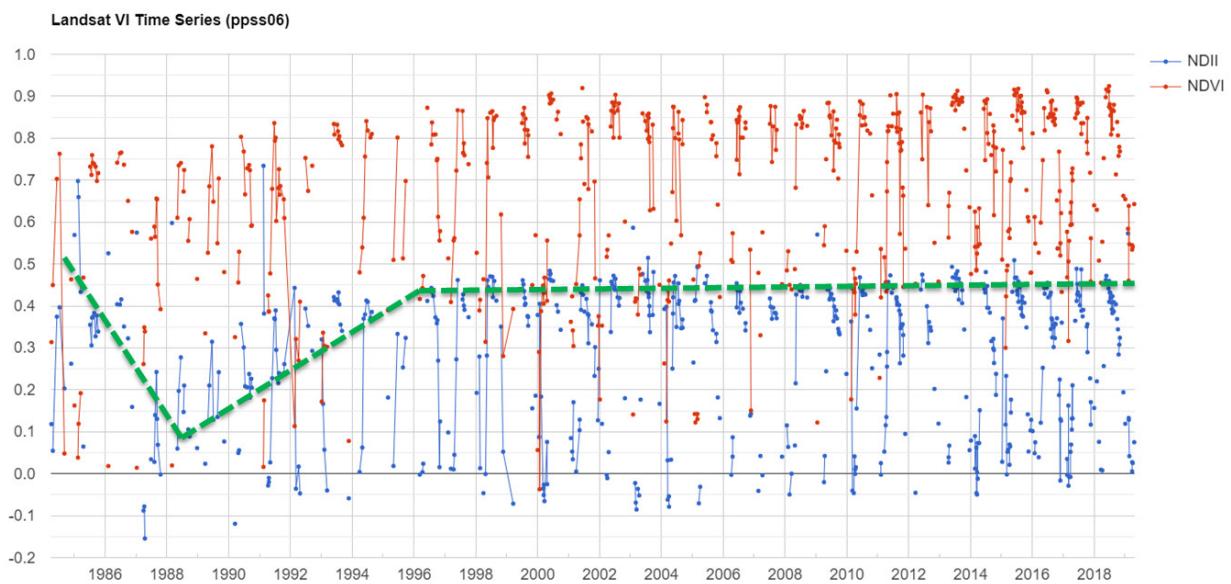


Abb. 23: Das Beispiel einer Landsat-Zeitreihe für die PPSS Fläche 06 zeigt die Räumung einer Fläche (ca. 1987) und die Entwicklung nach der darauffolgenden Eichenpflanzung. Mit grün sind mögliche Trends des NDII hervorgehoben (manuell eingetragen).

Nachfolgend eine Landsat-Zeitreihe für die Fläche «PPSS 17»:

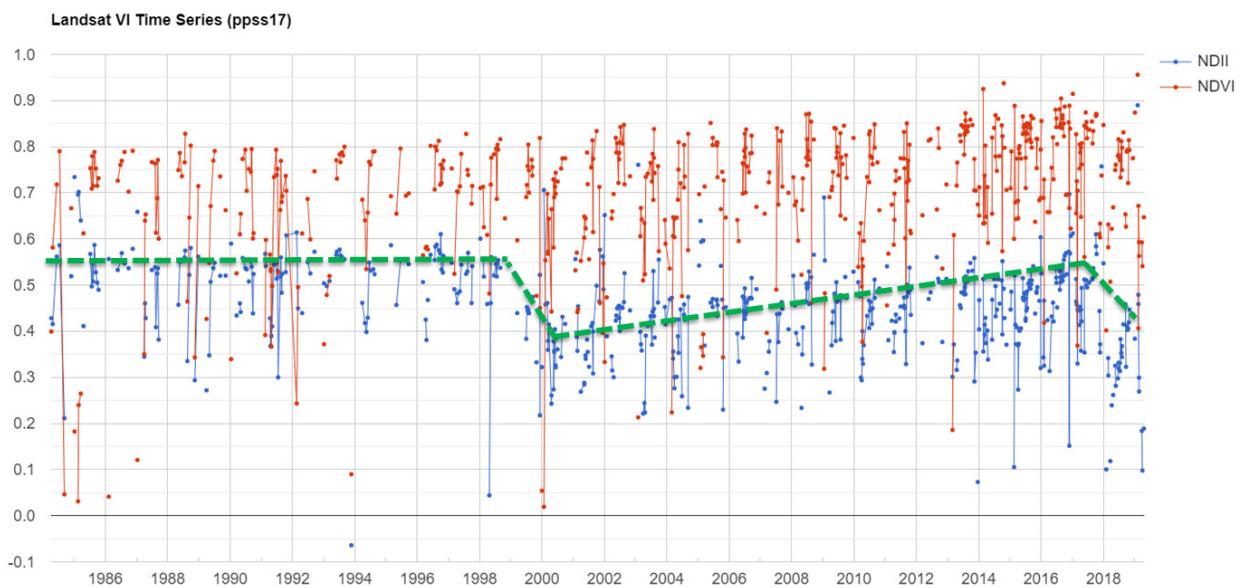


Abb. 24: Das Beispiel einer Landsat-Zeitreihe für die PPSS Fläche 17 zeigt möglicherweise Veränderungen im Zusammenhang mit dem Sturm Lothar (1999) sowie ein starker forstlicher Eingriff (2018). Mit grün sind mögliche Trends des NDII hervorgehoben (manuell eingetragen).

11.5.7 NDVI-Maximum

Beispiel der schweizweiten Erfassung von groben Waldveränderungen zwischen 2017 und 2018 mit der NDVI-Maximum Methode. Das Resultat wurde auf die Waldmaske zugeschnitten und kann als WMS-Service einfach und effizient in existierende GIS-Plattformen integriert werden.



Abb. 25: Differenzbildung der NDVI-Max. Sommerwerte 2017/2018 als einfache Methode für die schweizweite Erfassung von groben Waldveränderungen.

11.6 Sentinel-2 Übersichtsblatt

