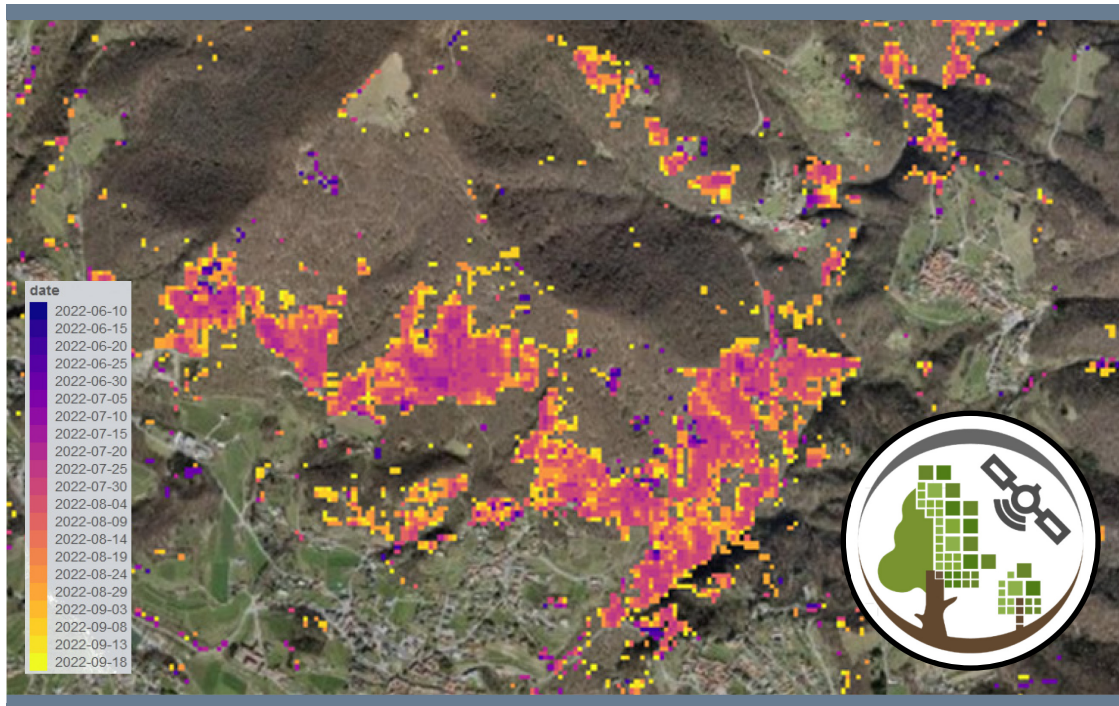




Im Auftrag des BAFU

Trockenheit mit Sentinel 2 beobachten am Beispiel von Mendrisiotto (TI)

Schlussbericht

Auftragnehmer:

Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (BFH-HAFL)
Waldwissenschaften

Attilio Benini, Hannes Horneber, Christian Rosset
Dezember 2023

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abteilung Wald
CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragsnehmer

Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (BFH-HAFL)
Waldwissenschaften
Länggasse 85, 3052 Zollikofen

Projektsupervision

Christian Rosset (BFH-HAFL)

Projektleitung

Hannes Horneber (BFH-HAFL)

Projektmitarbeitende

Attilio Benini (BFH-HAFL)

Begleitung BAFU

Roberto Bolgè, Abteilung Wald, Sektion Walderhaltung und Waldpolitik

Datum

Dezember 2023

Zitiervorschlag

Rosset C., Horneber H., Benini A. (2023): Trockenheit mit Sentinel 2 beobachten am Beispiel von Mendrisiotto (TI), Schlussbericht. 21 S.

Hinweis

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	4
2	Projektziele	4
3	Projektentwicklung	5
4	Methode	6
4.1	Datengrundlage	6
4.2	Klassifizierung	10
4.3	Raumzeitliche Analyse	10
4.4	Mehrjähriges Monitoring	11
4.5	Operationalisierung	11
5	Schlussfolgerung und Weiterführung	18
6	Dank	19
7	Anhang	20
7.1	Vorschläge für weiterführende Arbeiten	20
7.2	Lieferung Geodaten	21

1 Ausgangslage

Der extrem heisse und niederschlagsarme Sommer des Jahres 2022 hatte starke Auswirkungen auf die Wälder im Kanton Tessin. Insbesondere im Gebiet Mendrisiotto war in weiten Teilen des Waldes eine frühzeitige Laubverfärbung schon während des Sommers zu beobachten.

Die BFH-HAFL wurde beauftragt, ausgehend von diesem Ereignis zu untersuchen, inwiefern Fernerkundungsdaten geeignet sind, um die Auswirkungen zu detektieren. Langfristiges Ziel ist ein System, dass die Entwicklung der Laubfärbung in den Sommermonaten überwacht und es erlaubt, Dürre-Ereignissen zeitnah zu erkennen, ihre Auswirkungen zu quantifizieren und die Dynamik besser zu verstehen.

Dieses Projekt dient als wissenschaftliches Pilotprojekt, das die Machbarkeit eines solchen Systems anhand von Sentinel-2 Satellitendaten untersucht.

2 Projektziele

Das Projekt soll folgende Forschungsfragen beantworten:

1. Liefert Sentinel-2 zuverlässige Daten zur Überwachung der Auswirkungen der Trockenheit auf die Vegetationsentwicklung?
2. Kann das Sentinel-2-Datenmanagement standardisiert werden, um ein Überwachungsinstrument zu erhalten, das vom Forstdienst routinemässig eingesetzt werden kann?
3. Kann der Austausch von Informationen/Daten mit der Plattform waldmonitoring.ch auf rationelle Art und Weise gewährleistet werden?

Dafür sollen prototypisch flächendeckenden Karten für das gesamte Waldgebiet des Mendrisiottos erstellt werden, die jedem Ort (10x10 m Zellen) den Zeitpunkt einer gegebenenfalls frühzeitigen Verfärbung zuordnen.

Konkret wurden für die Jahre 2021, 2022 und 2023 folgende flächendeckende Raster generiert:

- **«Zeitpunkt Laubverfärbung»**
impliziert die Information zu **«frühzeitiger Verfärbung»**
- **«Trockenstress, steigende/sinkende Vitalität, Anomalien»**

Die Geodaten wurden im Format GeoTIFF geliefert, mit einem zusätzlichen GIS-Projekt (QGIS / QField), in dem die Daten sinnvoll dargestellt und für den mobilen Einsatz im Feld (Smartphone, Tablet) aufbereitet sind (Details siehe Anlage 7.2 Lieferung Geodaten).

3 Projektentwicklung

Das Projekt wurde anhand dreier Meilensteine entwickelt (Tabelle 1). Projektleitung und -supervision seitens der HAFL wurden von Christian Rosset und Hannes Horneber übernommen, die technische Umsetzung wurde durch Attilio Benini realisiert. Seitens BAFU wurde das Projekt von Roberto Bolgé begleitet. Primärer Ansprechpartner seitens Kanton Tessin war Davide Bettelini.

Das grundsätzliche Vorgehen für die Entwicklung der finalen Methode lässt sich in drei Phasen gliedern (Abbildung 1): (1) Datenbeschaffung und -aufbereitung, (2) Analyse und Entwicklung einer geeigneten Modellierung zur Detektion und (3) die finale Prozessierung und Erstellung einer Karte.

Erste Ergebnisse wurden im Juli mit Roberto Bolgé diskutiert. Ausgehend vom damaligen Erkenntnis- und Diskussionsstand wurden die Daten dann weiterentwickelt und am 17.8 im Rahmen einer gemeinsamen Begehung vorgestellt und erneut diskutiert. Anwesend waren Vertreter von BAFU, Mitarbeiter des kantonalen Forstdienstes Tessins sowie das Ingenieurbüro Fürst & Associati, welches bereits im Auftrag des Kantons in derselben Region Trockenschäden und deren Folgen mit Drohnen- und Satellitenbildern untersucht.

Abschliessend wurden die Resultate konsolidiert und bereinigt und der vorliegende Bericht erstellt.

Tabelle 1 : Meilensteine die gemäss Vertrag in den angegebenen Perioden bearbeitet wurden.

Termine, Meilensteine

Etappe	Inhalt	Periode
I.	Übersicht über die Voraussetzungen in den untersuchten Gebieten sowie Generieren erster Ergebnisse: - Aufbereitung der Sentinel 2 Grundlagendaten für erste Ergebnisse - online Besprechung der ersten Ergebnisse mit dem Forstdienst des Kantons Tessin - Bearbeitung allf. Rückmeldungen aus Diskussion mit dem Kanton	Ende Juni / Mitte Juli 2023
II.	Begehung und Diskussion der Methode mit dem kantonalen Forstdienst mit anschliessender Verfeinerung: - Einarbeitung allf. Anpassungsvorschläge an die Methodik - Bereinigung der Resultate aus Fernerkundungsdaten	Bis Ende August 2023
III.	Synthese der Ergebnisse und Berichtverfassung	Bis 15.12.2023

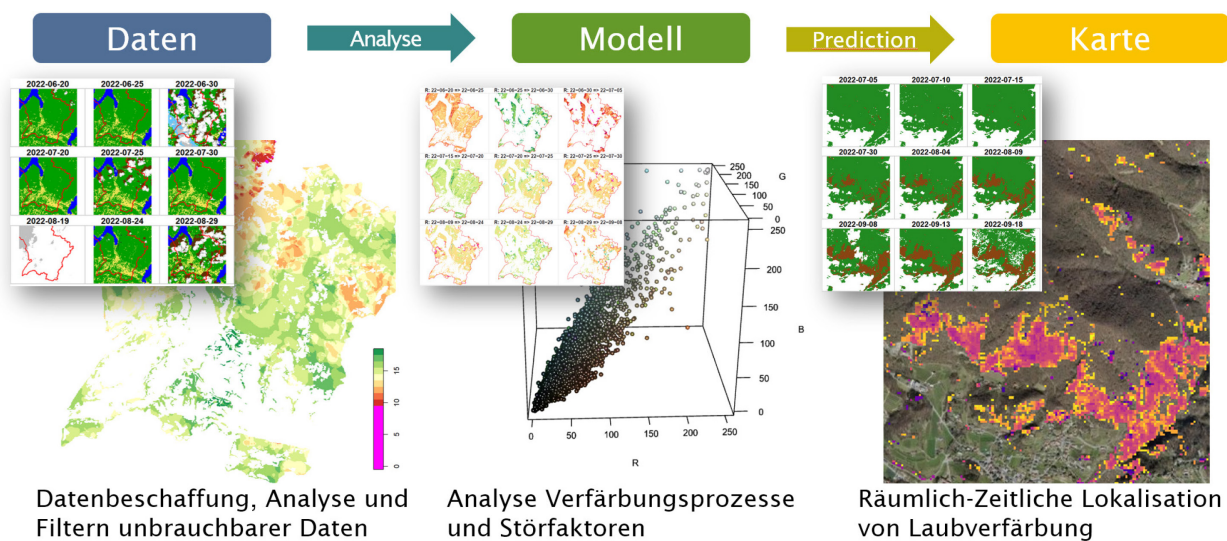


Abbildung 1 : Phasen der Entwicklung der Methode und Resultate. Nach den ersten Ergebnissen wurden diese Phasen erneut iteriert um jeweilig die Datenfilterung und Modellierung anzupassen, um so die Ergebnisse zu verbessern.

4 Methode

4.1 Datengrundlage

Die Ergebnisse basieren auf Sentinel-2 Daten mit einer räumlichen Auflösung von 10x10 m, die auch die Auflösung der Ergebnisse vorgibt. Alle Daten wurden auf die swisstopo swissTLM3D Waldmaske zugeschnitten (alle Waldtypen werden berücksichtigt: Wald, Wald offen und Gebüschwald). Da das gesamte zu untersuchende Gebiet in einer Aufnahme-Kachel enthalten ist, wurde genau diese verwendet. Teilbereiche wären durch überlappende Orbits zusätzlich von weiteren Kacheln abgedeckt, diese Daten wurden im vorliegenden Prototyp jedoch zugunsten der Konsistenz und Einfachheit nicht hinzugezogen.

Primär betrachtet wurde der Zeitraum Juni – September 2022. Bei der Betrachtung anderer Zeiträume schränkt die Datenverfügbarkeit (aufgrund der Meteorologie) die Funktionsweise stark ein, insbesondere in den Winter und Frühlingsmontane. Folglich richten wir den Fokus auf die Hochphase der Vegetationsperiode. In einem weiteren Schritt wurde die Entwicklung in weiteren Jahren exemplarisch untersucht (2021 – 2023).

Durch die Sentinel-2 Nachführungszeit von 5 Tagen pro Orbit bzw. Kachel liegen somit für die Anfang Juni – Ende September 2022 (4 Monate) 24 Aufnahmen vor. Von diesen Daten sind aufgrund von Atmosphäre, Wolken und Schatten etwa 60% nutzbar (Abbildung 6): Die Daten wurden durch die von der ESA zur Verfügung gestellten Scene Classification (SCL) vorgefiltert (Abbildung 2 & 3). Zudem wurden in einen Abstand von 50 m rings um die gemäss SCL ungeeigneten Pixel alle Pixel ausgeschlossen, denn in Wolken- und Schattennähe treten farbliche Verfälschung gehäuft auf. Anschliessend wurde eine zusätzliche Scene Color Classification (SCCL) entwickelt, um weitere Störfaktoren (Über- und Untersättigung, Terrainschatten, unzureichende Filterung durch SCL und Umrandung derselben) zu entfernen (Abbildung 4 & 5).

Für die visuelle Beurteilung der Szenen und verschiedener Phänomene wurden RGB-Komposite erstellt. Von Verfärbung betroffene Regionen wurden in diesen für Menschen gut lesbaren Bildern ausfindig gemacht und zusätzlich durch höher aufgelöste swisstopo Luftbilder eingeordnet.

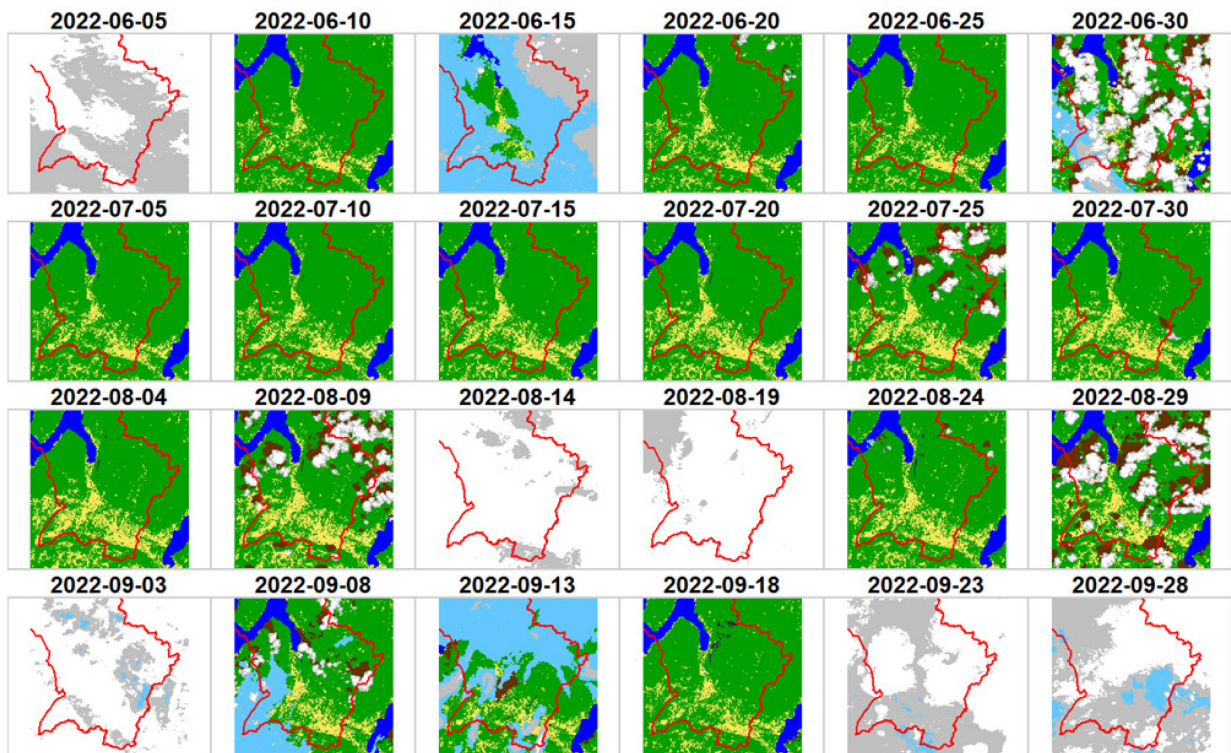


Abbildung 2 : 24 Aufnahmen der Vegetationsperiode, dargestellt mit ESA Scene Classification (SCL)

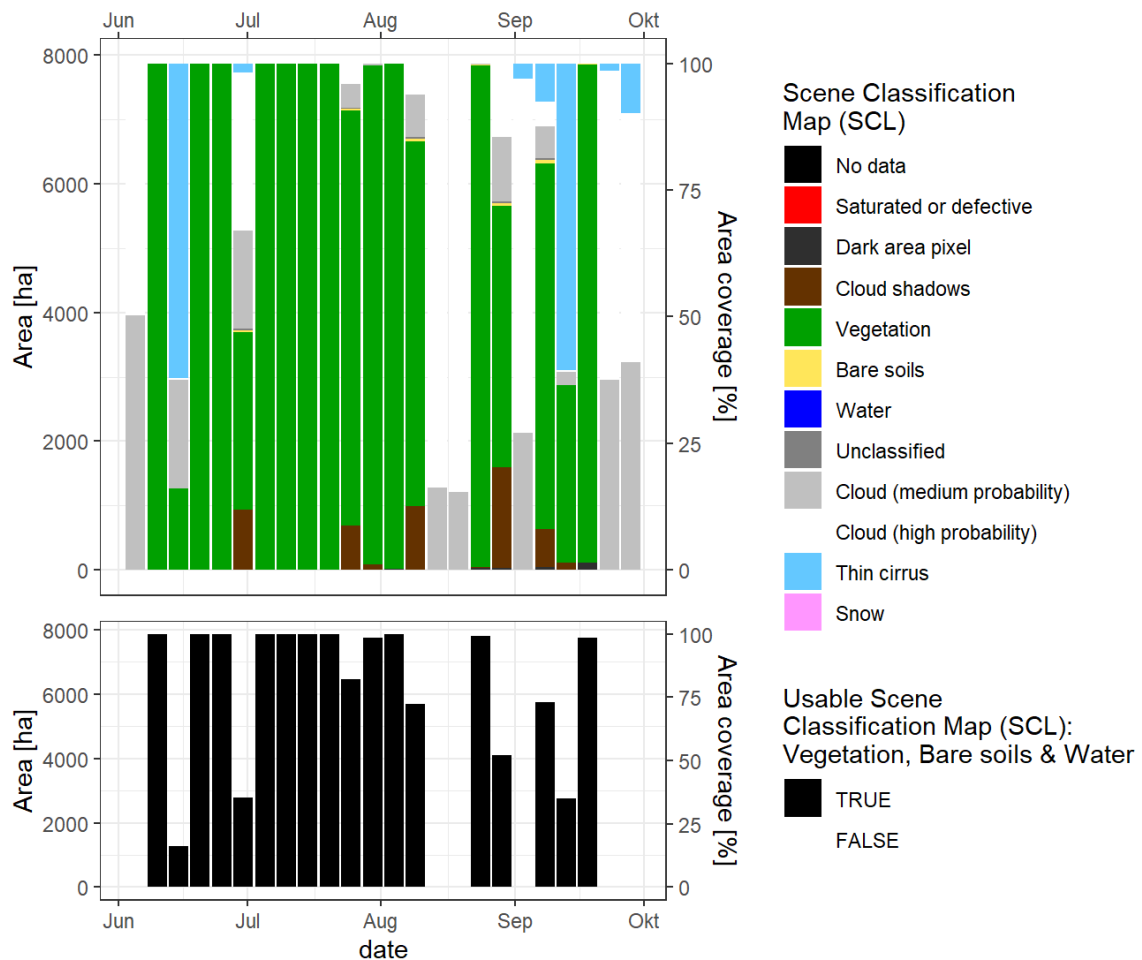


Abbildung 3 : Anteile nutzbarer Daten pro Aufnahme (basierend auf SCL) im Zeitraum Juni bis September 2022. Eine Aufnahme entspricht einem Balken.

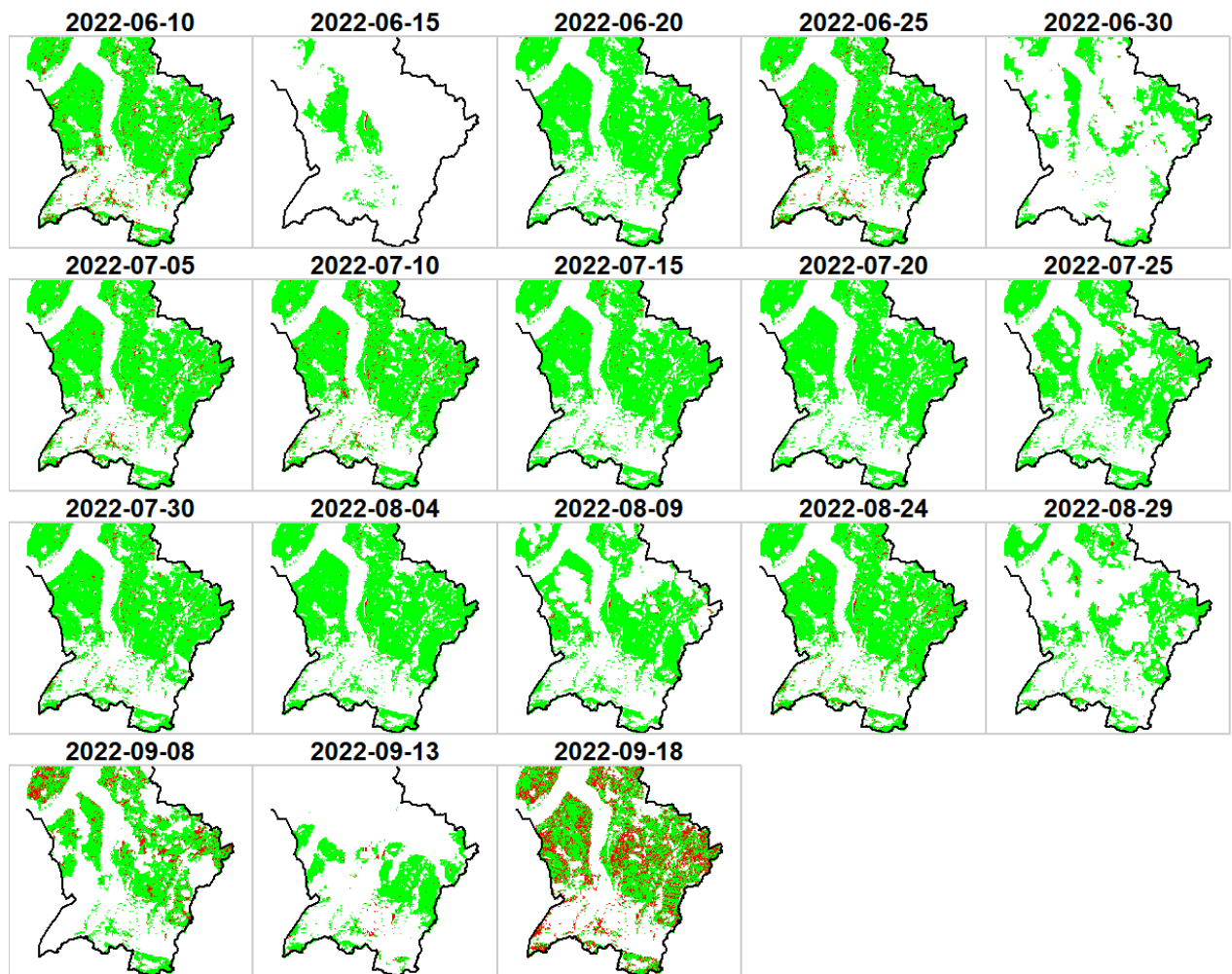


Abbildung 4 : Nutzbare Anteile der durch ESA SCL vorgefilterten Aufnahmen (grün) und durch Scene Color Classification (SCCL) zusätzlich gefilterte Bereiche (rot). Komplett bewölkte Aufnahmen wurden entfernt.

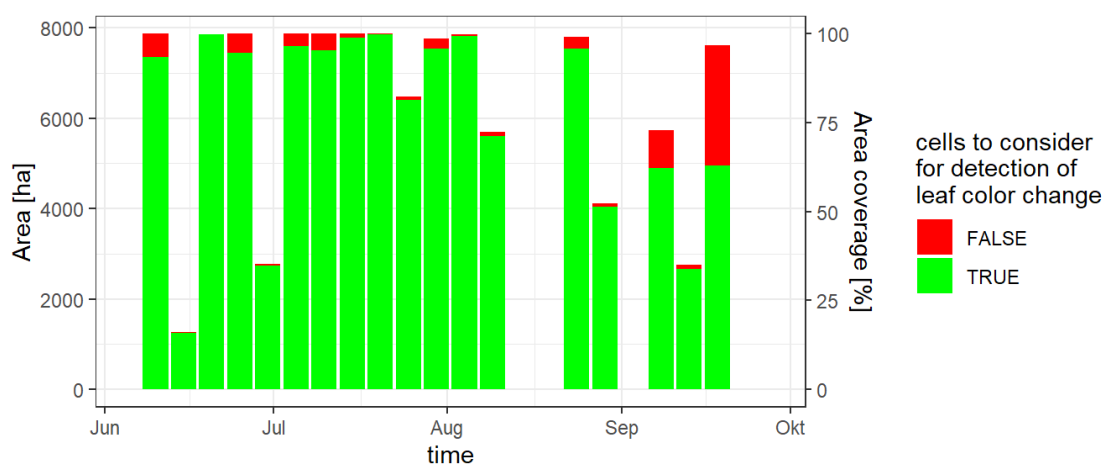


Abbildung 5 : Anteile nutzbarer Daten pro Aufnahme (basierend auf SCL und SCCL). Eine Aufnahme entspricht einem Balken.

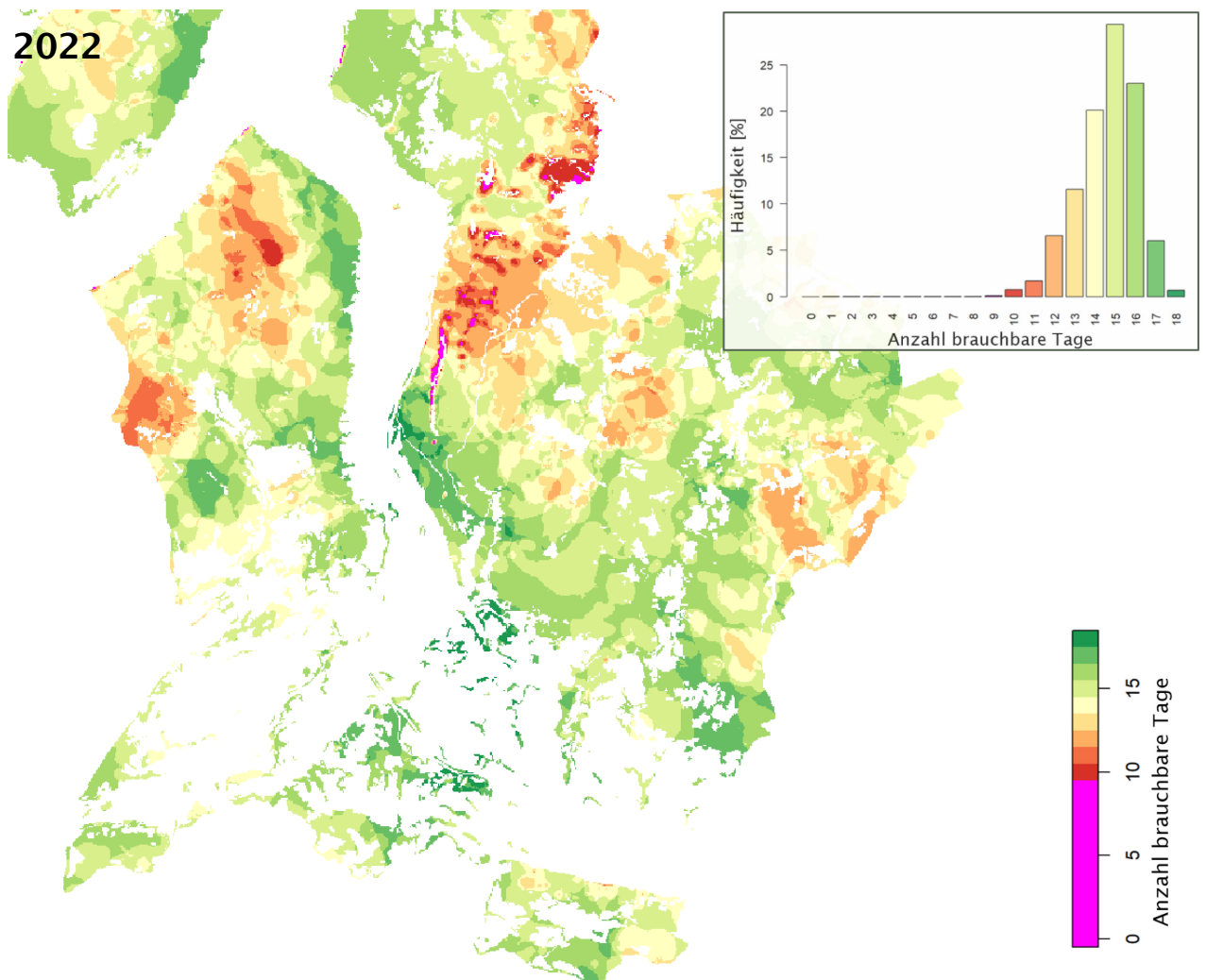


Abbildung 6 : Datengrundlage Juni – September 2022 für das Monitoring. Wolken und andere Störfaktoren schränken die Nutzbarkeit ein, so dass für nur etwa 60% der Rohdaten dieses Zeitraumes brauchbar sind.

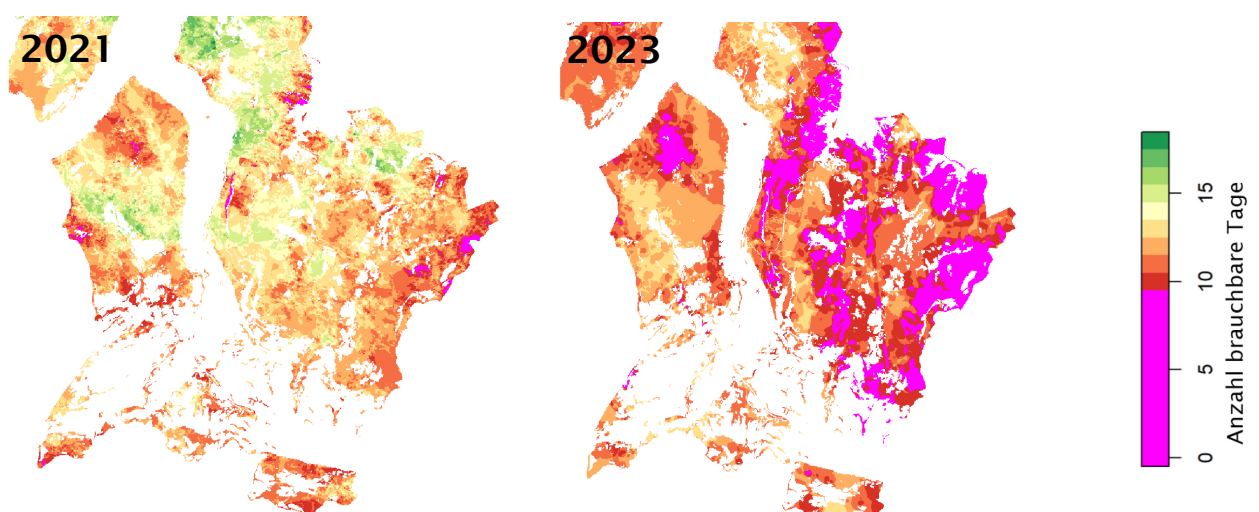


Abbildung 7 Die Datengrundlage Juni – September 2021 und 2023 ist deutlich schlechter. Einerseits aufgrund der klimatischen Bedingungen (mehr Niederschlag = mehr Wolken, insbesondere 2021), andererseits fehlen uns 2023 einige Aufnahmen, da der Sentinel SciHub Betrieb eingestellt wurde (siehe Kapitel 4.5).

4.2 Klassifizierung

Um eine Rasterzelle einer Satellitenaufnahme als verfärbt zu klassifizieren, wurde eine einfache, aber effektive Regel formuliert: Sobald der Rot-Anteil der Zelle grösser ist als der Grün-Anteil der Zelle ($R > G$), gilt die Zelle als «verfärbt».

Für die Entwicklung der Klassifizierung wurde das Gebiet anhand der spektralen Bänder der Sentinel-2 Daten (vorrangig sichtbares Licht: Rot (R), Grün (G), Blau (B) und Nahinfrarot (NIR)) untersucht. Der NDVI (basiert auf R und NIR) ist gebräuchlicher Indikator für photosynthetische Aktivität und wurde als Proxy für Verfärbung in Erwägung gezogen, jedoch wieder verworfen aufgrund der starken Korrelation mit den anderen Bändern und zugunsten einer leichten Interpretierbarkeit der Ergebnisse.

Das Gebiet wurde mit einem Point-Sampling beprobt und verschiedene Laub-Färbungen im RGB-Farbraum untersucht. Die Untersuchungen des Spektrums an Laubfärbungen führten zu klaren Erkenntnissen und Design-Entscheidungen der Methode (1) die Farbe Blau spielt keine grosse Rolle und kann ignoriert werden, (2) NIR korreliert stark mit der Gesamtintensität und den einzelnen Farbbändern und kann ebenfalls ignoriert werden, (3) die durch $R > G$ formulierte Grenze ist ein einfach greifbarer, leicht visualisierbarer und effektiver Proxy für die Unterscheidung von gesundem, «lebendigen» Laub und entfärbtem, vertrocknetem Laub. Am Rande erwähnt sei, dass die Beobachtungen die Vermutung nahelegen, dass sich eine Herbstverfärbung anders verhält (Verfärbung zunächst in Gelbtöne, dann in Brauntöne) als eine Trockenstress-Verfärbung (Verfärbung direkt von Grün- zu Brauntönen ohne «Umweg» über das Gelbspektrum) – dies gilt es näher zu untersuchen, da es für weiterführende Arbeiten relevant sein könnte.

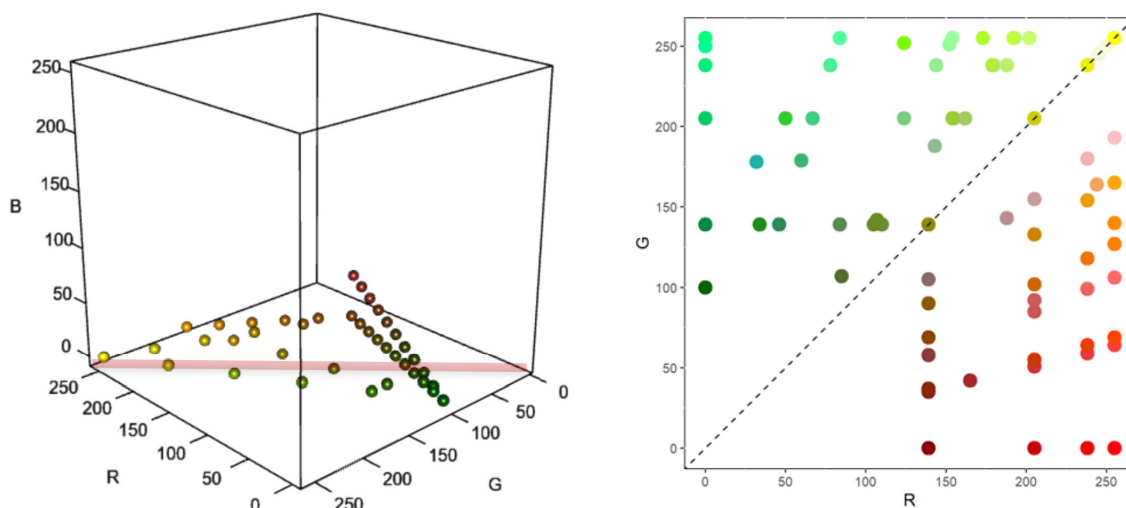


Abbildung 8: Links: Verschiedene theoretisch mögliche Verläufe der Laubfärbungen (Grün-, Gelb und Rottöne) im dreidimensionalen RGB-Farbraum mit Trennlinie $R > G$. Rechts: Gängige Farben zweidimensional dargestellt mit der Trennlinie $R > G$.

Anhand ausgewählter, von verfrühter Laubverfärbung betroffener und nicht-betroffener Gebiete wurde die Klassifizierungsmethode getestet und zeigte eine klare Unterscheidbarkeit der Gruppen. Die verwendete Methode ist nachvollziehbar und effektiv, die Einfachheit limitiert aber auch. Komplexere Klassifikationsregeln sind jedoch nur sinnvoll einzuführen, wenn sie durch Referenzdaten validiert und optimiert werden können.

4.3 Raumzeitliche Analyse

Mit einem Verfärbungs-Klassifikator lässt sich jede Rasterzelle zu jedem beobachteten Zeitpunkt bewerten (Abbildung 10) und so eine Angabe über den erstmalig eingetretenen Verfärbungszeitpunkt treffen (Abbildung 11). Somit können (neu) verfärbte Regionen identifiziert werden. Die Entwicklungen lässt sich so über Zeit darstellen und Ereignisse (starke Veränderungen) können ausgemacht werden.

(Abbildung 12 & 12). Wolken und andere „Störelemente“ verhindern Beobachtungen im stets gleichbleibenden Zeitintervall und verursachen Daten-Lücken. Nach diesen Lücken treten Spitzenwerte neu beobachteter Farbwechsel gehäuft auf: Die Beobachtungen zeigen dann die kumulierte Verfärbung innerhalb des nicht beobachtbaren Zeitraums. Damit diese Spitzenwerte nicht punktuelle Ereignisse suggerieren, «normalisieren» wir die Menge der seit der letzten Beobachtung hinzugekommenen verfärbten Pixel, indem wir diese gleichmässig (in regelmässigen Intervallen von fünf Tagen) auf den Zeitraum zwischen letzter Beobachtung und erneuter Beobachtung verteilen. Diese Zuordnung ist zwar spekulativ, der kumulative Verlauf der Verfärbung zeigt jedoch, dass es die zeitliche Entwicklung besser darstellt.

Die Methode erlaubt es, auf fünf Tage genau den Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem eine erste Verfärbung feststellbar ist (Abbildung 11). Ist die Verfärbung einmal eingetreten bzw. detektiert, so ist diese innerhalb der laufenden Vegetationsperiode gemäss der oben angeführten einfachen Klassifikation ($R > G$) oftmals nicht dauerhaft. Aus verschiedenen Gründen können Flächen zwischen „vital“ und „verfärbt“ hin- und herwechseln, z.B. aufgrund ungenauer Georeferenzierung (bei Sentinel-2 im Bereich von ± 10 m, d.h. eine verfärbte Rasterzelle kann fälschlicherweise die 8 benachbarten Rasterzellen ebenfalls einfärben) oder lokal auftretenden atmosphärischen Effekten, Schatten, Überbelichtung. Oft sind dies Ränder verfärbter Flächen, aber auch Strassen, Felsen, lichte Wälder und Mischpixel (Rasterzellen, die Wald und Nicht-Wald enthalten). Zudem beinhalten vom Wald vollständige überlappte Zellen meist mehrere Bäume, deren Vitalität sich zeitlich nicht synchron verhalten muss. Pixelwert sind Durchschnittswerte, die oft über längere Zeit ohne klaren Trend entlang der Trennlinie $R > G$ pendeln.

Um diese Effekte zu filtern bedarf es eines Kriteriums für die Persistenz des Laubverfärbung. Wir haben hierzu festgestellt, welcher Anteil der beobachteten Verfärbungen auch in folgenden Aufnahmen konsistent verfärbt bleibt (Abbildung 14 bis 16). Dies kann als Kriterium zur Filterung «unwahrscheinlicher» Verfärbungen bzw. unzuverlässiger Detektionen genutzt werden, z.B. wenn ab und mit der erstmaligen Feststellung der Verfärbung in mindestens der Hälfte der Beobachtungen die Bedingung $R > G$ erfüllt ist, so gilt der Zeitpunkt der ersten Beobachtung als Beginn der (verfrühten) Laubverfärbung. Für ein Live-Monitoring / Frühwarnsystem kann dieses Element nur eingeschränkt genutzt werden (da nicht in die Zukunft geblickt werden kann), wohl aber für die retrospektive Quantifizierung der Schäden und Beurteilung der Dynamik.

In unserem Beobachtungsdesign beginnen wir ohne Vorwissen über die Zeit vor der Beobachtung. Das hat Folgen: Für Pixel, auf die schon bei ihrer erstmaligen Beobachtung innerhalb der Beobachtungsphase das Kriterium $R > G$ zutrifft, nehmen wir an, dass es sich um dauerhaft gehölzfreie oder -arme Standorte handelt, oder es handelt sich dabei um vor der Beobachtung entstandene Störungsflächen. Folglich schliessen wir die entsprechenden Pixel von der Beobachtung aus.

4.4 Mehrjähriges Monitoring

Die Methode wurde von Beginn an so geplant, dass sie für ein langfristiges Monitoring auch für andere Zeiträume als den konkret interessanten Sommer 2022 eingesetzt werden kann. Dabei ist der Zeitraum flexibel: Es können mehrere Monate, gesamte Jahre und auch mehrere Jahre prozessiert werden (im Zeitrahmen der Sentinel 2 Datenverfügbarkeit, d.h. frühestens ab 2015/16 bis zur Gegenwart). Optimiert ist die Methode aktuell für die Betrachtung der Vegetationsperiode (Skalierung der Grafiken, Implementierung der «kumulativen Verfärbung») und insbesondere für die Bestimmung des Zeitpunktes wären Anpassungen sinnvoll, wenn z.B. auch der Beginn des Jahres mit einbezogen werden soll.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden exemplarisch die Jahre 2021 – 2023 berechnet (Abbildung 7Abbildung 13). Für weiterführende Arbeiten ist es naheliegend, stark betroffenen Regionen und ihre Regeneration zu betrachten: Die Entwicklung der Laubfärbung in nachfolgenden Jahren kann und sollte hier gesondert stattfinden.

4.5 Operationalisierung

Der Workflow ist mit R programmiert, unter Verwendung des R-packages `sen2r`. Das erleichtert durch den semi-automatisierten Download und die Vorprozessierung von Sentinel 2 Daten den Aufwand. Bedauerlicherweise wurde jüngst (Herbst 2023) ein Update des packages vorgenommen in Reaktion auf die Entscheidung der ESA, die Bereitstellung der SciHub-Archive einzustellen. Damit kann mit der aktuellen Implementierung nicht ohne wesentliche Anpassungen auf die Sentinel 2 Daten zugegriffen werden. Als

unmittelbare Auswirkung fehlen dadurch bei der Prozessierung von 2023 auch die letzten Daten ab Anfang September. Zudem steht dies aktuell einer Operationalisierung der Methode im Wege, da aufwändigere Code-Änderungen zwingend sind.

Langfristig sehen wir darin allerdings kein grosses Problem: Die Datenbeschaffung mit sen2r war zwar eine Erleichterung, aber immer noch aufwändig. Daher haben wir basierend auf der Google Earth Engine und dem R Interface rgee bereits eine alternative Prozessierungs-Infrastruktur vorgebaut, um in weiterführenden Projekten einen optimierten Workflow und schnellere Prozessierung einzusetzen. Zudem verspricht das swisstopo Projekt SATROMO¹ ab Q3/2024 eine für die Schweiz aufbereitete Sentinel 2 Datensammlung (Analysis Ready Data – ARD) mit verbesserter Georeferenzierung und Scene Classification – ebenfalls unter Verwendung der Google Earth Engine. Diese vielversprechende Neuerung hätte ohnehin eine Anpassung nach sich gezogen.

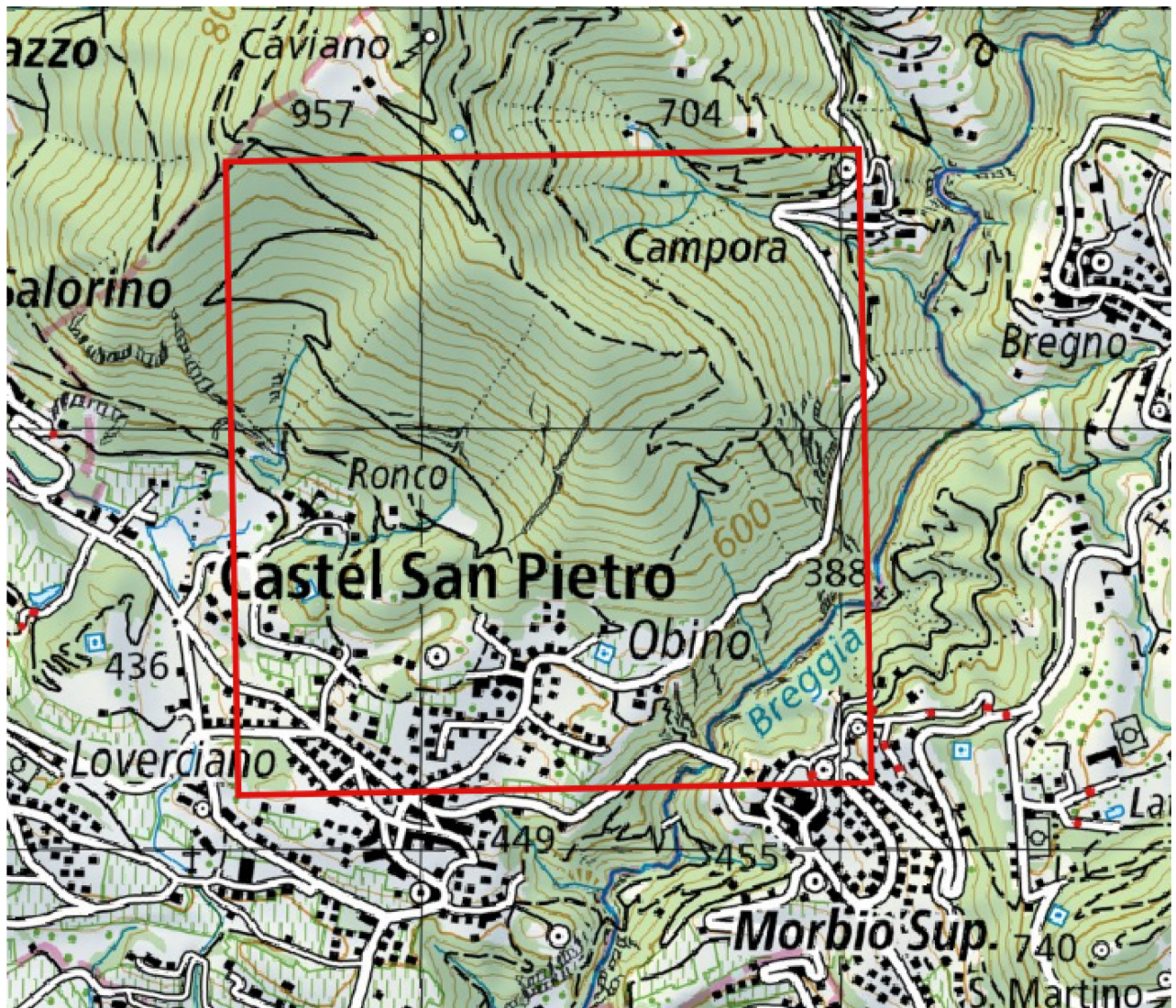


Abbildung 9 : Bewaldete Hanglagen bei Castel San Pietro. Dort kam es im Sommer 2022 gehäuft zu frühzeitiger Laubverfärbung, vornehmlich auf Südexpositionen. Die rot umrandete Fläche zeigt den Ausschnitt der in Abbildung 10. dargestellten Zeitreihen.

¹ <https://github.com/swisstopo/topo-satromo>

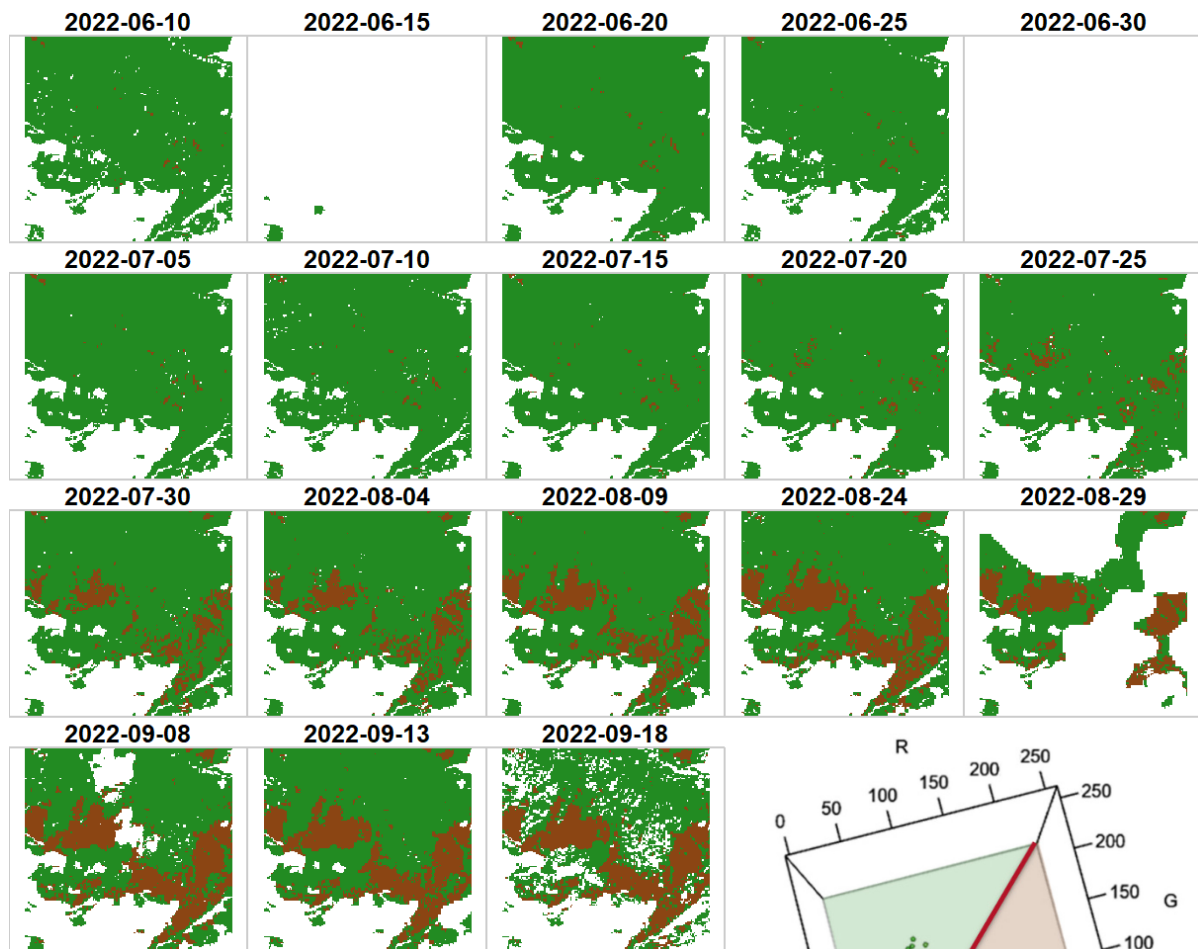


Abbildung 10 : Klassifizierung «Laubholz verfärbt» (braun) über die Zeit, anhand des Kriteriums «Rot-Intensität grösser Grün-Intensität» ($R > G$). Es ist ein deutlicher Trend der zunehmenden Verfärbung zu erkennen. Die gezeigte Fläche liegt bei Castel San Pietro (vgl. Abbildung 9). Weisse Pixel entsprechen Flächen ausserhalb des Waldes oder es liegen keine nutzbaren Rohdaten für die Beobachtung vor.

Rechts ist das Kriterium $R > G$ als Linie im RGB-Farbraum dargestellt, die Punkte zeigen Probeflächen aus von Verfärbung betroffenen und nicht-betroffenen Probeflächen, die sich durch die Linie klar trennen lassen.



Abbildung 11 : Raumzeitliche Entwicklung der Verfärbung. Je dunkler die Farbe desto früher trat die Verfärbung auf. Die Entwicklung von einem «Verfärbungszentrum», das an den Aussenrändern wächst, ist in den meisten grösseren Flächen klar erkennbar.

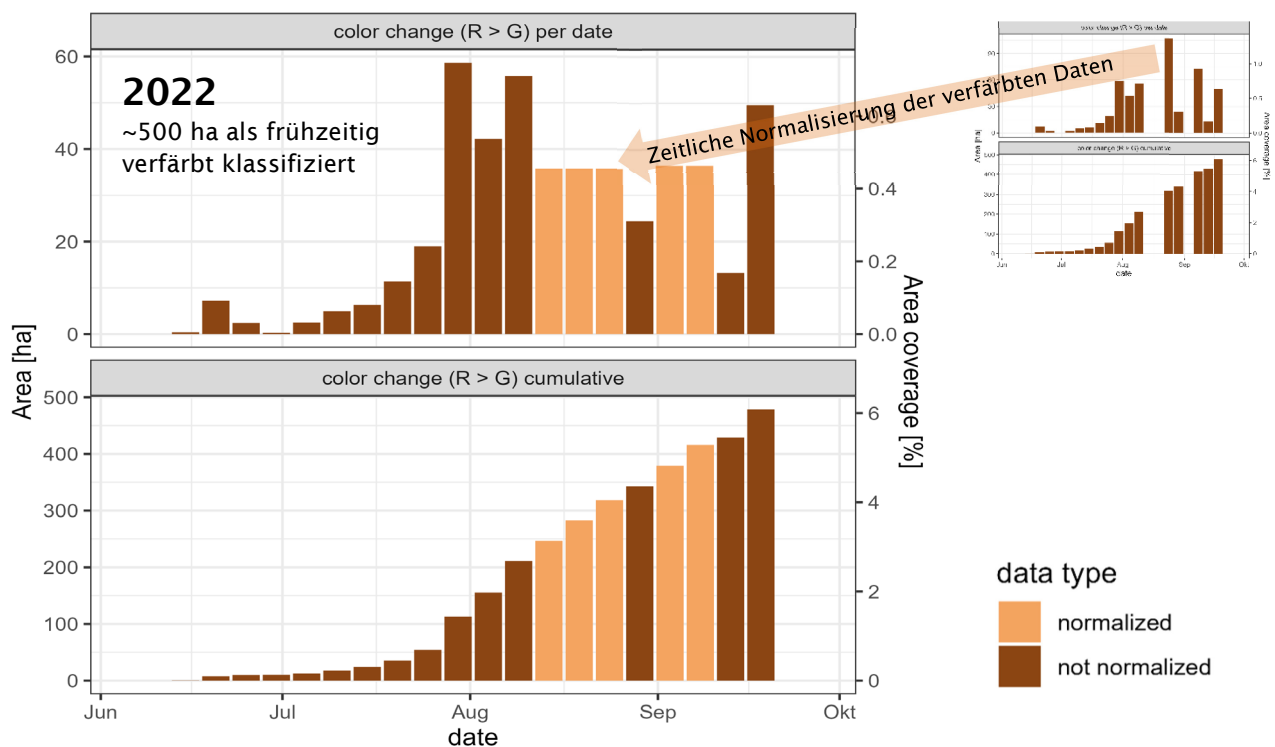


Abbildung 12 : Zeitlicher Verlauf der zunehmenden Verfärbung 2022. Die Fläche steigt im Verlauf des Jahres auf zuletzt fast 450 - 500 ha (5-6%) des Waldgebietes an, der grösste Effekt ist Ende Juli (+60 ha innerhalb 5 Tagen) und Anfang August (+100 ha innerhalb von 10 Tagen) zu beobachten. Beobachtungen in gleichmässigen Abständen sind nicht immer möglich (bewölkte Aufnahmen), wodurch Lücken entstehen (siehe rechts oben) – entsprechend ist bei Beobachtungen nach Lücken die Verfärbung eines grösseren Zeitraumes kumuliert (z.B. auf 15 Tage) und suggerieren ein grösseres Ereignis. Daher «normalisieren» wir die seit der letzten Beobachtung hinzugekommenen verfärbten Pixel (d.h. diese werden gleichmässig auf den dazwischenliegenden Zeitraum verteilt). So sind «Ereignisse» wie hier z.B. Ende Juli/Anfang August klarer erkennbar (kurze Zeiträume mit viel Effekt).

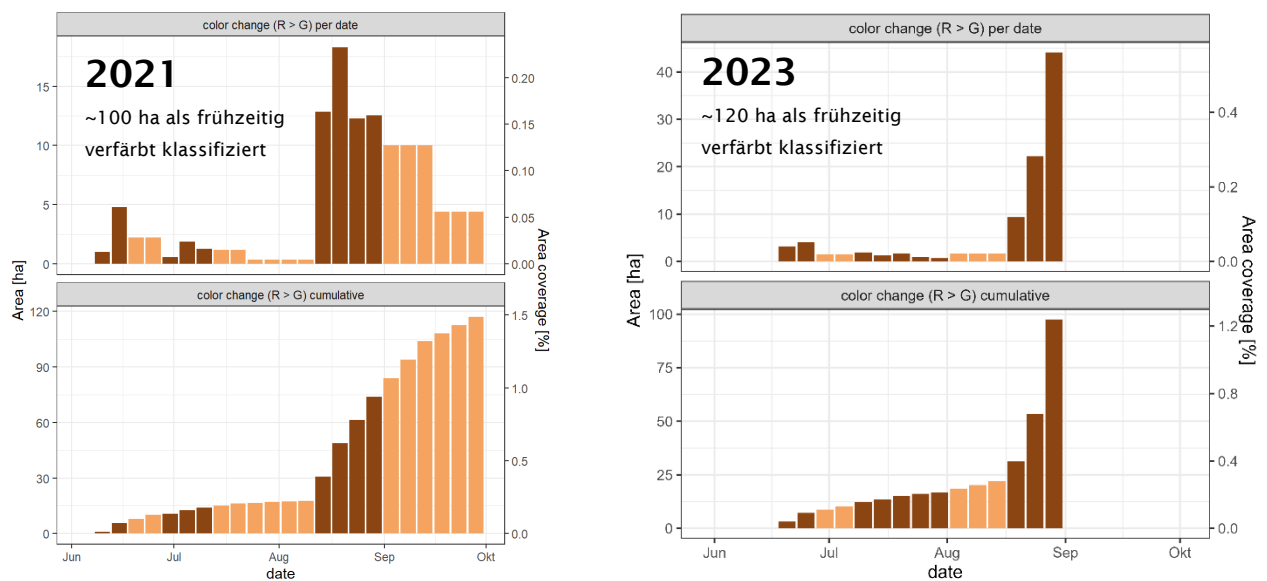


Abbildung 13 : Zeitlicher Verlauf der zunehmenden Verfärbung 2021 und 2023. Die Verfärbung beginnt hier deutlich später (Mitte/Ende August) und die betroffene Fläche war hier viel geringer (insgesamt nur 120 bis 100 ha). Aufgrund der schlechteren atmosphärischen Bedingungen (mehr Wolken) ist hier zudem auch mit mehr Fehldetektionen zu rechnen (vgl. auch Abbildung 17). Auch die für September 2023 weitestgehend fehlend Daten erlauben bei den Ende Augst stattgefundenen Verfärbung nicht die Überprüfung der Persistenz des Farbwechsels.

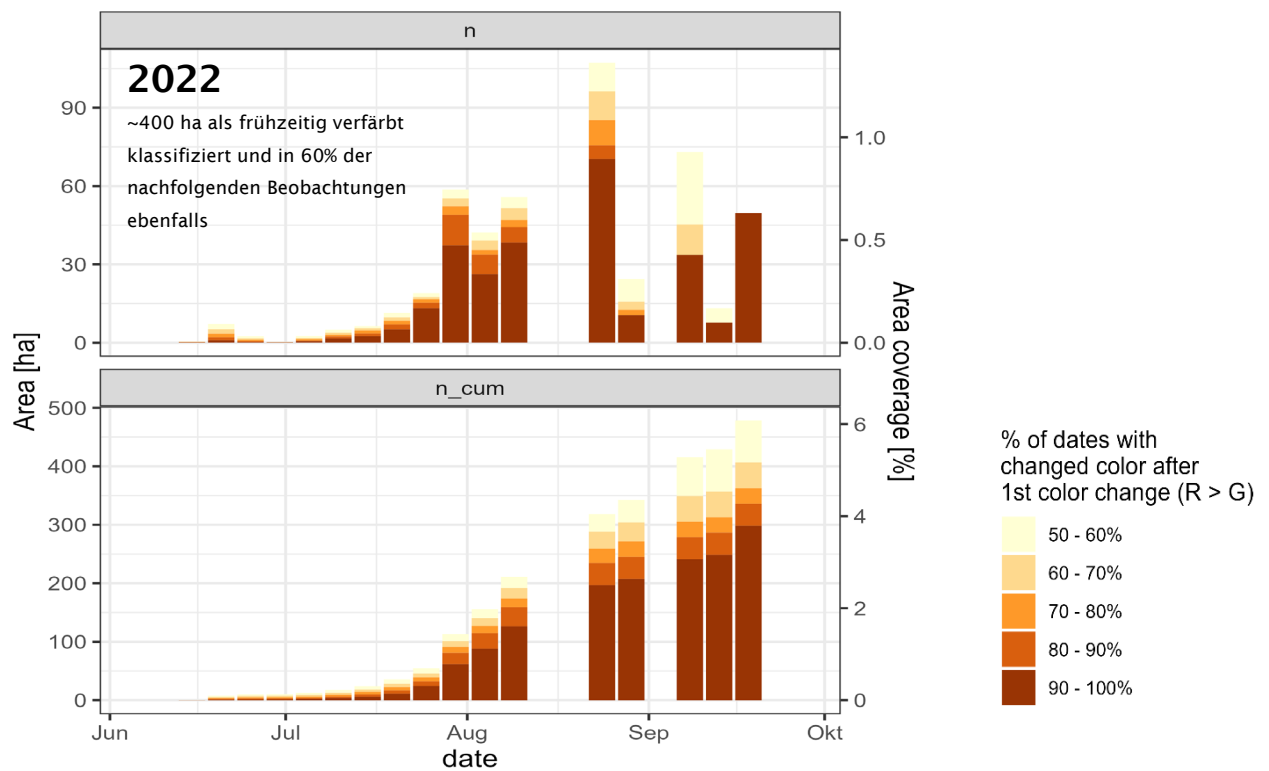


Abbildung 14 : Anteil der nicht konsistent verfärbten Flächen, d.h. Rasterzellen, die nach einer initialen Verfärbung in nachfolgenden Beobachtungen nicht mehr verfärbt waren.



Abbildung 15 : Die Zentren der zusammenhängenden Flächen mit detektierten Laubverfärbung erweisen sich als konsistent verfärbt. Pixel mit geringer Konsistenz des Farbwechsels sind hingegen oft randständig oder finden sich verstreut an Schattenhängen sowie im Übergangsbereich von Wald und Nicht-Wald.

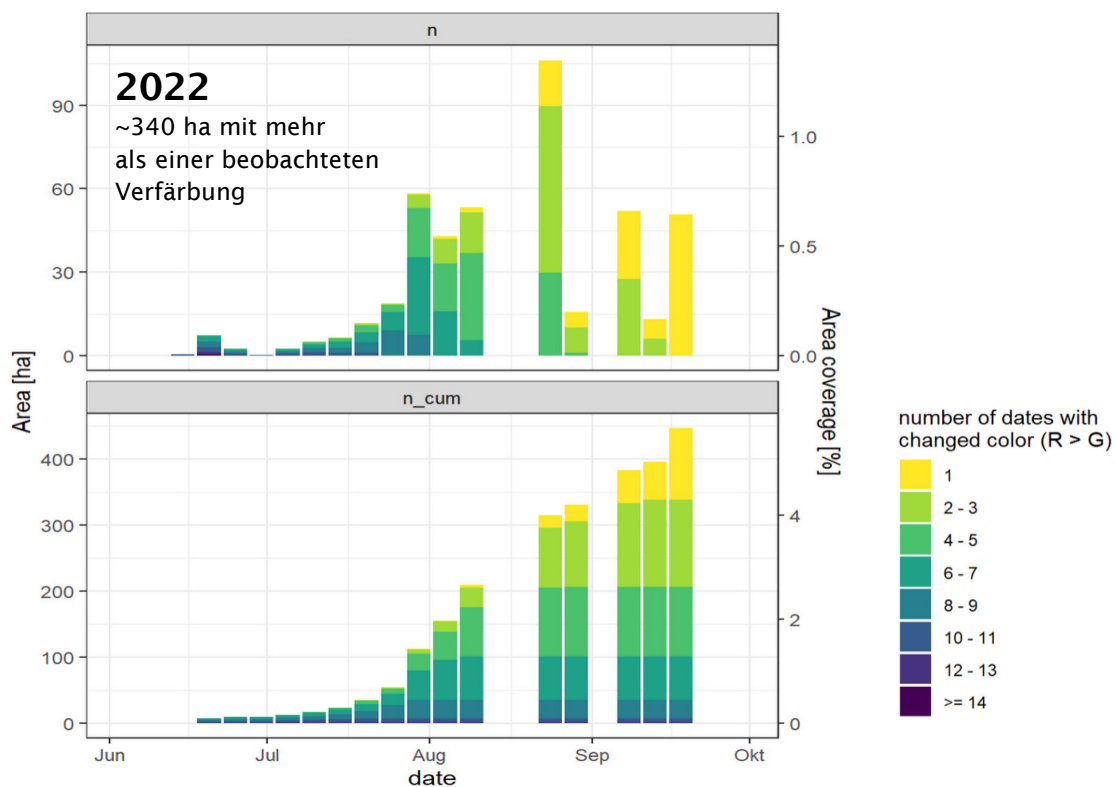


Abbildung 16 : Verfürbte Fläche 2022, aufgeschlüsselt nach der Anzahl der Daten, zu denen die Flächen als verfärbt beobachtet werden konnten. Flächen die nur in einer Aufnahme verfärbt sind, sind wahrscheinlicher Fehldetektionen (gelb). In der aktuellen Implementierung endet der Beobachtungszeitraum mit dem September, somit ist für die zuletzt detektierten Verfärbungen auch nur eine einzige Beobachtung möglich. Der Sockel an konsistenten Verfärbungen ist hoch (und damit sehr wahrscheinlich realen Auswirkungen der Trockenheit, grün/blau).

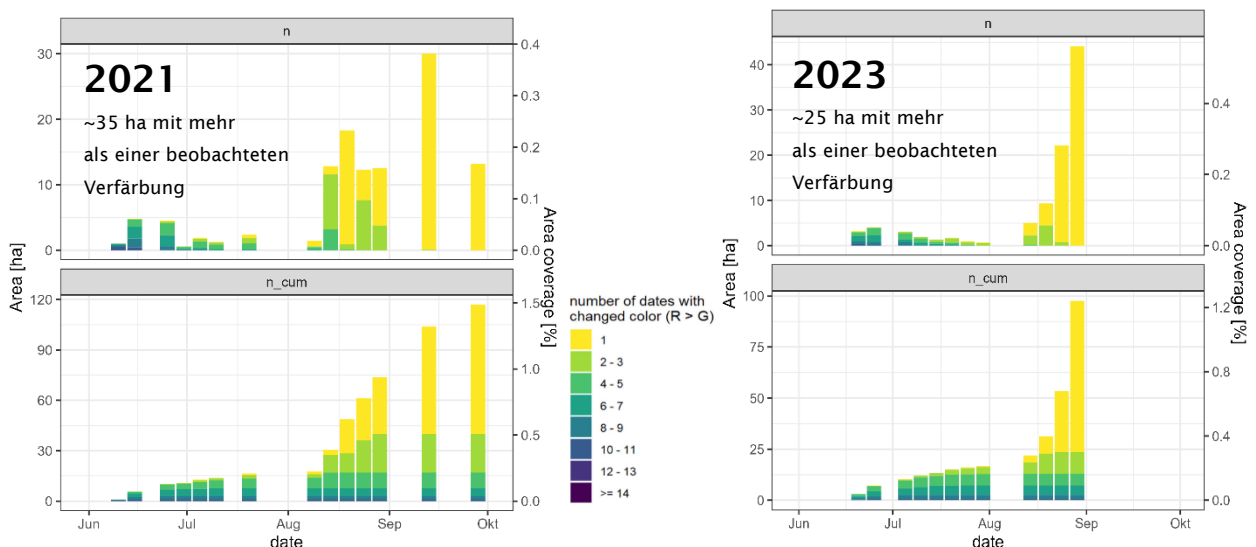


Abbildung 17 : Verfürbte Fläche 2021 und 2023, aufgeschlüsselt nach der Anzahl der Daten, zu denen die Flächen als verfärbt beobachtet werden konnten. Im Vergleich zu 2022 zeigt sich, dass der Anteil an über längere Zeiträume verfärbt beobachteten Flächen deutlich geringer ist (grün/blau); viele Flächen sind nur in einer Aufnahme verfärbt (gelb). Da die absolute Fläche frühzeitig verfärbter Zellen geringer ist, ist der Anteil an Fehldetektionen höher.

5 Schlussfolgerung und Weiterführung

Das Projekt war konzipiert als Pilotprojekt / «Proof of Concept». Der Fokus lag darauf eine einfache und leicht interpretierbare Methode zu entwickeln. Die in diesem Sinne produzierten Ergebnisse sind vielversprechend und zeigen vergleichbare Resultate zu der unabhängigen Studie des Ingenieurbüros Fürst & Associati (2022)². Der Vergleich mit dieser Studie zeigt, dass die Methoden prinzipiell ähnlich sind und ähnliche Ergebnisse zeigen: Flächen, bei denen das Ingenieurbüro die stärksten Dürreschäden feststellte, stimmen vielerorts mit unseren Flächenresultaten überein. Das Ingenieurbüro Fürst & Associati ermittelte zusätzlich noch Flächen, die weniger stark von Dürreschäden betroffen waren. Grund für Abweichungen sind unterschiedliche Indizes und Schwellwerte, die für die Klassifizierung verwendet werden. Diese lassen sich leicht anpassen, vor allem sind dafür aber Referenzdaten / systematische Erhebungen sinnvoll, um die Klassifizierungsparameter auf die gewünschte Sensitivität einzustellen.

Die produzierten Daten lassen sich bereits für eine Lokalisierung und Quantifizierung der Auswirkungen 2022 einsetzen. Zudem lässt sich die Methode auch leicht auf andere Zeiträume und Gebiete generalisieren und an die Bedürfnisse der Forstpraxis anpassen. Darüber hinaus sehen wir eine Vielzahl an interessanten Thematiken, die bei einer Weiterführung synergetisch mitentwickelt werden könnten, z.B. (1) Lokale Vegetationsperioden nach Höhenstufen/Exposition, die uns lokale und überregionale Forstdynamik besser verstehen lassen und auch zur Planung und Detektion von Anomalien eingesetzt werden können, insbesondere im Hinblick auf klimatische Bedingungen; (2) Integration und Weiterentwicklung waldmonitoring.ch, die die Daten einer breiteren Öffentlichkeit verfügbar macht und über das Crowdsourcing-Element auch einfache Rückmeldungen zu den Daten ermöglicht, (3) eine Klimadaten-Analyse über mehrere Jahre, die uns den Zusammenhang von Klima und Auswirkungen auf den Wald besser verstehen lässt.

Anhand der im Vertrag formulierten Forschungsfragen ziehen wir abschliessend zusammenfassende Schlussfolgerungen und geben Empfehlungen für eine Fortführung.

Liefert Sentinel-2 zuverlässige Daten zur Überwachung der Auswirkungen der Trockenheit auf die Vegetationsentwicklung?

Ja, Auswirkungen von Trockenheit lassen sich grundsätzlich darstellen – allerdings ist zu relativieren, dass für dieses Projekt keine Referenzdaten zur Validierung vorlagen. Durch Diskussion, Begehung sowie den Vergleich mit der Studie Fürst & Associati (2022) lassen sich die Ergebnisse qualitativ positiv einordnen: Die Daten lassen plausible Trends auf grösseren Flächen erkennen, was vielversprechend ist. Es gibt grosses Potenzial, die Klassifizierung für konkrete Fragestellungen, Regionen und Waldtypen anzupassen.

Für eine gezielte Weiterentwicklung und die systematische Bewertung der Zuverlässigkeit wären allerdings konkrete Referenzdaten und/oder gut geplante Feldbegehungen notwendig. Die Waldbegehung im Rahmen dieses Projektes war sehr aufschlussreich und half, die entstehenden Daten einzuordnen und besser zu verstehen.

Kann das Sentinel-2-Datenmanagement standardisiert werden, um ein Überwachungsinstrument zu erhalten, das vom Forstdienst routinemässig eingesetzt werden kann?

Ja. Im Rahmen dieses Projektes wurde dies prototypisch etabliert und bereits ein Workflow zur Prozessierung für weiterführende Projekte vorgebaut, der auf der Google Earth Engine aufbaut. Mit weiterer Entwicklungszeit liesse sich die Methode operationalisieren. Synergien mit dem swisstopo/BAFU Projekt SATROMO sollten genutzt werden und werden die Ergebnisse vermutlich verbessern und methodische Weiterentwicklungen beschleunigen.

Im Bezug auf die akute Überwachung geben wir die limitierende Datenverfügbarkeit zu Bedenken: Theoretisch steht durch Überlappung alle 2-3 Tage eine Aufnahme zur Verfügung, praktisch ist jedoch mit mindestens 60% Ausfall in der Vegetationsperiode zu rechnen. Die Korrelation von Trockenstress (vermutlich wenig Wolken) und grösserer Datenverfügbarkeit wirkt sich hier positiv aus, in Niederschlagsreichen Jahren ist mit geringerer Datenverfügbarkeit zu rechnen.

² «Monitoraggio dei danni da siccità al bosco del Mendrisiotto. Rapporto intermedio - primo rilevamento estate 2022» (Monitoring der Dürreschäden im Wald des Mendrisiottos. Zwischenbericht Ersterhebung Stand 2022)

Für die Retrospektive (nachgelagerte Quantifizierung von Auswirkungen, Analyse der Dynamik) halten wird das Tool gut geeignet.

Kann der Austausch von Informationen/Daten mit der Plattform waldmonitoring.ch auf rationelle Art und Weise gewährleistet werden?

Ja, dies wäre sogar im Sinne einer langfristigen Weiterentwicklung der Methode: In der waldmonitoring.ch Plattform ist bereits ein Prototyp für ein Crowdsourcing etabliert, der auch hier zum Tragen kommen könnte, indem im Feld beobachtete Verfärbungen mit den Ergebnissen der Methode abgeglichen und für die Optimierung verwendet werden könnten.

Denkbar sind verschiedene Varianten (jährlich / monatlich / wöchentlich).

Ein jährliches Raster, das retrospektiv die Laubverfärbungsentwicklung pro Jahr zeigt, könnte mit niedrigem Aufwand umgesetzt werden. Ein kontinuierliches Raster, welches die aktuelle Entwicklung (z.B. per Woche/Monat) zeigt, setzt eine entsprechend automatisierte Berechnung voraus (siehe 2.) und ebenso weitere Entwicklungen der waldmonitoring.ch Infrastruktur oder Synergien mit SATROMO (e.g. Hosting durch swisstopo).

In Tabelle 2 zeigen wir mögliche Arbeitspakete für weiterführende Projekte auf. Diese sind modular und skalierbar zu verstehen: Je nach Fokus und Budgetierung können diese vertieft und kombiniert werden. Wir sehen grosses Potenzial in diesem Thema und Synergien mit dem SATROMO Projekt. Wir würden uns freuen, weiter an diesem Thema forschen zu können.

6 Dank

Wir bedanken uns herzlich beim BAFU, insbesondere bei Roberto Bolgé, für das Mandat und die gute Zusammenarbeit. Zudem möchten wir den beteiligten Mitarbeitern des kantonalen Forstdienstes Tessin und dem Ingenieurbüro Fürst & Associati danken, für den kooperativen Austausch, die Bereitstellung von Daten und die interessanten Beiträge zur Diskussion.

7 Anhang

7.1 Vorschläge für weiterführende Arbeiten

Tabelle 2 : Mögliche Arbeitspakete für weiterführende Projekte

AP	Beschreibung Modul
1	Vertiefung Modell "Trockenheitsmonitoring": - Forschungsfrage: Kann das räumlich-zeitliche Trockenheitsmonitoring verbessert werden? - Entfernen von Störfaktoren (Waldränder, Wege, Felsen) - Verbesserung der Klassifikation - Einbezug von IR für "Frühdetektionen" / Vorhersagen inkl. Vergleich versch. Vegetationsindizes - Forschungsfrage: Lässt sich durch die spektrale Signatur bzw. die Natur des Farbwechsels eine verfrühte (Trockenstress-)Verfärbung unterscheiden von der Herbstverfärbung?
2	Erhebung von Referenzdaten Die Erhebung von Referenzdaten kann sehr aufwändig und zeitintensiv werden. Zudem ist eine Kooperation mit lokalen Förstern sinnvoll. Verschiedene Ideen sind denkbar: - auf Sicht aus Sentinel 2 Daten/anderen Luftbildern - Interviews/Aufnahmen lokaler Förster - über Zeit durch die Validierung unserer Hinweiskarten
3	Validierung mit Referenzdaten - Aufbereiten von Referenzdaten als Basis für die Validierung und Weiterentwicklung des Trockenstress-Modells
4	Lokale Vegetationsperioden nach Höhenstufen/Exposition: - Analyse der Frühlings-/Herbst-Verfärbung - Forschungsfrage: Lassen sich differenziert durch Höhenstufe und Exposition aus der Zeitreihe 2016 - 2022 lokale Vegetationsperioden für Laubhölzer bestimmen?
5	Klimadaten Korrelations-Analyse: - Forschungsfrage: Gibt es klare Trends und Korrelationen zwischen der räumlich-zeitlichen Entwicklung der Laubverfärbung und den Klimadaten? - Aufbereiten der Klimadaten für vertiefte Analyse
6	Anforderungskatalog für den operationellen Betrieb: - Erstellung eines Anforderungskataloges in Kooperation mit kantonalen Förstern - Forschungsfrage: Welche Funktionalitäten, Informationen und Abläufe sind für den operationellen Betrieb wichtig?
7	Integration und Weiterentwicklung waldmonitoring.ch (jährlich): - Vorbereitung Geodaten für die Integration - Erstellen eines Geodienstes "Verfrühte Laubverfärbung Juni - Sept" - ggf. Erstellen eines Geodienstes "Lokale Vegetationsperioden" (vgl. AP4) - Zusammenarbeit mit kartenwerk GmbH für die Anpassung und Weiterentwicklung von waldmonitoring.ch
8	Aufbau Live Geodateninfrastruktur waldmonitoring.ch: - Untersuchen von Cloud und Hosting Optionen für den operationellen Betrieb eines "Live" Updates (automatische Prozessierung der Geodaten sobald verfügbar) - Implementierung des Trockenheitsmonitorings - Zusammenarbeit mit swisstopo und kartenwerk GmbH für die Anpassung und Weiterentwicklung von waldmonitoring.ch

7.2 Lieferung Geodaten

Die Resultate werden als Geodaten (GeoTIFF) geliefert. Dazu wurde ein Datenordner angelegt, in dem ein QGIS Projekt `Laubverfaerbung_TI_all.qgz` enthalten ist, sowie ein Unterordner «results», der für die Jahre 2021, 2022 und 2023 folgende Raster enthält:

- `date_of_change_202X.tif` : Das Datum, an dem die erste Laubverfärbung auftrat (als Ganzzahl (Integer) kodiert; die Aufschlüsselung Integer zu Datum ist im GIS-Style integriert oder im mitgelieferten `date_of_change_code_4_legend_202X.txt` File enthalten.) (vgl. Abbildung 11)
- `date_of_change_code_4_legend_202X.txt` : Die Codierung für die im `date_of_change` enthaltenen Zahlen (Integer zu Datum), nur erforderlich falls das mitgelieferte QGIS Projekt bzw. der darin enthaltene Style nicht verwendet werden.
- `n_usable_dates_202X.tif` : Anzahl der nutzbaren Satellitendaten pro Rasterzelle (nach Filterung von Wolken und anderen Störfaktoren, vgl. Abbildung 6, 7)
- `number_of_dates_r_greater_than_g_202X.tif` : Anzahl der Daten, an denen jede Rasterzelle als verfärbt beobachtbar war (hilft bei der Bestimmung der Konsistenz der Verfärbung, vgl. Abbildung 16, 17)
- `percentage_remaining_r_greater_than_g_202X.tif` : Anteil der Daten nach der ersten Verfärbung, an denen jede Rasterzelle weiterhin als verfärbt beobachtbar war (dient als Proxy zur Konsistenz der Verfärbung, vgl. Abbildung 14, 15)

Der Unterordner «perimeter» enthält für die Darstellung im QGIS Projekt relevante Geodaten, ebenso wie der in «Fuerst_Associati» enthaltene Geodatenatz des Ingenieurbüros Fürst&Associati, der vergleichsweise im QGIS Projekt dargestellt werden kann.

Das QGIS Projekt enthält Symbolgien für alle Layer, ebenso wie Kartenthemen, mit denen zwischen den Ansichten hin- und hergewechselt werden kann (Abbildung 18). Um das Projekt auf mobilen Geräten mit QField zu verwenden, muss der gesamte Datenordner (inkl. Unterordnern und Projekt) auf das Gerät kopiert werden (z.B. per USB Datenkabel) und das Projekt in QField importiert werden.

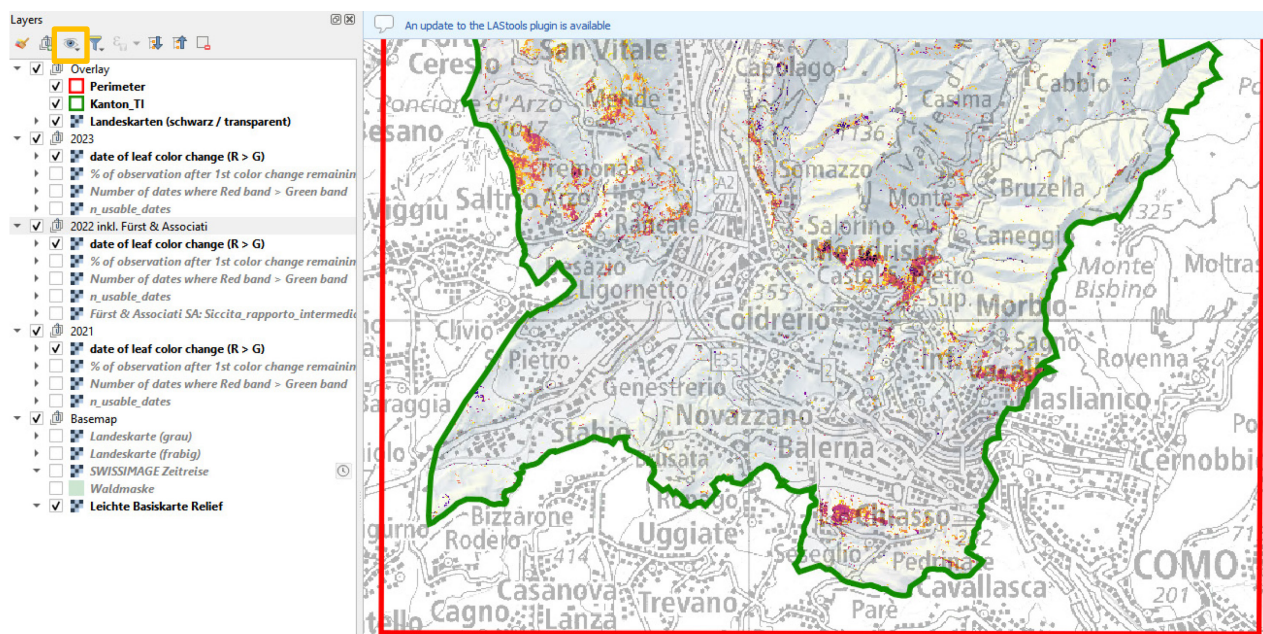


Abbildung 18 : Ansicht des QGIS Projektes mit allen enthaltenen Layern. Über das orange umrandete Augen-Symbol können die erstellten Karten-Themen ausgewählt werden.