

IDS Institut für Data Science

Bachelorarbeit Wirtschaftsingenieurwesen

Time series analyses on plant phenological development in the Swiss National Park

Zeitreihenanalyse und Qualitätsbewertung phänologischer Daten im Schweizerischen Nationalpark unter Einbezug von MeteoSchweiz-Daten

Autor	Alexander Prinz
Hauptbetreuung	Dr. Christoph Hofer (ZHAW) Dr. Lorenzo Tanadini (ZHAW)
Industriepartner	Dr. Stefanie Gubler (SCNAT) Dr. Sam Cruickshank (SNP)
Externe Betreuung	Dr. Yann Vitasse (WSL) Fadri Bott (SNP)
Datum	04.06.2026

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	0
Zusammenfassung	1
Abstract.....	3
Einleitung.....	4
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	4
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Theoretische Grundlagen	8
2.1 Phänologie und klimatische Einflussfaktoren	8
2.1.1 Grundlagen der Phänologie	8
2.1.2 Klimatische Einflussfaktoren auf phänologische Prozesse	8
2.2 Zeitreihenanalyse in der Phänologie	9
2.3 Fehlerquellen in phänologischen Datensätzen.....	10
2.4 Vergleichbarkeit heterogener Datensätze	11
3 Daten und Methodik	13
3.1 Datengrundlagen	13
3.2 Datenaufbereitung und Harmonisierung.....	15
3.3 Struktur und Eigenschaften des SNP-Datensatzes.....	16
3.4 Entwicklung der Shiny-App.....	18
3.4.1 Vorgehen.....	19
3.4.2 Funktionalitäten der Shiny-App	20
3.5 Explorative Datenanalyse / Methodik der Fehleranalyse	22
3.6 Statistische Modellierung und Trendanalyse.....	24
3.7 Einsatz generativer KI-Systeme	27
4 Resultate	28
4.1 Ergebnisse der explorativen Analyse	28
4.1.1 Zeitliche Entwicklung der Datenerhebung.....	28
4.1.2 Räumliche Verteilung und Standortstruktur	29
4.1.3 Arten- und Stadienabdeckung.....	30
4.1.4 Verfügbarkeit langfristiger Zeitreihen	31
4.1.5 Phänologische Muster und regionale Unterschiede.....	32
4.1.6 Anomalien und besondere Beobachtungen	34
4.1.7 Zwischenfazit für den Nationalpark	35
4.2 Datenqualität und Einordnung durch Experten.....	35
4.3 Ergebnisse der statistischen Analyse	42

4.3.1 Auswahl der Zeitreihen	43
4.3.2 Übersicht der Trendergebnisse	43
4.3.3 Detailbetrachtung ausgewählter Zeitreihen.....	45
4.3.4 Plausibilisierung mit publizierten Trends.....	50
4.3.5 Anmerkungen zur Prognose-Frage	51
4.3.6 Zwischenfazit für Kapitel 5	51
4.4 Plausibilisierung mit MeteoSchweiz-Daten.....	52
5 Diskussion und Ausblick.....	55
5.1 Interpretation der Ergebnisse	55
5.1.1 Bewertung der Datenqualität.....	55
5.1.2 Einordnung der Trendanalyse.....	57
5.2 Nutzen der Shiny-App für den Nationalpark.....	59
5.3 Limitationen der Arbeit.....	62
5.4 Handlungsempfehlungen.....	64
5.5 Ausblick	67
6 Verzeichnisse.....	70
6.1 Literaturverzeichnis	70
6.2 Persönliche Mitteilungen	72
6.3 Verzeichnis generativer KI-Systeme	72
Anhang.....	73

Vorwort

Im Frühjahr 2025 hatte ich die Möglichkeit, drei Monate Zivildienst im Schweizerischen Nationalpark zu leisten. In dieser Zeit lernte ich nicht nur die Vielfalt des Nationalparks und das Engagement der dort tätigen Personen kennen, sondern auch zahlreiche spannende Forschungsprojekte, die im Umfeld des Parks entstehen. In Gesprächen mit Stefanie Gubler und Sam Cruickshank kam dabei die Idee zur vorliegenden Bachelorarbeit auf, eine Themenwahl, die ich rückblickend nicht hätte besser treffen können und für die ich sehr dankbar bin.

Mein Dank gilt Sam Cruickshank für die unkomplizierte Bereitstellung der phänologischen Daten, die Rückmeldungen zur Shiny-Applikation und die wertvollen inhaltlichen Hinweise im Verlauf der Arbeit. Ebenso danke ich Stefanie Gubler, Leiterin der Forschungskommission Schweizerischer Nationalpark, für ihr frühes Interesse an der Arbeit und ihre konstruktiven Anregungen. Fadri Bott, dem Leiter der Nationalparkwächter, gilt mein besonderer Dank für das ausführliche persönliche Gespräch im Juni 2026, das die Einordnung vieler im Datensatz erkennbarer Muster überhaupt erst möglich gemacht hat.

Yann Vitasse von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL danke ich für seine bereitwilligen fachlichen Auskünfte zu methodischen Fragen rund um das Thema Phänologie.

Mein herzlicher Dank gilt ausserdem meinen beiden Betreuern an der ZHAW, Christoph Hofer und Lorenzo Tanadini, für ihre kontinuierliche Begleitung über das gesamte Semester hinweg. Ihre wöchentliche Verfügbarkeit, die offenen Diskussionen und die wertvollen methodischen Impulse haben die Qualität dieser Arbeit massgeblich geprägt. Darüber hinaus hat mir die Zusammenarbeit mit den beiden grosse Freude bereitet, so sehr, dass ich rückblickend sagen kann, dass die Bachelorarbeit der schönste und spannendste Teil meines gesamten Studiums war. Das hätte ich zu Beginn nicht erwartet und es ist nicht zuletzt das Verdienst meiner Betreuung.

Zusammenfassung

Der Schweizerische Nationalpark erhebt seit 1994 phänologische Daten zu 19 Pflanzenarten in fünf Regionen des Parks. Dieser über drei Jahrzehnte gewachsene Datensatz mit rund 2'400 Beobachtungen birgt das Potenzial, Aussagen über klimabedingte Verschiebungen im alpinen Vegetationszyklus zu treffen. Doch wie belastbar sind die enthaltenen Signale und in welcher Form sollte die Erhebung künftig fortgeführt werden?

Die vorliegende Bachelorarbeit verfolgt drei Ziele: die strukturierte Aufbereitung des Datensatzes, die statistische Analyse erkennbarer Trends sowie die Entwicklung einer interaktiven Shiny-Plattform, die den Datensatz für künftige Nutzer zugänglich macht. Methodisch verbindet die Arbeit eine umfassende explorative Datenanalyse mit einer formalen Trendanalyse mittels Mann-Kendall-Test, Sen's Slope und ergänzender GAM-Glättung. Die Methodenwahl orientiert sich am etablierten Stand der phänologischen Forschung und stützt sich unter anderem auf eine persönliche Mitteilung von Yann Vitasse (WSL) sowie auf die Diskussion mit der wissenschaftlichen Betreuung.

Eine besondere Stärke der Arbeit liegt in der Verbindung von datenbasierter Eigenanalyse und qualitativer Expertenbefragung. Auffällige Muster im Datensatz wurden in einem persönlichen Gespräch mit dem Leiter der Nationalparkwächter eingeordnet, wodurch personelle, organisatorische und biologische Hintergründe vieler Datenlücken und Inhomogenitäten systematisch dokumentiert werden konnten. Ergänzend wurden die SNP-Beobachtungen anhand fünf vergleichbarer Stationen des Schweizer Phänologie-Netzwerks plausibilisiert. Dieser Vergleich bestätigt die phänologische Konsistenz der SNP-Daten mit unabhängig erhobenen Referenzwerten und stützt damit die Aussagekraft des Datensatzes über die organisationsbedingten Eigenheiten der Erhebung hinaus.

Von den 165 möglichen Zeitreihen erfüllen 30 die formalen Kriterien für eine belastbare Trendanalyse. Drei Trends erreichen statistische Signifikanz; nur einer, die Verspätung der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn um 3.3 Tage pro Dekade, bleibt auch nach Korrektur für multiples Testen robust. Die übrigen Signale weisen tendenziell in die in der Literatur dokumentierte Richtung, ohne eindeutig signifikant zu sein. Bemerkenswert ist insbesondere das Ausbleiben der erwarteten Verfrühung bei der Lärchen-Blattentfaltung, ein Befund, der mehrere physiologische und methodische Erklärungen zulässt und im Bericht differenziert diskutiert wird.

Aus den Resultaten leitet sich die Empfehlung ab, die phänologische Erhebung im Schweizerischen Nationalpark fortzuführen, allerdings in einer schlanker fokussierten Form. Eine Reduktion auf wenige Indikator-Arten in allen fünf Regionen, eine institutionell verankerte Projektverantwortung sowie eine konsequente Nutzung der seit 2023 verfügbaren digitalen

Erhebungs-App würden die wissenschaftliche Aussagekraft des Datensatzes in den kommenden Jahrzehnten substanziell stärken. Die Arbeit positioniert das phänologische Monitoring des Schweizerischen Nationalparks zugleich als komplementäre Datenquelle zum nationalen Phänologie-Netzwerk, mit eigenständigem Wert für die alpine, naturschutzorientierte Klimaforschung der kommenden Jahrzehnte.

Abstract

Since 1994, the Swiss National Park has been monitoring the phenology of 19 plant species across five regions. This three-decade dataset of approximately 2'400 observations holds the potential to reveal climate-driven shifts in the alpine vegetation cycle – yet how reliable are these signals, and in what form should the monitoring be continued?

This Bachelor's thesis pursues three objectives: a structured documentation of the dataset, a statistical analysis of identifiable trends, and the development of an interactive Shiny platform that makes the dataset accessible for future users. Methodologically, the work combines a comprehensive exploratory data analysis with a formal trend analysis using the Mann-Kendall test, Sen's Slope estimates, and supplementary GAM smoothing. The methodological choices follow the established state of phenological research and draw, among other things, on a personal communication with Yann Vitasse (WSL) and on discussions with the academic supervision.

A particular strength of this work lies in combining quantitative data analysis with qualitative expert assessment. Conspicuous patterns in the dataset were contextualised in a personal interview with the head of the national park rangers, which made it possible to systematically document the personnel-related, organisational and biological backgrounds of many data gaps and inhomogeneities for the first time. In addition, the SNP observations were cross-validated against five comparable stations of the Swiss Phenology Network. This comparison confirms the phenological consistency of the SNP data with independently collected reference values and thus supports the validity of the dataset beyond the organisational particularities of its collection.

Of the 165 candidate time series, 30 meet the formal criteria for a robust trend analysis, of which 12 were selected. Three trends reach statistical significance; only one – the delay of larch leaf discoloration in Fuorn by 3.3 days per decade – remains robust after correcting for multiple testing. The remaining signals tend to point in the direction documented in the literature without being clearly significant. Particularly noteworthy is the absence of the expected advancement in larch leaf unfolding – a finding that allows for several physiological and methodological explanations and is discussed in detail in the report.

Based on these results, the thesis recommends continuing the phenological monitoring in the Swiss National Park, but in a more focused form. A reduction to a few indicator species across all five regions, an institutionally anchored project responsibility, and the consistent use of the digital data collection app available since 2023 would substantially strengthen the scientific power of the dataset over the coming decades. At the same time, the thesis positions the phenological monitoring of the Swiss National Park as a complementary data source to the national phenology network – with its own distinct value for alpine, conservation-oriented climate research in the decades to come.

Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Der Schweizerische Nationalpark erhebt seit 1994 phänologische Daten zu ausgewählten Pflanzenarten in mehreren Regionen des Parks. Die Datenerhebung erfolgt in vier Tälern durch Parkwächter, die während der Vegetationsperiode wiederholt definierte Standorte aufsuchen und den Entwicklungsstand einzelner Pflanzen dokumentieren. Seit 2017 werden ergänzend Daten aus dem Val Müstair bei Lü erhoben, wodurch der Datensatz um eine zusätzliche Vergleichsperspektive erweitert wird. Ziel dieser langfristigen Beobachtungen ist es, saisonale Entwicklungsverläufe der Vegetation systematisch zu erfassen und in einen klimatischen Kontext einzuordnen.

Die Erhebung basiert auf klar definierten phänologischen Stadien, die im Rahmen des schweizweiten Monitorings unter anderem von MeteoSchweiz standardisiert beschrieben sind. Diese Definitionen gewährleisten grundsätzlich eine einheitliche Grundlage für die Beobachtung und schaffen die Voraussetzung für eine konsistente Datenerfassung über längere Zeiträume hinweg. Gleichzeitig ist die praktische Umsetzung im Feld durch unterschiedliche Standortbedingungen, Besuchsfrequenzen und artspezifische Eigenschaften geprägt. Nicht alle Arten werden in allen Regionen erfasst, und auch die Auswahl der Standorte ist historisch gewachsen und heute nicht in allen Fällen vollständig dokumentiert.

Bis einschliesslich 2022 wurde für jedes beobachtete phänologische Ereignis pro Jahr ein einzelnes Datum erfasst. Dieses basierte auf den Einschätzungen der Feldmitarbeitenden, die ihre Beobachtungen während der Saison sowie ihre Erfahrungen vor Ort einbezogen. Mit der Umstellung der Datenerhebung im Jahr 2023 wurde dieses Vorgehen weiterentwickelt. Seither werden sämtliche Standortbesuche sowie die jeweils beobachteten Zustände in einer digitalen Anwendung erfasst. Zusätzlich dokumentieren die Beobachter, ob ein Ereignis bereits eingetreten ist, unmittelbar bevorsteht oder genau am Beobachtungstag stattgefunden hat. Auf dieser Grundlage lassen sich Zeitintervalle ableiten, innerhalb derer ein phänologisches Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit eingetreten ist.

Diese Weiterentwicklung ermöglicht eine differenziertere Betrachtung der Daten, insbesondere im Hinblick auf die zeitliche Einordnung der Ereignisse und die damit verbundene Unsicherheit. Gleichzeitig führt sie dazu, dass der Datensatz unterschiedliche Erhebungslogiken umfasst, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Auch Unterschiede in der Besuchsfrequenz zwischen den Regionen sowie die teilweise ungleiche Verteilung der beobachteten Arten tragen dazu bei, dass die Daten nicht ohne Weiteres direkt vergleichbar sind.

Vor diesem Hintergrund besteht die zentrale Herausforderung darin, den vorhandenen Datensatz in seiner Gesamtheit zu verstehen und strukturiert aufzubereiten. Dies umfasst die Analyse der zeitlichen und räumlichen Abdeckung, die Einordnung der verschiedenen Erhebungsphasen sowie die Berücksichtigung der aus den Beobachtungsprozessen resultierenden Eigenschaften der Daten. Darüber hinaus ist zu klären, inwiefern eine Vergleichbarkeit mit externen Datensätzen gegeben ist und unter welchen Voraussetzungen eine gemeinsame Auswertung sinnvoll erfolgen kann.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den phänologischen Datensatz des Schweizerischen Nationalparks systematisch zu analysieren, seine Struktur transparent darzustellen und eine fundierte Grundlage für dessen zukünftige Nutzung zu schaffen. Im Zentrum steht die nachvollziehbare Aufbereitung der Daten, sodass sowohl deren inhaltliche Aussagekraft als auch ihre methodischen Eigenschaften klar verständlich werden.

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die Untersuchung der Datengrundlage hinsichtlich zeitlicher Abdeckung, räumlicher Verteilung sowie der erfassten phänologischen Stadien. Darauf aufbauend werden zentrale Eigenschaften des Datensatzes herausgearbeitet, insbesondere im Zusammenhang mit der praktischen Datenerhebung im Feld, den Erhebungsintervallen sowie der Umstellung der Datenerfassung im Jahr 2023.

Neben der explorativen Analyse werden ausgewählte statistische Verfahren eingesetzt, um zeitliche Entwicklungen innerhalb geeigneter Zeitreihen zu untersuchen. Dabei steht nicht eine umfassende Prognose im Vordergrund, sondern die Frage, ob und in welchem Umfang sich anhand der vorhandenen Daten belastbare Muster, Trends oder regionale Unterschiede erkennen lassen. Die statistische Analyse dient damit der methodischen Einordnung der Datenqualität und der Beurteilung ihrer Aussagekraft.

Ergänzend wird die Vergleichbarkeit mit externen Datensätzen, insbesondere von MeteoSchweiz, untersucht. Dabei steht die Frage im Vordergrund, unter welchen Voraussetzungen eine sinnvolle Gegenüberstellung möglich ist und welche methodischen Anpassungen dafür erforderlich sind.

Zur Unterstützung der Analyse und zur praktischen Nutzbarmachung der Ergebnisse wird im Rahmen dieser Arbeit eine interaktive Shiny-App entwickelt. Diese ermöglicht es, den Datensatz flexibel zu explorieren, ausgewählte Aspekte visuell darzustellen und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Datenquellen durchzuführen.

Darüber hinaus soll die Arbeit eine Einschätzung ermöglichen, ob und in welcher Form die phänologische Erhebung künftig weitergeführt werden soll. Entscheidend ist dabei das Verhältnis zwischen Aufwand und Erkenntnisgewinn: Wenn die Daten belastbare Aussagen ermöglichen, kann die Weiterführung fachlich begründet werden; wenn ihre Aussagekraft

stark eingeschränkt ist, müssen Anpassungen an Erhebung, Umfang oder Auswertung geprüft werden.

Damit verfolgt die Arbeit das übergeordnete Ziel, die vorhandenen phänologischen Daten gezielt nutzbar zu machen und eine Entscheidungsgrundlage für deren zukünftige Verwendung im wissenschaftlichen und praktischen Kontext des Nationalparks zu schaffen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit kombiniert wissenschaftliche Analyseansätze mit einer praxisorientierten Betrachtung der phänologischen Datenerhebung im Schweizerischen Nationalpark. Ziel ist es, die bestehende Datengrundlage sowohl methodisch als auch inhaltlich einzuordnen und daraus Erkenntnisse für die zukünftige Nutzung und Weiterentwicklung des Datensatzes abzuleiten. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich deshalb an einem schrittweisen Vorgehen, das von den theoretischen Grundlagen über die Analyse der Datengrundlage bis hin zur Interpretation der Ergebnisse und möglichen Handlungsempfehlungen führt.

Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 zunächst die theoretischen Grundlagen behandelt. Dabei werden zentrale Konzepte der Phänologie sowie die wichtigsten klimatischen Einflussfaktoren auf phänologische Prozesse erläutert. Ergänzend werden Grundlagen der Zeitreihenanalyse, typische Fehlerquellen in phänologischen Datensätzen sowie Herausforderungen bei der Vergleichbarkeit heterogener Datensätze beschrieben. Dieses Kapitel schafft die fachliche Grundlage für die anschliessenden Analysen und ordnet die Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext der phänologischen Forschung ein.

Kapitel 3 bildet das methodische Kernkapitel der Arbeit. Zunächst werden die verwendeten Datengrundlagen vorgestellt und die Struktur des Datensatzes des Schweizerischen Nationalparks beschrieben. Anschliessend wird die Datenaufbereitung und Harmonisierung erläutert, insbesondere im Zusammenhang mit der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Datenquellen. Ergänzend wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Shiny-App vorgestellt, welche der explorativen Analyse, Visualisierung und Vergleichbarkeit der Daten dient. Darauf aufbauend werden die Vorgehensweisen der explorativen Analyse, der Fehleranalyse sowie der statistischen Auswertung beschrieben. Die statistischen Analysen konzentrieren sich dabei bewusst auf ausgewählte und geeignete Zeitreihen, um belastbare und nachvollziehbare Ergebnisse zu gewährleisten. Der Fokus der Arbeit liegt somit nicht auf einer umfassenden Modellierung sämtlicher Datenreihen oder auf langfristigen Klimaprognosen, sondern auf einer strukturierten Analyse der vorhandenen Datengrundlage und deren Aussagekraft.

Die Resultate der Arbeit werden in Kapitel 4 dargestellt. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der explorativen Analyse präsentiert, um die Struktur und Eigenschaften des Daten-

satzes nachvollziehbar aufzuzeigen. Anschliessend folgen die Ergebnisse zur Datenqualität und ihrer Einordnung durch Experten, welche insbesondere Unsicherheiten und charakteristische Eigenschaften der Datenerhebung beleuchten. Darauf aufbauend werden ausgewählte statistische Resultate und zeitliche Entwicklungen dargestellt und interpretiert. Neben allgemeinen Mustern werden dabei auch Unterschiede zwischen Regionen, Arten und phänologischen Stadien berücksichtigt, sofern diese anhand der verfügbaren Daten sinnvoll interpretierbar sind.

Kapitel 5 dient der Einordnung und Diskussion der Ergebnisse. Dabei werden die Resultate sowohl im wissenschaftlichen Kontext als auch hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung für den Schweizerischen Nationalpark diskutiert. Zusätzlich werden Limitationen der Arbeit sowie methodische Einschränkungen der Datengrundlage aufgezeigt. Aufbauend darauf werden Handlungsempfehlungen formuliert, welche insbesondere die zukünftige Nutzung, Weiterentwicklung und Priorisierung der phänologischen Datenerhebung betreffen. In diesem Zusammenhang wird auch die Frage behandelt, in welchem Umfang und in welcher Form die bestehende Datenerhebung künftig sinnvoll weitergeführt werden kann. Abschliessend wird ein Ausblick auf mögliche weiterführende Analysen und zukünftige Entwicklungen gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Phänologie und klimatische Einflussfaktoren

2.1.1 Grundlagen der Phänologie

Phänologie befasst sich mit der zeitlichen Abfolge wiederkehrender biologischer Entwicklungsprozesse im Jahresverlauf. Im Zentrum stehen klar definierte Entwicklungsstadien von Pflanzen, wie Blattentfaltung, Blühbeginn oder Blattverfärbung, die als phänologische Stadien bezeichnet werden. Diese treten nicht zu fixen Kalenderdaten auf, sondern reagieren sensibel auf Umweltbedingungen und variieren daher von Jahr zu Jahr. [Schwartz, *Phenology: An Integrative Environmental Science*, 2013, S. 3–7, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-6925-0>]

Ein wesentliches Merkmal phänologischer Beobachtungen ist ihre Funktion als integrierte Umweltindikatoren. Die erfassten Zeitpunkte spiegeln nicht nur kurzfristige Wetterbedingungen wider, sondern kumulative Effekte über längere Zeiträume. Dadurch eignen sich phänologische Daten besonders zur Analyse von Veränderungen in ökologischen Systemen und werden häufig im Kontext klimatischer Veränderungen interpretiert. [IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Kapitel 2, S. 185–190, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>]

Für eine konsistente Datenerhebung ist die standardisierte Definition der einzelnen Stadien zentral. In der Schweiz werden diese unter anderem im Rahmen des Monitorings durch MeteoSchweiz festgelegt. Die Standardisierung stellt sicher, dass phänologische Ereignisse unabhängig von Ort und Beobachter vergleichbar erfasst werden können. [MeteoSchweiz, *Phänologie der Pflanzen – Beobachtungsanleitung*, Einleitung und Methodenbeschreibung, S. 5–12, <https://www.meteoschweiz.admin.ch>]

2.1.2 Klimatische Einflussfaktoren auf phänologische Prozesse

Die zeitliche Ausprägung phänologischer Stadien wird primär durch klimatische Faktoren gesteuert. Von besonderer Bedeutung ist die Temperatur, insbesondere in Form von akkumulierten Wärmesummen im Jahresverlauf. Viele Entwicklungsprozesse beginnen erst, wenn bestimmte Temperaturschwellen erreicht werden, wodurch sich der Zeitpunkt phänologischer Ereignisse direkt aus der thermischen Entwicklung eines Jahres ableiten lässt. [Chuine & Régnière, *Process-based models of phenology*, 2017, S. 529–533, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.00992.x>]

Neben der Temperatur spielen weitere Einflussgrößen eine wichtige Rolle. In alpinen Regionen beeinflusst die Schneebedeckung den Vegetationsbeginn, da sie den Zugang zu Licht und Wärme bestimmt. Die Tageslänge wirkt als stabiler Steuerfaktor, insbesondere

für spätsaisonale Prozesse wie Blattverfärbung oder Vegetationsruhe. Zusätzlich können Niederschlag, Bodenfeuchte und lokale Standortbedingungen die Entwicklung einzelner Stadien modulieren. [Körner, *Alpine Plant Life*, 2003, Kapitel 6, S. 123–135, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-18970-8>]

Die Wirkung dieser Faktoren erfolgt nicht isoliert, sondern im Zusammenspiel. Gleichzeitig reagieren verschiedene Pflanzenarten unterschiedlich stark auf identische klimatische Bedingungen, was zu artspezifischen phänologischen Mustern führt. Diese Variabilität ist für die Interpretation von Zeitreihen zentral und muss bei der Analyse berücksichtigt werden. [Cleland et al., *Shifting plant phenology in response to global change*, 2007, S. 358–360, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>]

2.2 Zeitreihenanalyse in der Phänologie

Langfristige phänologische Beobachtungen ermöglichen die Analyse zeitlicher Veränderungen biologischer Prozesse und bilden damit eine wichtige Grundlage zur Untersuchung klimabedingter Entwicklungen in Ökosystemen. Werden phänologische Ereignisse über mehrere Jahre oder Jahrzehnte hinweg systematisch erfasst, entstehen Zeitreihen, anhand derer sich Veränderungen im saisonalen Ablauf der Vegetationsentwicklung untersuchen lassen. Von besonderem Interesse sind dabei Verschiebungen des Zeitpunkts phänologischer Stadien, Veränderungen der jährlichen Variabilität sowie mögliche Unterschiede zwischen Regionen, Höhenlagen oder Pflanzenarten. [Menzel & Fabian, Growing season extended in Europe, *Nature*, 1999, S. 659–661, <https://doi.org/10.1038/21563>]

Die Zeitreihenanalyse stellt in der Phänologie ein zentrales Werkzeug dar, um langfristige Entwicklungen sichtbar zu machen und mögliche Zusammenhänge mit klimatischen Veränderungen zu untersuchen. In zahlreichen Studien konnte gezeigt werden, dass insbesondere Frühjahrsphasen vieler Pflanzenarten in den letzten Jahrzehnten zunehmend früher auftreten. Solche Veränderungen werden häufig mit steigenden Temperaturen in Verbindung gebracht und gelten als wichtige Indikatoren für klimatische Veränderungen. [Piao et al., Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges, Abschnitt „Observed changes in plant phenology“, S. 1923–1926, <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>]

Die Analyse phänologischer Zeitreihen bringt jedoch verschiedene methodische Herausforderungen mit sich. Im Gegensatz zu stark standardisierten Messreihen weisen ökologische Langzeitdaten häufig Unterschiede in Beobachtungsfrequenz, Datendichte oder Erhebungsmethodik auf. Zusätzlich können unregelmässige Beobachtungsintervalle, fehlende Werte oder Veränderungen in der Datenerfassung die Interpretation zeitlicher Entwicklungen beeinflussen. Gerade bei langfristigen Datensätzen ist deshalb eine sorgfältige Einordnung der Datengrundlage notwendig, bevor Trends oder statistische Zusammenhänge interpretiert werden. [Keenan et al., On quantifying the apparent temperature sensitivity of

plant phenology, Abschnitt „Challenges in interpreting phenological sensitivity“, S. 1033–1038, <https://doi.org/10.1111/nph.16144>

Hinzu kommt, dass phänologische Prozesse häufig nichtlinear auf Umweltveränderungen reagieren. Entwicklungen verlaufen daher nicht zwangsläufig konstant über die Zeit, sondern können sich je nach klimatischen Bedingungen, Standort oder Pflanzenart unterschiedlich ausprägen. Dadurch gewinnen flexible statistische Ansätze und eine differenzierte Interpretation der Zeitreihen zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass beobachtete Veränderungen nicht ausschliesslich biologische Ursachen haben müssen, sondern teilweise auch durch methodische oder mathematische Effekte beeinflusst werden können. [Walde et al., Rethinking the interpretation of spring phenological temperature sensitivity, Abschnitt „The common thermal sum model“, S. 1–3.]

Die Zeitreihenanalyse in der Phänologie dient deshalb nicht nur der Identifikation möglicher Trends, sondern auch der Einordnung der Aussagekraft und Belastbarkeit der zugrunde liegenden Datensätze. Insbesondere bei langfristigen Monitoringprogrammen stellt sie eine wichtige Grundlage dar, um Veränderungen im Vegetationsverlauf nachvollziehbar zu dokumentieren und deren Interpretation wissenschaftlich einzuordnen.

2.3 Fehlerquellen in phänologischen Datensätzen

Phänologische Datensätze weisen aufgrund ihrer biologischen, räumlichen und methodischen Eigenschaften verschiedene potenzielle Fehlerquellen und Unsicherheiten auf. Diese können die Vergleichbarkeit von Beobachtungen sowie die Interpretation zeitlicher Entwicklungen beeinflussen und müssen deshalb bei der Analyse langfristiger Zeitreihen berücksichtigt werden. Besonders bei ökologischen Monitoringprogrammen, die über mehrere Jahrzehnte hinweg durchgeführt werden, entstehen häufig Unterschiede in Datendichte, Beobachtungsfrequenz oder Erhebungsmethodik. [Morissette et al., Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century, Abschnitt „Challenges in phenological monitoring“, S. 253–255, <https://doi.org/10.3389/fevo.2009.00076>

Eine wichtige Rolle spielt die Beobachterabhängigkeit der Datenerhebung. Die Einschätzung phänologischer Stadien erfolgt häufig im Feld und kann insbesondere bei Übergangsstadien unterschiedlich interpretiert werden. Unterschiede in Erfahrung, Beobachtungspraxis oder subjektiver Wahrnehmung können dazu führen, dass identische Entwicklungsstadien nicht vollständig konsistent erfasst werden. Dieser Einfluss lässt sich auch durch standardisierte Beobachtungsrichtlinien nicht vollständig ausschliessen. [Miller-Rushing et al., The history of public participation in ecological research, Abschnitt „Observer effects and data quality“, S. 285–287, <https://doi.org/10.3389/fevo.2012.00041>

Zusätzlich beeinflusst die zeitliche Auflösung der Beobachtungen die Genauigkeit phänologischer Datensätze. Da Beobachtungen häufig in bestimmten zeitlichen Intervallen erfolgen, kann der exakte Zeitpunkt eines phänologischen Ereignisses oftmals nur geschätzt werden. Je grösser die Abstände zwischen den Beobachtungen sind, desto höher ist die Unsicherheit hinsichtlich des tatsächlichen Eintrittszeitpunkts eines Ereignisses. [Denny et al., Standardized phenology monitoring methods to track plant and animal activity for science and resource management applications, Abschnitt „Sampling frequency and uncertainty“, S. 593–596, <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9780-1>]

Neben methodischen Einflüssen spielt auch die natürliche Variabilität biologischer Systeme eine wichtige Rolle. Pflanzen reagieren unterschiedlich auf lokale Umweltbedingungen wie Höhenlage, Schneebedeckung, Exposition oder Bodenfeuchte. Selbst innerhalb derselben Art können dadurch deutliche Unterschiede im zeitlichen Ablauf phänologischer Prozesse auftreten. Diese natürliche Variabilität erschwert die Abgrenzung zwischen tatsächlichen Trends und standortbedingten Schwankungen. [Körner, Alpine Plant Life, Kapitel 6 „Phenology and Seasonality“, S. 123–135, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-18970-8>]

Weitere Herausforderungen ergeben sich durch Veränderungen der Erhebungsmethodik über längere Beobachtungszeiträume hinweg. Anpassungen in der Datenerfassung, unterschiedliche Dokumentationsformen oder Veränderungen der beobachteten Standorte und Arten können die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Zeitabschnitten beeinflussen. Insbesondere bei langfristigen Datensätzen ist deshalb eine sorgfältige Einordnung der Datengrundlage erforderlich, bevor statistische Analysen oder Trendinterpretationen vorgenommen werden. [Keenan et al., On quantifying the apparent temperature sensitivity of plant phenology, Abschnitt „Challenges in interpreting phenological sensitivity“, S. 1033–1038, <https://doi.org/10.1111/nph.16144>]

Die Berücksichtigung solcher Unsicherheiten stellt einen zentralen Bestandteil der Analyse phänologischer Datensätze dar. Sie ist entscheidend, um die Aussagekraft von Zeitreihen korrekt einzuordnen und mögliche Fehlinterpretationen langfristiger Entwicklungen zu vermeiden.

2.4 Vergleichbarkeit heterogener Datensätze

Die gemeinsame Analyse unterschiedlicher phänologischer Datensätze bietet die Möglichkeit, räumliche und zeitliche Entwicklungen über einzelne Monitoringprogramme hinaus zu untersuchen. Gleichzeitig stellt die Vergleichbarkeit heterogener Datensätze eine zentrale methodische Herausforderung dar. Unterschiede in Datenerhebung, Beobachtungsdesign, räumlicher Auflösung oder Definition phänologischer Stadien können dazu führen, dass Datensätze nicht ohne Weiteres direkt miteinander vergleichbar sind.

Besonders relevant sind Unterschiede in der Erfassungsmethodik. Während einige Monitoringprogramme auf regelmässigen Feldbeobachtungen basieren, verwenden andere modellierte Daten, Fernerkundungsdaten oder unterschiedliche Beobachtungsintervalle. Dadurch können phänologische Ereignisse mit unterschiedlicher Genauigkeit und zeitlicher Auflösung erfasst werden. Zusätzlich können Abweichungen in der Definition einzelner Stadien dazu führen, dass formal gleich bezeichnete Ereignisse biologisch nicht vollständig identisch sind.

Auch räumliche Unterschiede beeinflussen die Vergleichbarkeit phänologischer Daten. Standortbedingungen wie Höhenlage, Exposition, Mikroklima oder regionale Klimacharakteristika können erhebliche Auswirkungen auf den Zeitpunkt phänologischer Prozesse haben. Selbst bei identischen Arten und Beobachtungsdefinitionen lassen sich Daten verschiedener Regionen deshalb häufig nur eingeschränkt direkt vergleichen.

Neben biologischen und methodischen Faktoren spielt auch die Datenstruktur eine wichtige Rolle. Unterschiedliche Datensätze weisen häufig Unterschiede hinsichtlich Vollständigkeit, zeitlicher Abdeckung oder Datenformaten auf. Vor einer gemeinsamen Analyse ist deshalb in vielen Fällen eine Harmonisierung der Datengrundlage notwendig. Dazu gehören unter anderem die Vereinheitlichung von Variablennamen, die Standardisierung phänologischer Stadien sowie die Anpassung zeitlicher und räumlicher Referenzen.

Trotz dieser Herausforderungen bieten kombinierte Datensätze ein grosses Potenzial für die phänologische Forschung. Durch die Zusammenführung unterschiedlicher Datenquellen können räumliche Muster besser erkannt, regionale Unterschiede analysiert und langfristige Entwicklungen robuster eingeordnet werden. Zusätzlich ermöglicht der Vergleich unabhängiger Datensätze eine bessere Einschätzung der Plausibilität und Belastbarkeit einzelner Beobachtungen oder Zeitreihen. Stimmen Entwicklungen unterschiedlicher Datengrundlagen überein, kann dies die Aussagekraft der Ergebnisse stärken. Gleichzeitig können auffällige Abweichungen Hinweise auf methodische Unterschiede, Unsicherheiten oder potenzielle Fehlerquellen liefern. Voraussetzung dafür ist jedoch eine sorgfältige methodische Aufbereitung sowie eine differenzierte Interpretation der Ergebnisse.

3 Daten und Methodik

3.1 Datengrundlagen

Die Grundlage dieser Arbeit bilden phänologische Beobachtungsdaten des Schweizerischen Nationalparks sowie ergänzende Referenzdaten von MeteoSchweiz. Beide Datensätze wurden verwendet, um langfristige Entwicklungen phänologischer Prozesse zu untersuchen, die Struktur und Aussagekraft der vorhandenen Daten einzuordnen sowie ausgewählte Zeitreihen miteinander zu vergleichen.

Der Datensatz des Schweizerischen Nationalparks umfasst insgesamt 2'418 Beobachtungen und basiert auf langfristigen phänologischen Erhebungen in den Regionen Trupchun, Mingèr, Fuorn, Cluozza und Lü. Die Datenerhebung erfolgt seit 1994 fortlaufend im Rahmen des langfristigen Monitorings des Nationalparks. Die Region Lü wird seit 2017 zusätzlich berücksichtigt. Lü liegt dabei nicht innerhalb des Schweizerischen Nationalparks, befindet sich jedoch in dessen unmittelbarer Region und wird aufgrund der räumlichen und klimatischen Nähe ergänzend in die Datenerhebung integriert.

Erfasst werden verschiedene Pflanzenarten aus unterschiedlichen Pflanzengruppen. Dazu gehören Nadelbäume wie die Europäische Lärche (*Larix decidua*) oder die Arve (*Pinus cembra*), Laubbäume wie die Grünerle (*Alnus alnobetula*), Sträucher wie Heidelbeeren (*Vaccinium myrtillus*) sowie verschiedene krautige Pflanzenarten. Beobachtet werden mehrere klar definierte phänologische Stadien, darunter unter anderem Austriebsbeginn, Blattentfaltung, Blühbeginn, Vollblüte, Fruchtreife, Blattverfärbung oder Laubfall.

Die Beobachtungen basieren auf Feldaufnahmen während der Vegetationsperiode und werden durch Parkwächter beziehungsweise verantwortliche Beobachtungspersonen dokumentiert. Die Datensätze enthalten neben den eigentlichen phänologischen Beobachtungen zusätzliche Informationen zu Arten, Standorten, Regionen, Beobachtungsjahren und Beobachtungszeitpunkten. Zusätzlich sind verschiedene Metadaten enthalten, beispielsweise Angaben zu Beobachtungsintervallen, Bemerkungen oder Auffälligkeiten einzelner Beobachtungen. Die Daten lagen hauptsächlich im CSV-Format vor und wurden durch ergänzende Metadatentabellen erweitert.

Strukturell handelt es sich beim SNP-Datensatz um einen standortbasierten Beobachtungsdatensatz. Jede Zeile beschreibt dabei eine konkrete Beobachtung eines phänologischen Stadiums an einem bestimmten Standort in einem definierten Jahr. Ergänzend sind Informationen zur Pflanzenart, zur Region sowie zum Zeitpunkt des beobachteten Ereignisses enthalten. Durch diese Struktur lassen sich sowohl langfristige Zeitreihen einzelner Arten als auch Vergleiche zwischen Regionen und phänologischen Stadien durchführen.

Aufgrund des langfristigen Monitorings sowie der fortlaufenden Weiterentwicklung der Datenerhebung weist der Datensatz unterschiedliche Erhebungsphasen auf. Besonders relevant ist hierbei die methodische Umstellung im Jahr 2023. Während zuvor primär geschätzte Eintrittsdaten einzelner phänologischer Ereignisse dokumentiert wurden, werden seither zusätzlich konkrete Standortbesuche sowie Beobachtungsintervalle erfasst. Dadurch stehen neu zusätzliche Informationen zur zeitlichen Unsicherheit einzelner Beobachtungen zur Verfügung. Die methodischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Erhebungsphasen werden in den späteren Analysen entsprechend berücksichtigt.

Ergänzend zum Datensatz des Schweizerischen Nationalparks wurden phänologische Referenzdaten von MeteoSchweiz verwendet. Diese Daten stammen aus dem Schweizer Phänologienetzwerk und wurden über das öffentlich zugängliche Open-Data-Portal von MeteoSchweiz bezogen. [MeteoSchweiz, Open Government Data - Phenological Observations, <https://opendatadocs.meteoswiss.ch/a-data-groundbased/a9-phenological-observations?metadata=parameters>] Zusätzlich wurden Informationen zum Schweizer Phänologienetzwerk berücksichtigt, welches schweizweit standardisierte phänologische Beobachtungen erhebt. [MeteoSchweiz, Swiss Phenology Network, <https://www.meteoswiss.admin.ch/weather/measurement-systems/land-based-stations/swiss-phenology-network.html>]

Für die vorliegende Arbeit wurden insbesondere die Standorte Zuoz, St. Moritz, Pontresina, Scuol und Sent berücksichtigt. Verwendet wurden dabei nur Arten und phänologische Stadien, welche auch im Datensatz des Schweizerischen Nationalparks erfasst werden. Im Gegensatz zum SNP-Datensatz basiert der MeteoSchweiz-Datensatz auf einem schweizweit standardisierten Monitoringansatz mit einheitlich definierten Beobachtungsrichtlinien und strukturierten Metadaten. Die Daten enthalten ebenfalls Informationen zu Arten, phänologischen Stadien, Beobachtungszeitpunkten und Standorten, weisen jedoch insgesamt eine stärker standardisierte Struktur auf. Dadurch eignen sich die MeteoSchweiz-Daten besonders als Referenz- und Vergleichsdatensatz.

Die MeteoSchweiz-Daten wurden in dieser Arbeit insbesondere verwendet, um Beobachtungen des Schweizerischen Nationalparks hinsichtlich ihrer Plausibilität und grundsätzlichen wissenschaftlichen Nachvollziehbarkeit einzuordnen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die standardisierte Datenerhebung im Rahmen des Schweizer Phänologienetzwerks eine hohe Vergleichbarkeit und konsistente Beobachtungsqualität ermöglicht. Gleichzeitig musste berücksichtigt werden, dass Parkwächter im Nationalpark neben der phänologischen Datenerhebung zahlreiche weitere Aufgaben und Projekte betreuen. Eine tägliche Kontrolle sämtlicher Standorte ist deshalb nicht jederzeit möglich. Die Referenzdaten von MeteoSchweiz stellen in diesem Zusammenhang eine wichtige Grundlage dar, um zeitliche Entwicklungen und beobachtete Ereignisse besser relativieren und vergleichen zu können.

Für Vergleiche zwischen den Datensätzen wurden bevorzugt Standorte mit möglichst ähnlichen Standort- und Klimabedingungen berücksichtigt. Ziel war es, Unterschiede, die primär auf abweichende Umweltbedingungen zurückzuführen sind, möglichst zu reduzieren und die Vergleichbarkeit der Beobachtungen zu verbessern. Die räumliche Verteilung der verwendeten Standorte sowie die strukturellen Eigenschaften der Datensätze werden in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

Im Rahmen der weiteren Analyse wurden nicht sämtliche vorhandenen Zeitreihen gleichermaßen berücksichtigt. Der Fokus lag vielmehr auf ausgewählten Zeitreihen, die aufgrund ihrer zeitlichen Abdeckung, Vollständigkeit oder anderer charakteristischer Eigenschaften für weiterführende Analysen besonders geeignet erschienen. Die konkrete Datenaufbereitung und Harmonisierung der verschiedenen Datenquellen wird in Abschnitt 3.2 beschrieben, während Abschnitt 3.3 vertieft auf die Struktur und Eigenschaften des Datensatzes des Schweizerischen Nationalparks eingeht.

3.2 Datenaufbereitung und Harmonisierung

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Datensätze des Schweizerischen Nationalparks und von MeteoSchweiz unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Struktur, ihrer Metadaten sowie teilweise auch hinsichtlich der verwendeten Bezeichnungen für Arten, Regionen und phänologische Stadien. Um eine gemeinsame Analyse zu ermöglichen, wurden die Daten zunächst vereinheitlicht und anschliessend in ein gemeinsames Datenschema überführt.

Ein wesentlicher Bestandteil der Datenaufbereitung bestand in der Standardisierung der Datentypen und Datenformate. Hierzu wurden unter anderem Datumsangaben vereinheitlicht, Beobachtungsjahre abgeleitet, Koordinaten auf ein einheitliches Referenzsystem übertragen sowie verschiedene Variablennamen standardisiert. Zusätzlich wurden Stationsnamen bereinigt und strukturierte Metadaten ergänzt. Die Verarbeitung erfolgte weitgehend automatisiert mithilfe von Skripten in R.

Die Harmonisierung der phänologischen Stadien basierte auf der international etablierten BBCH-Skala, welche eine standardisierte Beschreibung pflanzlicher Entwicklungsstadien ermöglicht. Da sowohl die Daten des Schweizerischen Nationalparks als auch jene von MeteoSchweiz entsprechende BBCH-Codes enthalten beziehungsweise daraus ableitbar sind, konnten die verschiedenen Beobachtungen auf eine gemeinsame phänologische Systematik abgebildet werden. Die Zuordnung erfolgte deterministisch anhand vordefinierter Regeln und erforderte keine manuelle Nachbearbeitung. Auf dieser Grundlage wurden die Beobachtungen zusätzlich standardisierten englischsprachigen Phasenbezeichnungen zugeordnet, um eine einheitliche Analyse der verschiedenen Datenquellen zu ermöglichen.

Auch die Harmonisierung der Pflanzenarten erfolgte überwiegend automatisiert. Hierfür wurde ein in beiden Datensätzen verwendeter vierstelliger Artencode genutzt, welcher eine

eindeutige Zuordnung der Arten unabhängig von unterschiedlichen Schreibweisen oder Bezeichnungen erlaubte. Auf diese Weise konnten die meisten Arten direkt zwischen den Datensätzen abgeglichen werden. Lediglich für einzelne Arten, die ausschliesslich im Datensatz des Schweizerischen Nationalparks vorkommen und keine direkte Entsprechung in den MeteoSchweiz-Daten besitzen, wurden manuell überprüfte Klartextbezeichnungen ergänzt. Die zugrunde liegenden Zuordnungen basierten auf etablierter botanischer Nomenklatur und wurden dokumentiert, um die Nachvollziehbarkeit der Harmonisierung sicherzustellen.

Neben der Vereinheitlichung von Arten und Stadien wurden auch regionale Bezeichnungen harmonisiert. Die im Datensatz des Schweizerischen Nationalparks verwendeten Regionskürzel wurden auf Grundlage der zugehörigen Metadaten in konsistente Regionsbezeichnungen überführt. Dadurch konnte eine einheitliche Darstellung der verschiedenen Untersuchungsgebiete gewährleistet werden.

Insgesamt konnte die Datenaufbereitung zu rund 95 % automatisiert durchgeführt werden. Die wenigen erforderlichen manuellen Eingriffe beschränkten sich auf klar dokumentierte Sonderfälle und dienten ausschliesslich der Vereinheitlichung von Bezeichnungen oder der Auswahl geeigneter Referenzstandorte. Durch die konsequente Harmonisierung entstand eine einheitliche Datengrundlage, welche die Voraussetzung für die anschliessende Untersuchung der Datenstruktur, die explorative Analyse sowie die statistischen Auswertungen bildet.

3.3 Struktur und Eigenschaften des SNP-Datensatzes

Insgesamt umfasst der Datensatz 2'418 Beobachtungen, wovon für 2'331 Beobachtungen ein gültiges Eintrittsdatum des jeweiligen phänologischen Ereignisses vorliegt. Die Erhebungen decken den Zeitraum von 1994 bis 2025 ab und enthalten Beobachtungen für jedes einzelne Jahr dieses Zeitraums. Vollständige Jahreslücken liegen somit nicht vor.

Die Beobachtungen stammen aus fünf Regionen: Cluozza, Fuorn, Lü, Mingèr und Trupchun. Insgesamt umfasst der Datensatz 67 Standorte, welche über das Untersuchungsgebiet verteilt sind. Die räumliche Verteilung der Standorte ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Regionen Mingèr und Trupchun weisen mit jeweils 15 Standorten die höchste Standortdichte auf, gefolgt von Lü mit 14 sowie Fuorn mit 13 Standorten. In Cluozza befinden sich insgesamt 10 Standorte. Die räumliche Verteilung der Beobachtungsflächen spiegelt die historische Entwicklung des Monitorings sowie die unterschiedlichen ökologischen Gegebenheiten der einzelnen Regionen wider. Lü nimmt dabei eine besondere Stellung ein. Obwohl sich diese Region ausserhalb der eigentlichen Nationalparkgrenzen befindet, liegt sie innerhalb derselben Landschaftsregion und wird seit 2017 ergänzend in die phänologischen Erhebungen einbezogen.



Abbildung 1: Räumliche Verteilung der Standorte.

Die erfassten Pflanzenarten lassen sich vier funktionalen Gruppen zuordnen. Dazu gehören Nadelbäume wie Lärche (*Larix decidua*) und Fichte (*Picea abies*), Laubbäume wie Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*), Espe (*Populus tremula*) und Birke (*Betula pendula*), verschiedene Sträucher und Zwergsträucher wie Alpenrose (*Rhododendron ferrugineum*), Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) oder Preiselbeere (*Vaccinium vitis-idaea*) sowie krautige Pflanzen und Gräser wie Löwenzahn (*Taraxacum officinale*), Stengelloser Enzian (*Gentiana acaulis*) oder Edelweiss (*Leontopodium alpinum*).

Neben den Arten werden im Datensatz sieben phänologische Stadien erfasst. Diese decken den Vegetationszyklus vom Frühjahr bis in den Herbst ab und umfassen den Beginn der Blühtentfaltung, die Blühtentfaltung, den Blühbeginn, die Vollblüte, die Fruchtreife, die Blattverfärbung sowie den Blattfall. Nicht alle Stadien werden jedoch für alle Arten erhoben. Während beispielsweise bei Arten wie Vogelbeere oder Rotem Holunder bis zu sieben Stadien dokumentiert werden, werden bei anderen Arten lediglich einzelne, biologisch relevante Stadien erfasst. Diese Unterschiede ergeben sich aus den artspezifischen Eigenschaften der jeweiligen Pflanzen und stellen eine typische Eigenschaft phänologischer Datensätze dar.

Zeitlich betrachtet weist der Datensatz eine kontinuierliche Entwicklung über den gesamten Beobachtungszeitraum auf. Die Anzahl der Beobachtungen variiert zwischen den einzelnen

Jahren, wobei sowohl Unterschiede in der Erhebungsintensität als auch Veränderungen im Monitoringprogramm eine Rolle spielen.

Eine einzelne Beobachtung dokumentiert den Eintritt eines bestimmten phänologischen Stadiums einer definierten Pflanzenart an einem bestimmten Standort innerhalb eines konkreten Jahres. Charakterisiert wird die Beobachtung durch das zugehörige Eintrittsdatum sowie den entsprechenden Tag des Jahres. Zusätzlich enthält jede Beobachtung eindeutige Referenzen zu Standort, Art und Stadium. Die Daten liegen dabei im sogenannten Long-Format vor, wobei jede Zeile eine einzelne Beobachtung repräsentiert.

Phänologische Zeitreihen entstehen erst durch die Zusammenführung mehrerer Beobachtungen derselben Art, desselben Stadiums und desselben Standorts über mehrere Jahre hinweg. Der Datensatz enthält somit keine vorgefertigten Zeitreihen, sondern die zugrunde liegenden Einzelereignisse. Zeitreihen werden im Rahmen der Analyse durch die gezielte Auswahl entsprechender Standort-Art-Stadium-Kombinationen gebildet. Dadurch können sowohl langfristige Entwicklungen einzelner Pflanzenarten als auch regionale Unterschiede untersucht werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Datensatzes ist seine heterogene Struktur. Nicht alle Arten kommen in allen Regionen vor und nicht alle Stadien werden für jede Art erfasst. Einige Arten, wie beispielsweise Vogelbeere oder Lärche, sind in mehreren Regionen vertreten, während andere Arten ausschliesslich in einzelnen Regionen beobachtet werden. Ebenso unterscheidet sich die Anzahl der erfassten Stadien zwischen den Arten deutlich. Diese strukturellen Unterschiede beeinflussen die Anzahl und Länge möglicher Zeitreihen und müssen bei der späteren Analyse berücksichtigt werden.

Zusätzlich weist der Datensatz verschiedene Entwicklungsphasen des Monitorings auf. Besonders relevant ist die Umstellung der Datenerhebung im Jahr 2023. Seit diesem Zeitpunkt erfolgt die Erfassung nach einer stärker standardisierten Struktur mit einer konstanten Anzahl aktiver Standorte, Arten und Stadien. Gleichzeitig wurden zusätzliche Informationen zu Beobachtungsintervallen und Unsicherheiten eingeführt. Diese Veränderungen erhöhen die Aussagekraft neuerer Beobachtungen, führen jedoch auch dazu, dass unterschiedliche Erhebungsphasen innerhalb des Datensatzes berücksichtigt werden müssen. Die Auswirkungen dieser Eigenschaften auf die Datenqualität und die Interpretierbarkeit der Beobachtungen werden in den folgenden Kapiteln näher untersucht.

3.4 Entwicklung der Shiny-App

Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelte Shiny-App dient als interaktive Analyseplattform für die phänologischen Daten des Schweizerischen Nationalparks (SNP) und ermöglicht den systematischen Vergleich mit den Open-Data-Beständen der MeteoSchweiz. Die App wurde nicht als isoliertes Forschungsziel konzipiert, sondern als methodisches Werkzeug für die Datenexploration, Qualitätsbewertung und vergleichende Analyse.

Gleichzeitig wurde sie so gestaltet, dass eine Nachnutzung durch das Personal des Nationalparks über den Rahmen dieser Arbeit hinaus möglich ist.

3.4.1 Vorgehen

Die Entwicklung erfolgte in einem iterativen Prozess, der sich an den jeweils neu auftretenden methodischen Fragestellungen orientierte. Statt einer linearen Implementierung eines vorab fixierten Pflichtenhefts wuchs die App in mehreren Phasen, in denen jeweils ein konkreter analytischer Bedarf in eine funktionale Erweiterung übersetzt wurde. Die folgende chronologische Übersicht skizziert diesen Werdegang.

In einer ersten Phase wurden die Projektziele und Anforderungen definiert. Im Zentrum standen die Fragen, welche Auswertungen mit den phänologischen Daten des SNP überhaupt sinnvoll möglich sind und welche Zielgruppen die Plattform bedienen soll. Die Entscheidung für eine Shiny-Anwendung in R fiel aufgrund der niedrigen Einstiegshürde für die nicht-programmierende Anwendung sowie der nahtlosen Integration mit der vorhandenen R-basierten Datenverarbeitung.

Die zweite Phase umfasste den Aufbau einer ersten Explorations-App mit grundlegenden Funktionalitäten: Import einer SNP-CSV-Datei, einfache Filterung nach Art, Stadium und Region, sowie eine Datentabelle mit grundlegenden Visualisierungen. Diese erste Version diente vor allem dazu, den Datensatz strukturell zu verstehen und erste Datenqualitätsfragen sichtbar zu machen. Es zeigte sich rasch, dass eine reine Darstellung der Daten den analytischen Anforderungen nicht genügte, es entstand der Bedarf nach automatischer Harmonisierung, strukturierter Fehleranalyse und Vergleichsmöglichkeiten.

In der dritten Phase wurden die SNP-Metadaten integriert. Statt kryptischer Parameterbezeichnungen wie `mlard13d` (interner Code des SNP-Datensystems für Lärche, Stadium 13) erschienen nun lesbare Klartextnamen wie "Lärche – Blattentfaltung". Diese Verknüpfung zwischen Daten und Metadaten bildete die Voraussetzung für die spätere Harmonisierung mit MeteoSchweiz.

Die vierte Phase brachte die wesentliche methodische Erweiterung: die Harmonisierung mit dem Phänologie-Datensatz der MeteoSchweiz. Hierfür wurde ein gemeinsames Schema entwickelt, in das beide Datenquellen verlustfrei überführt werden können. Die phänologischen Stadien beider Quellen wurden über die internationale BBCH-Skala miteinander verknüpft; die Artnamen über einen vierstelligen Artencode, der in beiden Datensätzen identisch verwendet wird. Mit dieser Harmonisierung wurde aus der reinen SNP-Explorations-App eine echte Vergleichsplattform.

In der fünften Phase wurde der Funktionsumfang um explorative Analysewerkzeuge erweitert: interaktive Zeitreihen-Plots, Vergleichsdarstellungen mit Differenzkennzahlen sowie

Heatmaps zur Visualisierung der Datenvollständigkeit. Die App entwickelte sich damit von einem reinen Visualisierungswerkzeug zu einem Analyseinstrument.

In der sechsten Phase wurde die räumliche Dimension hinzugefügt. Eine interaktive Karte zeigt nun alle Standorte beider Datenquellen mit klickbaren Detailinformationen. Diese räumliche Komponente erlaubt die Verortung der Beobachtungen im topografischen Kontext und macht regionale Strukturen sichtbar.

Die siebte Phase widmete sich der phänologischen Höhengradienten, einer in der alpinen Phänologie etablierten Standardmetrik. Da die SNP-Originaldaten keine Höhenangaben enthalten, wurden diese über die swisstopo-Höhen-API aus den vorhandenen LV95-Koordinaten ergänzt. In einem eigenen Analyse-Tab kann die Verschiebung phänologischer Stadien pro 100 Höhenmeter quantifiziert werden.

In der achten Phase kamen verteilungsanalytische Werkzeuge hinzu: Boxplot-Darstellungen pro SNP-Region für eine einzelne Phase, sowie ein "Saisonprofil"-Tab, der für eine ausgewählte Art alle phänologischen Stadien nebeneinander darstellt und dabei SNP- und MeteoSchweiz-Beobachtungen direkt vergleicht.

Die abschliessende Phase befasste sich mit der systematischen Analyse der Datenvollständigkeit. Hierbei wird visuell sichtbar gemacht, welche Standort-Art-Stadium-Kombinationen über welche Jahre hinweg vollständig dokumentiert sind, welche Lücken aufweisen und welche möglicherweise für quantitative Trendanalysen nicht ausreichend dicht sind.

Diese phasenweise Entwicklung wurde durch einen sehr engen Rückkopplungsprozess zwischen Implementierung und methodischer Reflexion getragen. Jede Erweiterung der App ging mit einer Vertiefung des Datenverständnisses einher, und umgekehrt warf jede inhaltliche Erkenntnis neue Anforderungen an die Funktionalität auf.

3.4.2 Funktionalitäten der Shiny-App

Die fertige Anwendung gliedert sich in acht thematische Tabs, die zusammen den vollständigen Workflow von der Datenintegration bis zur Spezialanalyse abdecken.

Übersicht. Der Einstiegspunkt der App. Hier wird die SNP-CSV-Datei hochgeladen, wobei der Loader die Daten automatisch ins gemeinsame Schema überführt und Höhenangaben aus der vorbereiteten Stammdatentabelle ergänzt. Eine Datentabelle mit globalen Filtern erlaubt die direkte Inspektion einzelner Beobachtungen; vier Kennzahlenboxen zeigen die wichtigsten Eckdaten des aktuellen Datenbestands.

Karte. Eine interaktive Karte (basierend auf Leaflet) visualisiert die räumliche Verteilung aller Standorte. SNP-Sites erscheinen in den Farben der jeweiligen Region (Fuorn bis Lü

in einer Orange-Abstufung), MeteoSchweiz-Stationen in Blautönen. Marker-Grösse entspricht der Beobachtungsdichte; ein Klick öffnet ein Popup mit Detailinformationen zur Station.

Trends. Zeitreihen-Analyse für eine Art $\times$ Phase $\times$ Stationsauswahl. Pro Station werden Datum, lineare Regressionsgerade und Trendstatistik (Steigung in Tagen pro Jahrzehnt, Bestimmtheitsmass, p-Wert) berechnet und visualisiert. SNP-Regionen und MeteoSchweiz-Standardstationen können einzeln zu- und abgeschaltet werden; ein Suchfeld erlaubt die Auswahl weiterer Stationen.

Vergleich SNP $\leftrightarrow$ MeteoSchweiz. Direktvergleich des mittleren Eintrittsdatums pro Jahr zwischen beiden Quellen, ergänzt um eine Differenz-Visualisierung (positive Werte = SNP später; negative = SNP früher). Diese Darstellung erlaubt eine schnelle Plausibilitätsprüfung: Verhalten sich die SNP-Beobachtungen analog zu den deutlich umfangreicheren MeteoSchweiz-Reihen?

Höhenprofil. Streudiagramm der mittleren Eintrittsdaten gegenüber der Standorthöhe, getrennt nach Datenquelle. Pro Quelle wird der phänologische Höhengradient berechnet (Tage Verschiebung pro 100 Höhenmeter), eine klassische Kennzahl in der alpinen Phänologie-Forschung. Eine begleitende Stationstabelle, sortiert nach Höhe, ergänzt die Visualisierung.

SNP-Boxplots. Verteilungsanalyse pro SNP-Region für eine ausgewählte Art und Phase. Fünf Boxplots zeigen die Streuung der Eintrittsdaten, wahlweise mit eingeblendeten Einzelbeobachtungen und Mittelwertmarkierung. Eine Statistik-Tabelle gibt pro Region Quartile, Spannweite und Standardabweichung in lesbarer Datumsform aus.

Saisonprofil. Eine Übersichtsdarstellung des gesamten Jahresverlaufs einer Pflanzenart: alle phänologischen Stadien werden nebeneinander in jahreszeitlicher Reihenfolge angeordnet, mit je einem Boxplot pro Datenquelle. Auf einen Blick wird sichtbar, ob systematische Verschiebungen zwischen SNP und MeteoSchweiz konsistent über die gesamte Saison auftreten oder nur einzelne Phasen betreffen.

Datenlücken. Visualisierung der Datenvollständigkeit über eine Heatmap, in der pro Station $\times$ Jahr die Verfügbarkeit farblich kodiert ist. Alle fünf SNP-Regionen werden grundsätzlich angezeigt, auch wenn sie für die aktuelle Auswahl keine Daten enthalten – das macht die strukturelle Verfügbarkeit auch dort sichtbar, wo sie fehlt. Ergänzend zeigt ein Balkendiagramm die Anzahl aktiver Stationen pro Jahr und eine Detailtabelle den Vollständigkeitsgrad jeder einzelnen Zeitreihe.

Querschnittliche Eigenschaften. Über alle Analyse-Tabs hinweg ist das Bedienkonzept konsistent: Jeder Tab verfügt über einen Jahres-Schieberegler zur zeitlichen Eingrenzung, dieselben Auswahlbuttons für SNP-Regionen und MeteoSchweiz-Standardstationen sowie ein

Suchfeld für weitere Stationen. Phänologische Eintrittsdaten werden konsequent als Datum (z.B. "1. Mai") statt als Day-of-Year ausgegeben, um die Lesbarkeit zu erleichtern. Sämtliche Diagramme sind interaktiv: per Mauszeiger lassen sich Detailwerte einzelner Beobachtungen abrufen, Plots können gezoomt und als PNG exportiert werden.

Technische Architektur. Die App folgt der klassischen dreigliedrigen Shiny-Struktur (global.R, ui.R, server.R) und nutzt das bslib-Framework für ein modernes, responsives Layout. Die MeteoSchweiz-Daten werden über einen vorgebauten Snapshot bereitgestellt (Pre-Build über das mitgelieferte Skript build_snapshot.R), um auch im Offline-Betrieb eine schnelle Verfügbarkeit zu gewährleisten. Die SNP-Daten werden hingegen zur Laufzeit über ein Upload-Feld eingelesen, was eine Online-Bereitstellung der App ermöglicht, ohne dass die Originaldaten dauerhaft auf einem Server liegen müssen.

3.5 Explorative Datenanalyse / Methodik der Fehleranalyse

Die explorative Datenanalyse bildete einen zentralen Bestandteil der vorliegenden Arbeit und diente dazu, die Struktur, Vollständigkeit und Plausibilität des Datensatzes systematisch zu untersuchen. Ziel war es, ein vertieftes Verständnis der vorhandenen Daten zu erlangen, potenzielle Auffälligkeiten frühzeitig zu identifizieren und eine fundierte Grundlage für die anschliessende statistische Modellierung zu schaffen. Gleichzeitig sollte beurteilt werden, welche Zeitreihen aufgrund ihrer Struktur und Datenqualität für weiterführende Analysen geeignet sind.

Im Rahmen der explorativen Analyse wurden verschiedene Eigenschaften des Datensatzes untersucht. Dazu gehörten die zeitliche Verteilung der Beobachtungen über den gesamten Erfassungszeitraum, die räumliche Verteilung der Standorte und Beobachtungen, die Verteilung der Arten und phänologischen Stadien sowie die Vollständigkeit einzelner Standort-Art-Stadium-Kombinationen. Ergänzend wurden Verteilungen der phänologischen Eintrittsdaten analysiert, um ein besseres Verständnis der Datenstruktur und möglicher Besonderheiten zu erhalten. Die Untersuchungen erfolgten mithilfe unterschiedlicher Visualisierungsmethoden wie Tabellen, Histogrammen, Dichteverteilungen, Boxplots, Heatmaps, Karten und Zeitreihendarstellungen. Ein grosser Teil dieser Analysen wurde über die im Rahmen der Arbeit entwickelte Shiny-App durchgeführt, wodurch verschiedene Fragestellungen interaktiv untersucht werden konnten.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Beurteilung der Datenvollständigkeit. Da langfristige Zeitreihen nur dann sinnvoll statistisch analysiert werden können, wenn eine ausreichende Anzahl von Beobachtungen vorliegt, wurde untersucht, wie vollständig einzelne Standort-Art-Stadium-Kombinationen über den Beobachtungszeitraum dokumentiert sind. Dabei wurde bewusst keine starre Mindestanzahl an Beobachtungen oder Jahren definiert. Stattdessen erfolgte die Auswahl geeigneter Zeitreihen anhand ihrer Vollständigkeit, ihrer zeitli-

chen Abdeckung sowie ihrer grundsätzlichen Eignung für weiterführende Analysen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienten als Grundlage für die spätere Auswahl der Zeitreihen, welche in die statistische Modellierung einbezogen wurden.

Parallel zur explorativen Analyse wurde eine systematische Fehleranalyse durchgeführt. Dabei standen sowohl klassische Datenqualitätsaspekte als auch potenzielle Unsicherheiten der Datenerhebung im Fokus. Untersucht wurden insbesondere fehlende Werte, Datenlücken, ungewöhnliche Beobachtungen, Unterschiede zwischen Regionen, Unterschiede in der Beobachtungsintensität sowie mögliche Auswirkungen der methodischen Umstellung der Datenerhebung im Jahr 2023. Ziel dieser Analysen war nicht die nachträgliche Bereinigung des Datensatzes, sondern vielmehr die Identifikation von Eigenschaften und Besonderheiten, welche die Interpretation der Ergebnisse beeinflussen könnten.

Auffällige Beobachtungen wurden dabei nicht automatisch als Fehler interpretiert. Stattdessen erfolgte eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Sachverhalte. Potenzielle Ausreisser oder ungewöhnliche Muster wurden zunächst identifiziert und anschliessend hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. Ergänzend wurden ausgewählte Auffälligkeiten mit dem Leiter Nationalparkwächter des Schweizerischen Nationalparks besprochen. Aufgrund seiner langjährigen Erfahrung in der Datenerhebung und seiner detaillierten Kenntnisse der regionalen Gegebenheiten konnten verschiedene Beobachtungen fachlich eingeordnet und mögliche Fehlinterpretationen vermieden werden. Dieser Austausch erwies sich insbesondere bei historischen Entwicklungen und bei der Beurteilung auffälliger Datenmuster als wertvolle Ergänzung zur rein datenbasierten Analyse.

Zur zusätzlichen Einordnung der Beobachtungen wurden die Daten des Schweizerischen Nationalparks mit den Referenzdaten von MeteoSchweiz verglichen. Die MeteoSchweiz-Daten dienten dabei nicht als Bestandteil der eigentlichen Trendanalyse, sondern primär als externe Referenz zur Plausibilisierung und Validierung der SNP-Beobachtungen. Hierfür wurden insbesondere Unterschiede der phänologischen Eintrittsdaten vergleichbarer Arten und Stadien untersucht. Bewusst wurde auf die Definition fester Schwellenwerte für akzeptable oder auffällige Abweichungen verzichtet, da phänologische Prozesse von zahlreichen lokalen Einflussfaktoren geprägt werden und Unterschiede zwischen Standorten nicht zwangsläufig auf Fehler in der Datenerhebung zurückzuführen sind.

Die explorative Analyse und die Fehleranalyse bildeten gemeinsam die Grundlage für die nachfolgende statistische Modellierung. Während die explorative Analyse dazu diente, die Struktur und Eigenschaften des Datensatzes zu verstehen, erlaubte die Fehleranalyse eine Einordnung möglicher Unsicherheiten und Einschränkungen der Datenbasis. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienten anschliessend der Auswahl geeigneter Zeitreihen sowie der Vorbereitung der statistischen Trendanalysen. Die Ergebnisse der explorativen Analyse werden in Abschnitt 4.1 dargestellt, während die Erkenntnisse der Fehleranalyse in Abschnitt 4.2 behandelt werden. Die auf dieser Grundlage durchgeführten statistischen Untersuchungen werden anschliessend in Abschnitt 4.3 präsentiert.

3.6 Statistische Modellierung und Trendanalyse

Die statistische Untersuchung der phänologischen Trends im Datensatz des Schweizerischen Nationalparks erfolgte iterativ. Ausgehend von einer einfachen linearen Modellierung wurden in Abstimmung mit der wissenschaftlichen Betreuung schrittweise komplexere Modellklassen geprüft, um die zeitliche Entwicklung der phänologischen Ereignisse möglichst adäquat abzubilden. Dabei wurden zunächst lineare Regressionsmodelle eingesetzt, anschliessend generalisierte additive Modelle (GAM) sowie gemischte additive Modelle (GAMM) untersucht. Die finale Methodenwahl basierte auf einer Kombination aus statistischer Modellgüte, fachlicher Plausibilität und den in der phänologischen Forschung etablierten Verfahren. Schlussendlich wurde eine Methodenkombination aus Mann-Kendall-Test, Sen's Slope und einer ergänzenden GAM-Glättung gewählt. Diese Vorgehensweise vereint eine robuste Trendquantifizierung mit einer flexiblen grafischen Darstellung möglicher nichtlinearer Entwicklungen.

Den Ausgangspunkt der statistischen Analysen bildete die lineare Regression. Für ausgewählte Zeitreihen wurde der Zusammenhang zwischen Beobachtungsjahr und Eintrittsdatum des jeweiligen phänologischen Ereignisses mittels einfacher linearer Modelle untersucht. Die lineare Regression liefert dabei eine Schätzung der durchschnittlichen Veränderung in Tagen pro Jahr beziehungsweise pro Dekade sowie Informationen zur statistischen Signifikanz und zur erklärten Varianz. Die lineare Regression unterstellt jedoch einen konstanten Trend über den gesamten Beobachtungszeitraum und reagiert empfindlich auf einzelne Extremjahre. Da in langfristigen phänologischen Zeitreihen sowohl beschleunigte Entwicklungen als auch zeitweise Stagnationen auftreten können, erschien diese Annahme für eine vertiefte Analyse nur bedingt geeignet.

In einem nächsten Schritt wurden deshalb generalisierte additive Modelle (GAM) eingesetzt. Die Modelle wurden mit dem Paket mgcv (Wood, 2017) implementiert und basierten auf einer Glättungsfunktion der Form $s(\text{year}, \text{bs} = "cr", k = 5)$. Durch die Verwendung sogenannter Cubic Regression Splines kann der zeitliche Verlauf flexibel modelliert werden, ohne dass im Voraus eine bestimmte funktionale Form festgelegt werden muss. Die optimale Glättungsstärke wird dabei automatisch bestimmt. Gegenüber der linearen Regression bieten GAMs den Vorteil, dass mögliche Beschleunigungs- oder Plateauphasen sichtbar gemacht werden können. Anstelle einer einzelnen Steigungsschätzung entsteht eine kontinuierliche Trendkurve mit zugehörigem Konfidenzband, wodurch komplexere Entwicklungen im Zeitverlauf besser dargestellt werden können.

Das einfache GAM behandelt jedoch sämtliche Beobachtungen als unabhängig voneinander. Da der SNP-Datensatz Beobachtungen aus verschiedenen Standorten innerhalb mehrerer Regionen enthält, wurde geprüft, ob die Berücksichtigung dieser hierarchischen Datenstruktur zu einer verbesserten Modellierung führt. Hierfür wurden generalisierte additive Mischmodelle (GAMM) eingesetzt. Die Modelle erweitern das GAM um zufällige Effekte,

welche standortspezifische Niveauunterschiede berücksichtigen können, ohne den eigentlichen Zeiteffekt zu verzerren. Die Wahl dieser Modellstruktur orientierte sich unter anderem an den Empfehlungen von Yann Vitasse (WSL), wonach Regionen oder Standorte bei übergeordneten Trendanalysen grundsätzlich als zufällige Effekte berücksichtigt werden können, sofern ein allgemeiner Trend über mehrere Regionen hinweg untersucht werden soll.

Eine vergleichende Analyse der Modellresultate und Residuen zeigte jedoch, dass die Berücksichtigung zusätzlicher Random Effects keine substanzielle Verbesserung der Modellgüte bewirkte. Die Varianz der zufälligen Effekte war gering, die Standardfehler der Trend-schätzungen veränderten sich nur unwesentlich, und die resultierenden Glättungsfunktionen unterschieden sich kaum von jenen der einfacheren GAM-Modelle. In Rücksprache mit der wissenschaftlichen Betreuung wurde deshalb entschieden, auf die Verwendung von GAMM zu verzichten und das einfachere GAM beizubehalten. Diese Entscheidung folgt dem Prinzip der sparsamen Modellierung, wonach komplexere Modelle nur dann eingesetzt werden sollten, wenn sie einen klaren zusätzlichen Erkenntnisgewinn liefern.

Parallel zu diesen modellbasierten Ansätzen wurde die Diskussion mit der phänologischen Forschungsgemeinschaft weitergeführt. Dabei wurde insbesondere die Verwendung nicht-parametrischer Trendverfahren empfohlen, wie sie in der Klimatologie und Phänologieforschung weit verbreitet sind. Yann Vitasse weist in diesem Zusammenhang auf die Vorteile des Mann-Kendall-Tests sowie der Sen's-Slope-Schätzung hin, da diese Verfahren robust gegenüber Extremjahren sind und keine Verteilungsannahmen erfordern. Gleichzeitig ermöglichen sie eine direkte Vergleichbarkeit mit zahlreichen publizierten Trendstudien.

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde schliesslich eine Methodenkombination aus Mann-Kendall-Test, Sen's Slope und GAM als finale Analysegrundlage gewählt. Der Mann-Kendall-Test diente der formalen Prüfung, ob innerhalb einer Zeitreihe ein statistisch signifikanter monotoner Trend vorliegt. Das Verfahren basiert auf Ranginformationen und ist deshalb weitgehend unabhängig von Ausreissern oder Verteilungsannahmen. Ergänzend wurde mit Sen's Slope die Stärke des Trends bestimmt. Dabei wird der Median aller paarweisen Steigungen zwischen den Beobachtungen berechnet, wodurch eine robuste Schätzung der durchschnittlichen Veränderung in Tagen pro Jahr beziehungsweise pro Dekade entsteht. Während Mann-Kendall die statistische Signifikanz bewertet, liefert Sen's Slope somit eine direkte Quantifizierung der Trendstärke. Die GAM-Modelle wurden schliesslich verwendet, um den zeitlichen Verlauf der Entwicklung grafisch darzustellen und potenzielle nichtlineare Muster sichtbar zu machen.

Für die Auswahl der zu analysierenden Zeitreihen wurde eine Mindestlänge von 20 Jahren verwendet. Dieses Kriterium orientiert sich an einer Empfehlung von Yann Vitasse, wonach Zeitreihen mit einer Länge von mindestens zwanzig Jahren als geeignet für phänologische Trendanalysen betrachtet werden können. Darüber hinaus wurde auf eine möglichst hohe Vollständigkeit der Zeitreihen geachtet. Bei der Auswahl wurde zudem berücksichtigt, dass

Frühjahrsphasen wie Austrieb oder Blühbeginn in der Regel konsistenter und beobachter-unabhängiger erfasst werden als Herbstphasen wie Blattverfärbung oder Blattfall, welche stärker von subjektiven Einschätzungen beeinflusst werden können. Die ursprüngliche Planung der Trendanalyse sah vor, dass für jede der vier im Datensatz vertretenen funktionalen Pflanzengruppen, Nadelbäume, Laubbäume, Sträucher und Kräuter, mindestens eine repräsentative Art identifiziert und über alle fünf Untersuchungsregionen hinweg vergleichend analysiert werden sollte. Eine solche Strukturierung hätte sowohl einen direkten Vergleich der phänologischen Reaktionsmuster zwischen den funktionalen Gruppen als auch eine systematische Beurteilung möglicher regionaler Unterschiede ermöglicht. Im Verlauf der explorativen Datenanalyse zeigte sich jedoch, dass die vorliegende Datenlage diese Strukturierung nicht trägt. Für die meisten potenziell vergleichbaren Art-Stadium-Kombinationen lagen entweder zu wenige Beobachtungen, zu kurze Zeitreihen oder zu starke regionale Datenlücken vor, sodass weder eine konsistente Auswahl pro funktionaler Gruppe noch ein durchgängiger regionsübergreifender Vergleich realisierbar war. Die Trendanalyse wurde deshalb auf die zwölf belastbarsten Zeitreihen reduziert, die sich faktisch auf die Regionen Fuorn und Trupchun konzentrieren. Der ursprünglich geplante systematische Vergleich zwischen funktionalen Pflanzengruppen über alle Regionen hinweg konnte damit nicht umgesetzt werden. Stattdessen stützt sich die Trendanalyse auf einzelne, gut dokumentierte Standort-Art-Stadium-Kombinationen, deren Aussagekraft im Detail in Kapitel 4.3 diskutiert wird.

Die finale Methodenwahl reflektiert gleichzeitig unterschiedliche Perspektiven auf die Analyse phänologischer Daten. Aus statistischer Sicht erscheinen komplexe gemischte Modelle attraktiv, da sie die hierarchische Struktur der Daten explizit berücksichtigen. Aus biologischer und phänologischer Sicht stehen hingegen Robustheit gegenüber Extremereignissen, Nachvollziehbarkeit der Resultate und Vergleichbarkeit mit bestehenden Studien im Vordergrund. Die gewählte Methodenkombination verbindet beide Ansätze. Mann-Kendall und Sen's Slope liefern die formale und in der Forschungsgemeinschaft etablierte Trendaussage, während GAM eine flexible und leicht interpretierbare Visualisierung der zeitlichen Entwicklung ermöglicht.

Bewusst verzichtet wurde auf eine prognostische Modellierung zukünftiger phänologischer Ereignisse. Die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren basieren ausschliesslich auf dem Zusammenhang zwischen Beobachtungsjahr und Eintrittsdatum und erlauben deshalb lediglich die Quantifizierung vergangener Entwicklungen. Für belastbare Vorhersagen wären hingegen kausale Einflussgrößen wie Temperatur, Photoperiode oder winterliche Chilling-Bedingungen erforderlich. In der phänologischen Forschung werden hierfür unter anderem Growing-Degree-Day-Modelle (GDD) oder erweiterte Modelle wie das M1-Modell eingesetzt. Obwohl solche Ansätze grundsätzlich geeignet wären, zukünftige Entwicklungen zu simulieren, lag ihr Einsatz ausserhalb des Umfangs dieser Arbeit und wird daher als möglicher Ansatz für zukünftige Untersuchungen betrachtet.

3.7 Einsatz generativer KI-Systeme

Gemäss der ZHAW-Richtlinie zur Deklarationspflicht von generativen KI-Systemen bei Arbeiten wird im Folgenden offengelegt, in welcher Form generative KI-Systeme in der vorliegenden Arbeit eingesetzt wurden.

Generative KI-Systeme wurden als Werkzeug für die Strukturierung von Kapiteln, die formale Ausarbeitung von Textentwürfen auf Basis eigener inhaltlicher Vorgaben, die Erstellung von Auswertungsskripten in R, als Hilfe für die Entwicklung und Dokumentation von Teilen der begleitenden Shiny-Applikation sowie für die Übersetzung des Abstracts ins Englische eingesetzt. Inhaltlich wertvoll war daneben die dialogische Reflexion methodischer Entscheidungen, insbesondere bei der Wahl der statistischen Modelle und bei der Einordnung möglicher Datenqualitätsprobleme. Methodische Entscheidungen wurden gegebenenfalls dialogisch reflektiert, um alternative Sichtweisen aktiv einzubeziehen.

Alle inhaltlich relevanten Aussagen, Literaturhinweise und methodischen Empfehlungen wurden eigenständig überprüft und durch Primärliteratur sowie durch Rücksprache mit der wissenschaftlichen Betreuung und mit externen Fachpersonen verifiziert. Die Forschungsfrage, die methodischen Wahlentscheidungen, die Interpretation der Resultate sowie die Verantwortung für die wissenschaftliche Belastbarkeit der Aussagen verbleiben beim Autor. Eine vollständige Übersicht der eingesetzten KI-Systeme mit Angabe der jeweiligen Verwendungszwecke findet sich im Verzeichnis generativer KI-Systeme im Anhang. Personen und unternehmensbezogene Daten wurden zu keinem Zeitpunkt an die eingesetzten Systeme übermittelt.

4 Resultate

4.1 Ergebnisse der explorativen Analyse

Die explorative Analyse des Datensatzes des Schweizerischen Nationalparks erfolgte überwiegend interaktiv über die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Shiny-App, ergänzt durch Auswertungen in tabellarischer Form sowie durch gezielte Visualisierungen in R. Ziel war es, ein umfassendes Bild der vorhandenen Datenbasis zu erhalten, sowohl in Bezug auf ihre zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung als auch hinsichtlich ihrer inhaltlichen Abdeckung und der phänologischen Muster, die sich darin abzeichnen. Die Ergebnisse sind als Grundlage für die nachfolgende Fehleranalyse und die statistische Modellierung gedacht; gleichzeitig sollen sie den Verantwortlichen des Nationalparks eine fundierte Entscheidungsbasis darüber liefern, welche Aspekte der Datenerhebung künftig priorisiert, ausgebaut oder neu ausgerichtet werden sollten.

4.1.1 Zeitliche Entwicklung der Datenerhebung

Über den gesamten Beobachtungszeitraum von 1994 bis 2025 lassen sich fünf klar voneinander unterscheidbare Erhebungsphasen identifizieren, die sich anhand der jährlichen Beobachtungsdichte abgrenzen lassen (Abbildung 2). In der Etablierungsphase von 1994 bis 2003 wurden durchschnittlich 59 Beobachtungen pro Jahr erfasst. Die Datenerhebung etablierte sich in dieser Periode als fester Bestandteil des Monitorings, blieb aber im Umfang vergleichsweise konstant. Es folgte zwischen 2004 und 2009 eine ausgeprägte Reduktionsphase mit nur noch rund 31 Beobachtungen pro Jahr, deren konkrete Ursachen aus dem Datensatz selbst nicht hervorgehen. Der niedrigste Wert wurde mit 22 Beobachtungen im Jahr 2007 erreicht. Ab 2010 begann eine Wiederaufbauphase, in der die Erhebung mit durchschnittlich 59 Beobachtungen pro Jahr wieder das ursprüngliche Niveau erreichte. Eine deutliche Erweiterung erfolgte in der Ausbauphase ab 2015, als die Datenerhebung schrittweise auf rund 118 Beobachtungen pro Jahr ausgebaut wurde. Massgeblich dazu beigetragen hat die Einbeziehung der Region Lü ab 2017 sowie eine systematischere Erfassung der bestehenden Standorte. Seit der Umstellung auf digitale Datenerfassung im Jahr 2023 befindet sich die Erhebung auf einem konstanten Plateau von 134 Beobachtungen pro Jahr.

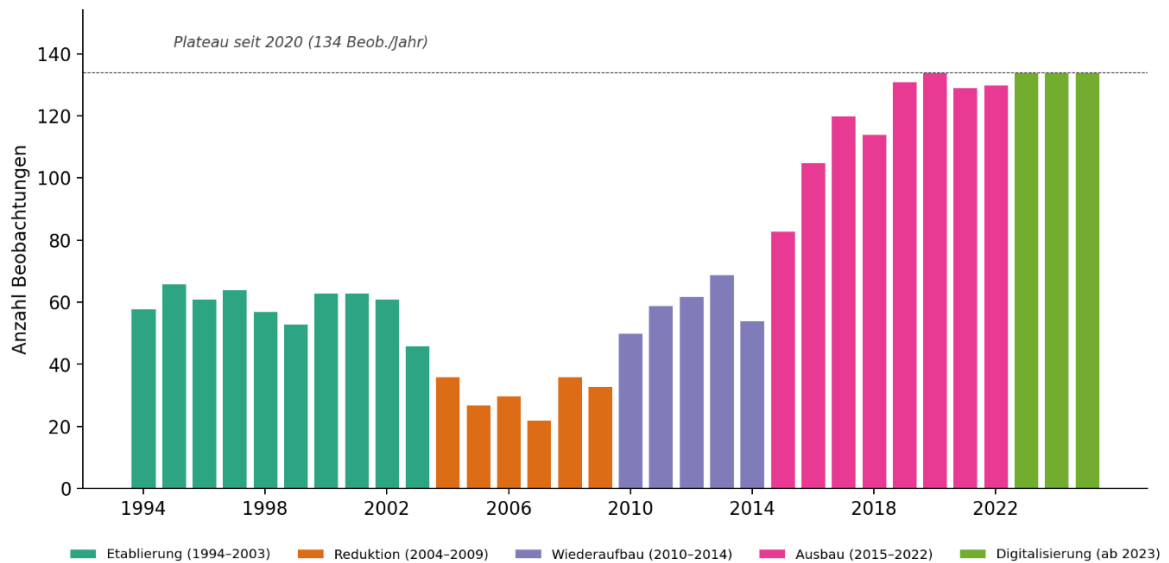


Abbildung 2: Anzahl phänologischer Beobachtungen pro Jahr (1994–2025), gegliedert nach den fünf identifizierten Erhebungsphasen.

Aus der Sicht des Nationalparks ist die Phase ab 2023 als methodischer Gewinn zu werten. Die strukturierte Erfassung erlaubt erstmals eine konsistente Auswertung, schafft jedoch gleichzeitig einen methodischen Bruch im Datensatz, der bei jeder langfristigen Trendauswertung berücksichtigt werden muss. Die historisch tieferen Beobachtungszahlen der frühen 2000er Jahre bedeuten zudem, dass viele frühe Zeitreihen nicht den heutigen Vollständigkeitsstandard erfüllen.

4.1.2 Räumliche Verteilung und Standortstruktur

Der Datensatz umfasst 67 Beobachtungsstandorte, die sich auf die fünf Regionen Cluozza, Fuorn, Lü, Mingèr und Trupchun verteilen. Die Standortdichte ist mit jeweils 15 Standorten in Mingèr und Trupchun am höchsten, gefolgt von Lü mit 14 und Fuorn mit 13 Standorten. Cluozza weist mit 10 Standorten die geringste Dichte auf. Die räumliche Anordnung der Standorte spiegelt die historisch gewachsene Erhebungspraxis des Nationalparks wider und bildet die unterschiedlichen Talstrukturen und Höhenstufen des Untersuchungsgebiets ab. Die Höhenangaben der Standorte konnten über die swisstopo-Höhen-API aus den vorhandenen LV95-Koordinaten erschlossen werden und liegen zwischen 1486 m (Mingèr) und 2272 m (Trupchun).

Die Region Lü nimmt dabei eine besondere Stellung ein. Sie liegt geografisch ausserhalb der eigentlichen Nationalparkgrenzen, befindet sich jedoch in derselben Landschaftsregion

und wird seit 2017 ergänzend in die phänologischen Erhebungen einbezogen. Diese Erweiterung war methodisch wertvoll, da Lü erstmals eine systematische Vergleichsperspektive im Val Müstair ermöglicht. Gleichzeitig führt die kurze Erhebungsdauer dazu, dass langfristige Trendanalysen für Lü derzeit nur eingeschränkt möglich sind.

4.1.3 Arten- und Stadienabdeckung

Der Datensatz enthält Beobachtungen zu 19 Pflanzenarten und sieben phänologischen Stadien (Beginn der Blühtentfaltung, Blühtentfaltung, Blühbeginn, Vollblüte, Fruchtreife, Blattverfärbung und Blattfall). Die Häufigkeit der Beobachtungen variiert jedoch erheblich zwischen den Arten und Regionen, was eine zentrale Eigenschaft des Datensatzes darstellt und für jede weiterführende Analyse von Bedeutung ist (Abbildung 3).

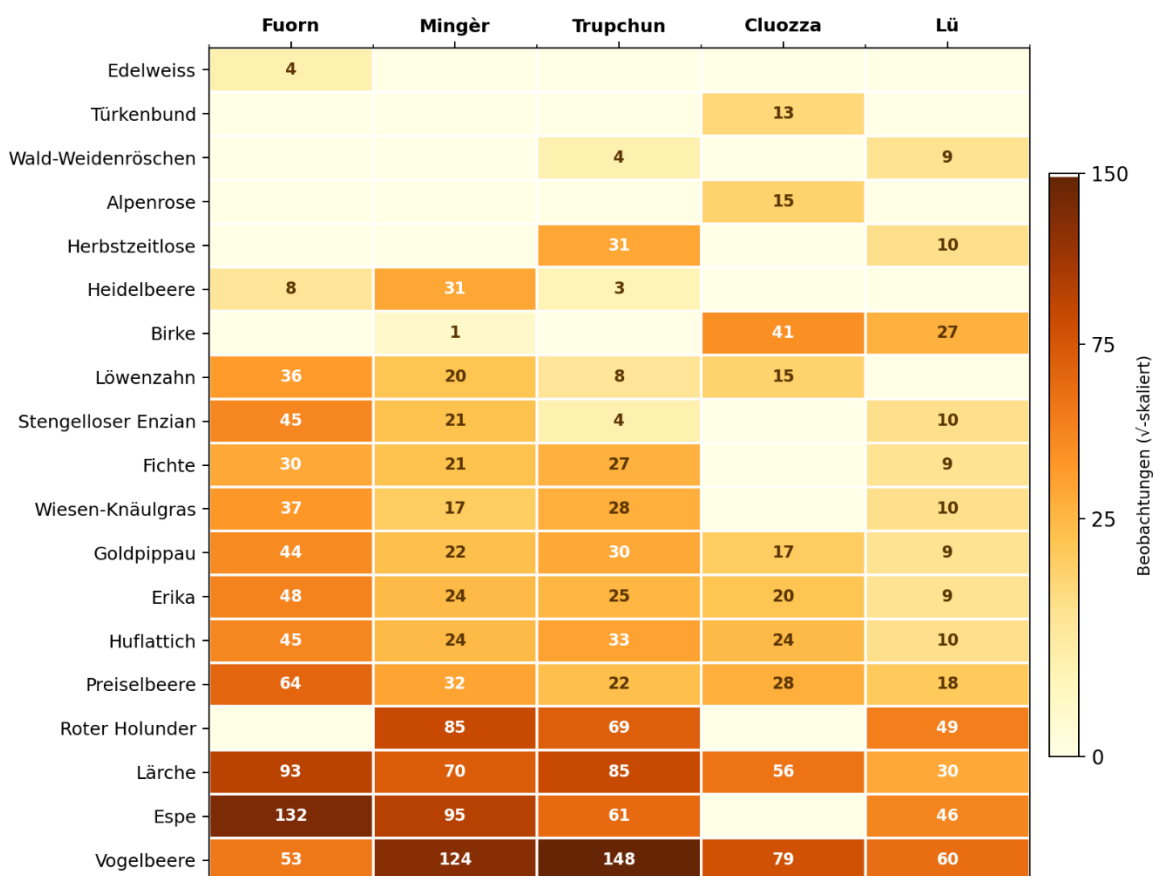


Abbildung 3: Anzahl der Beobachtungen pro Pflanzenart und Region. Leere Felder zeigen Art-Region-Kombinationen, für die im gesamten Erhebungszeitraum keine Beobachtungen vorliegen.

Die am besten dokumentierten Arten sind die Vogelbeere mit 464 Beobachtungen, die Espe mit 334, die Lärche mit 334 sowie der Rote Holunder mit 203 Beobachtungen. Diese vier

Arten allein machen rund die Hälfte des gesamten Datensatzes aus und decken zugleich verschiedene funktionale Pflanzengruppen ab. Demgegenüber stehen Arten, die nur in einzelnen Regionen erfasst werden oder mit sehr geringen Beobachtungszahlen vertreten sind. So wird die Alpenrose ausschliesslich in Cluozza beobachtet (15 Beobachtungen), der Türkenbund ebenfalls nur in Cluozza (13 Beobachtungen), und das Edelweiss wird in lediglich vier Beobachtungen aus Fuorn dokumentiert. Diese regional exklusiven Arten können für ökologische Fragestellungen einen besonderen Wert haben, sind aber für statistische Trendanalysen und dergleichen aufgrund der geringen Datenmenge nur sehr eingeschränkt nutzbar.

Auch innerhalb einer Art unterscheidet sich die Anzahl der erfassten Stadien deutlich. Während für die Vogelbeere und den Roten Holunder alle sieben phänologischen Stadien dokumentiert werden, sind es bei der Lärche nur vier (Blattentfaltung, Beginn Blattentfaltung, Blattverfärbung und Blattfall), und beim Türkenbund nur ein einziges Stadium (Vollblüte). Diese Heterogenität ist phänologisch nachvollziehbar, nicht alle Stadien sind bei allen Arten gleichermassen relevant oder beobachtbar, schränkt aber die Vergleichbarkeit zwischen Arten ein.

4.1.4 Verfügbarkeit langfristiger Zeitreihen

Eine zentrale Frage für die Aussagekraft des Datensatzes ist, in welchem Umfang langfristige Zeitreihen verfügbar sind, die eine statistische Analyse erlauben. Werden die Beobachtungen nach Standort, Art und Stadium gruppiert, ergeben sich insgesamt 165 separate Zeitreihen. Nur 47 Zeitreihen erreichen die in der phänologischen Forschung übliche Schwelle von mindestens 20 Beobachtungen, lediglich 5 Zeitreihen umfassen mehr als 30 Beobachtungen (Abbildung 4).

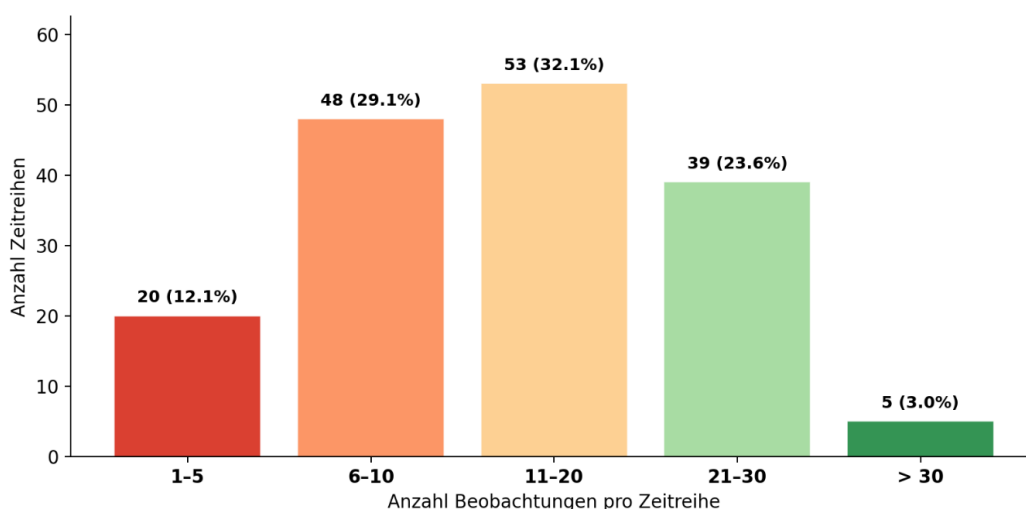


Abbildung 4: Klassifikation der 165 Zeitreihen im SNP-Datensatz nach Anzahl Beobachtungen.

Bei einer Anforderung von mindestens 20 Jahren Erfassungsdauer und einer Vollständigkeit von mindestens 80 Prozent verbleiben rund 30 Zeitreihen. Diese konzentrieren sich stark auf wenige Standort-Art-Stadium-Kombinationen, insbesondere in Fuorn (17 geeignete Zeitreihen) sowie in Trupchun (13). In Lü ist aufgrund der erst seit 2017 laufenden Erhebung keine einzige Zeitreihe verfügbar, die das 20-Jahres-Kriterium erfüllt.

Konkrete Beispiele besonders gut dokumentierter Zeitreihen sind die Lärchen-Blattentfaltung in Fuorn (Standort SMB-018, 32 Beobachtungen, vollständig 1994–2025), die Vogelbeere-Blattverfärbung in Trupchun (31 Beobachtungen über 32 Jahre) und die Erika-Vollblüte in Fuorn (32 Beobachtungen, vollständig). Diese Zeitreihen bilden den belastbaren Kern des Datensatzes für die nachfolgende statistische Modellierung.

Für die Nationalpark-Verantwortlichen ergibt sich daraus ein klares Bild: Der Datensatz enthält einige sehr wertvolle Langzeitreihen, gleichzeitig ist die Mehrheit der Zeitreihen für formale Aussagen zu kurz oder zu lückenhaft. Dies sollte bei der Planung künftiger Erhebungen berücksichtigt werden, indem prioritär jene Standorte, Arten und Stadien stabilisiert werden, die bereits über belastbare historische Reihen verfügen.

4.1.5 Phänologische Muster und regionale Unterschiede

Trotz der genannten Einschränkungen lassen sich aus dem Datensatz bereits in der explorativen Analyse phänologische Muster ableiten, die sowohl wissenschaftlich als auch praktisch von Interesse sind. Drei Aspekte sind besonders aussagekräftig.

Regionale Unterschiede der Eintrittsdaten. Für die Vogelbeere zeigt sich in der Vollblüte ein deutlicher regionaler Versatz zwischen den fünf Untersuchungsregionen (Abbildung 5). Lü weist mit einem mittleren Eintrittsdatum vom 16. Juni den frühesten Blühzeitpunkt auf, gefolgt von Fuorn (22. Juni) und Mingèr (26. Juni). Trupchun liegt mit dem 1. Juli bereits deutlich später und Cluozza schliesslich mit dem 7. Juli am Ende der Reihe. Die Spannweite zwischen frühester und spätester Region beträgt damit rund drei Wochen. Diese Unterschiede dürften zu einem grossen Teil auf höhenbedingte und kleinklimatische Faktoren zurückzuführen sein und unterstreichen die Bedeutung der regionalen Differenzierung in der weiterführenden Analyse.

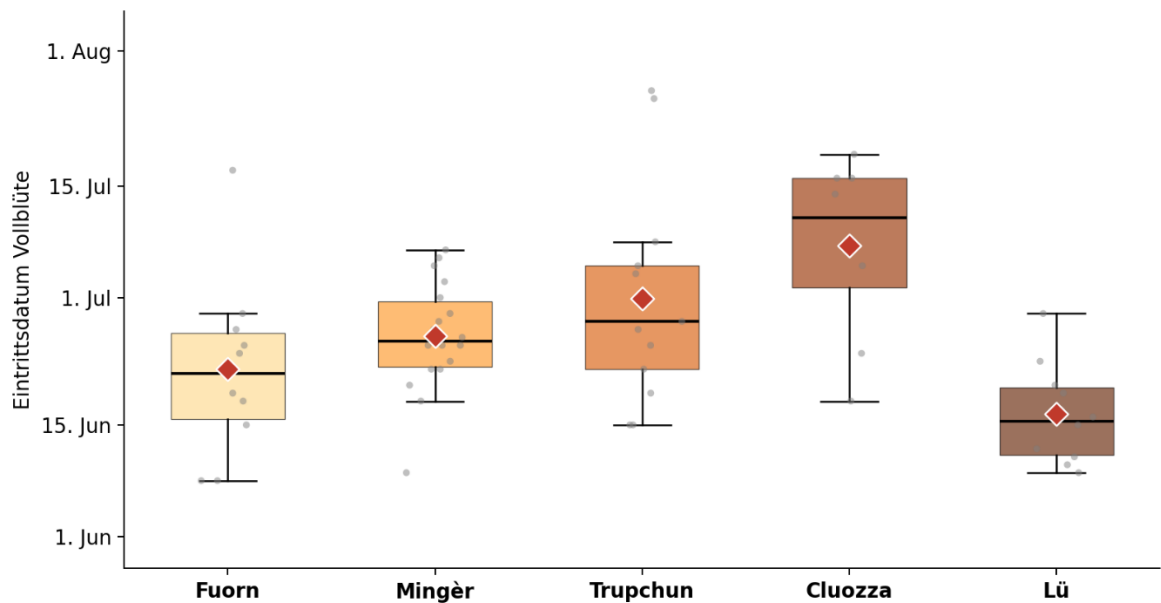


Abbildung 5: Verteilung des Eintrittsdatums der Vollblüte der Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) pro Region. Roter Diamant: Mittelwert; horizontaler Balken: Median.

Demgegenüber zeigen andere Arten und Phasen kaum regionale Unterschiede. Für die Lärchen-Blattentfaltung liegt das mittlere Eintrittsdatum zwischen dem 10. Mai (Lü) und dem 13. Mai (Fuorn). Die regionale Spannweite beträgt hier nur rund drei Tage, die Lärche reagiert offenbar deutlich einheitlicher auf den Frühlingsbeginn als die Vogelbeere auf den Sommer.

Werden für eine Art alle erfassten Stadien gemeinsam dargestellt, ergibt sich ein vollständiges Saisonprofil. Für die Vogelbeere (Abbildung 6) zeigt sich die typische phänologische Sequenz, beginnend mit der Blattentfaltung Ende April, gefolgt vom Blühbeginn Mitte Juni, der Vollblüte Ende Juni, der Fruchtreife im August und schliesslich der Blattverfärbung und dem Blattfall im Oktober. Solche Saisonprofile sind nicht nur didaktisch wertvoll, sondern erlauben auch Plausibilitätsprüfungen: einzelne Beobachtungen, die ausserhalb des erwarteten Zeitfensters liegen, lassen sich auf diese Weise schnell als potenzielle Ausreisser identifizieren.

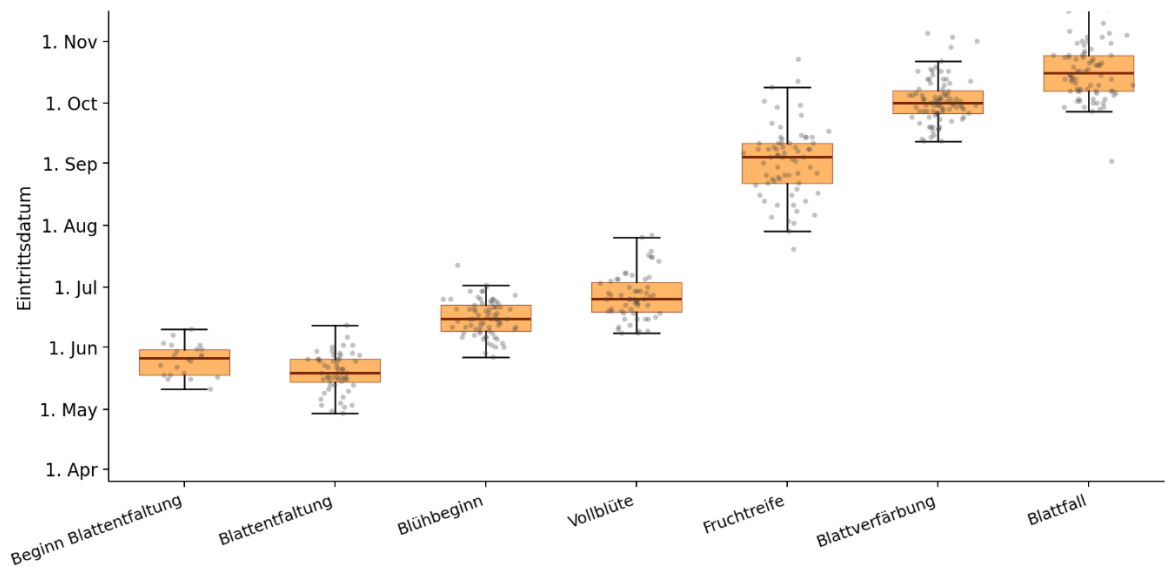


Abbildung 6: Saisonprofil der Vogelbeere – Verteilung der Eintrittsdaten aller sieben erfassten phänologischen Stadien.

4.1.6 Anomalien und besondere Beobachtungen

Mit der Umstellung der Datenerhebung auf digitale Erfassung ab 2023 wurde ein eigenes Feld zur Dokumentation von Anomalien eingeführt. Bislang wurden insgesamt 72 Beobachtungen mit einem entsprechenden Anomalie-Eintrag versehen. Am häufigsten genannt werden allgemeine Hinweise auf nicht näher spezifizierte Verzögerungen ("delayed_unknown", 12 Fälle) oder Vorverlagerungen ("early_unknown", 15 Fälle) sowie eine Kategorie "other" (29 Fälle), die ohne weitere Spezifikation auftritt. Konkret benannte Ursachen wie Frost (7 Fälle), Schneedruck (4 Fälle), Krankheit (2 Fälle), Dürre (1 Fall) oder Sturm (1 Fall) sind deutlich seltener.

Diese Anomalie-Information ist für die weiterführende Analyse von hoher Bedeutung, da sie eine direkte fachliche Einordnung auffälliger Beobachtungen erlaubt und damit zwischen tatsächlichen biologischen Verschiebungen und methodisch bedingten Abweichungen unterscheiden hilft. Aus Sicht des Nationalparks lohnt es sich, das Anomalie-Feld auch künftig konsequent zu nutzen und die Vergabe der Kategorien möglichst präzise zu handhaben, die hohe Häufigkeit der unspezifischen Kategorien deutet darauf hin, dass hier noch Potenzial für eine differenziertere Erfassung besteht.

4.1.7 Zwischenfazit für den Nationalpark

Die explorative Analyse zeigt einen Datensatz mit einer hohen inhaltlichen Vielfalt, einer beachtlichen zeitlichen Tiefe für einzelne Schwerpunktreihen, gleichzeitig aber auch erheblicher struktureller Heterogenität. Drei Erkenntnisse stehen für die zukünftige Nutzung im Vordergrund. Erstens bietet der Datensatz mit rund 30 belastbaren Langzeitreihen einen wertvollen Kern für phänologische Trendanalysen, der jedoch stark auf wenige Standorte und Arten konzentriert ist, insbesondere auf Fuorn und Trupchun. Zweitens machen die regionalen Unterschiede in den Eintrittsdaten deutlich, dass eine regionale Differenzierung in der Auswertung unverzichtbar ist. Ein einfaches Aggregat über alle Regionen würde die tatsächliche Variabilität nicht angemessen abbilden. Drittens zeigen die ersten visuellen Trends, dass der Datensatz, trotz aller methodischen Einschränkungen, in seinen Kernreihen die in der Literatur dokumentierten phänologischen Verschiebungen sichtbar macht und somit eine plausible Datenbasis für die nachfolgende statistische Analyse bildet.

Die detaillierten Ergebnisse zu Datenlücken, methodischen Brüchen und auffälligen Einzelbeobachtungen werden in Kapitel 4.2 (Ergebnisse der zur Datenqualität und Expertenbewertung) vertieft. Die formale statistische Trendanalyse anhand der hier identifizierten geeigneten Zeitreihen erfolgt in Kapitel 4.3.

4.2 Datenqualität und Einordnung durch Experten

Aufbauend auf der explorativen Analyse erfolgte eine vertiefte Untersuchung des Datensatzes hinsichtlich seiner Qualitätseigenschaften, struktureller Brüche und auffälliger Beobachtungen. Die Analyse verfolgte dabei nicht das Ziel, einen «bereinigten» Datensatz zu erzeugen, sondern die im Datensatz enthaltenen Eigenschaften so transparent wie möglich darzustellen, weil diese für die Interpretation der späteren Trendresultate von entscheidender Bedeutung sind. Die Untersuchung verband dabei eine datenbasierte Eigenanalyse mit einer im Juni 2026 in den Büroräumlichkeiten des Schweizerischen Nationalparks durchgeführten persönlichen Befragung von Fadri Bott, dem Leiter der Nationalparkwächter. Diese Kombination erwies sich als besonders wertvoll, weil viele der im Datensatz beobachtbaren Muster nur in Verbindung mit dem organisatorischen und personellen Kontext der Erhebung verständlich werden, der aus dem Datensatz selbst nicht hervorgeht.

Der konzeptionelle Bezugsrahmen der Datenqualitätsanalyse stützt sich auf die in der klimatologischen Forschung etablierten Konzepte zu Datenqualitätsproblemen, wie sie unter anderem von Gubler et al. (2017) und Hunziker et al. (2017) für meteorologische Stationsnetzwerke entwickelt wurden. Die dort beschriebenen Fehlerkategorien wie Rundungsfehler, abgeschnittene Niederschlagsereignisse oder wöchentliche Beobachtungszyklen sind auf phänologische Daten nur eingeschränkt übertragbar, da phänologische Beobachtungen

kategorial unterschiedlich erhoben werden. Übertragbar sind jedoch zwei zentrale Konzepte: die Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Fehlern sowie die Bedeutung der Inhomogenität von Zeitreihen, also methodisch bedingter Brüche, die als reale Trends fehlinterpretiert werden könnten. Stefanie Gubler, verweist in ihren Arbeiten zu Stationsnetzwerken insbesondere darauf, dass eine sorgfältige Beurteilung der Datenqualität die Voraussetzung jeder belastbaren Trendanalyse ist.

Die im Datensatz erkennbare strukturelle Heterogenität lässt sich aus organisatorischer Sicht weitgehend nachvollziehen. Die phänologische Erhebung im Schweizerischen Nationalpark wird grundsätzlich von den Parkwächtern mit Engagement durchgeführt, wobei die individuellen Präferenzen für diese Aufgabe unterschiedlich ausgeprägt sind. Eine zentrale Herausforderung liegt in der zeitlichen Lage der Frühjahrserhebungen, die in der Schweiz mit den Schulferien des Personals und mit der personalintensiven Wiederherstellung der Wege im Park nach der Winterperiode zusammenfallen (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Aus dieser Kombination heraus ergeben sich Phasen, in denen für die Erfassung phänologischer Stadien nur eingeschränkte personelle Kapazitäten zur Verfügung stehen. Der Nationalpark hat darauf bereits mit zwei strukturellen Massnahmen reagiert: einerseits durch die gezielte Anstellung jüngerer Parkwächter mit flexibleren familiären Rahmenbedingungen, andererseits durch die Einsetzung einer koordinierenden Verbindungsperson, die als Sprachrohr zwischen der Forschung und dem Parkwächter-Team fungiert.

Eine zweite, ebenso bedeutsame strukturelle Eigenschaft betrifft die historische Projektverankerung des Phänologie-Monitorings. Die Projektverantwortung war über lange Zeiträume nicht durchgängig einer einzelnen Stelle zugewiesen, sodass das Programm in Phasen mit starken anderen Prioritäten, beispielsweise umfangreichen Hüttensanierungen, zeitweise ohne aktive Steuerung weitergeführt wurde. Auch die Kommunikation des Forschungsziels gegenüber den Parkwächtern war historisch nicht durchgängig stark ausgebaut, sodass die Bedeutung der Erhebung für die langfristige wissenschaftliche Nutzung nicht immer transparent war. Diese organisatorischen Eigenschaften sind keine Bewertung einzelner Personen, sondern strukturelle Beobachtungen, die für ein realistisches Verständnis der Datenbasis und für eine gezielte Weiterentwicklung des Monitorings von Bedeutung sind.

Die in Kapitel 4.1 dargestellte Reduktionsphase zwischen 2004 und 2009 lässt sich vor diesem Hintergrund präzise einordnen. Eine systematische Auswertung zeigt, dass 25 Zeitreihen exakt in dieser Periode eine Unterbrechung aufweisen, davon 17 in Mingèr und 8 in Trupchun. Die Regionen Fuorn und Cluozza waren von der Reduktion deutlich weniger betroffen. Aus Sicht des Parkwächterteams fallen diese Jahre mit einem Prioritäten- und Verantwortungswechsel im Nationalpark zusammen, in dem das Phänologie-Monitoring ohne fest zugeordnete Projektverantwortung weitergeführt wurde und parallel grössere bauliche Vorhaben wie umfangreiche Hüttensanierungen die personellen Ressourcen banden (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Das ergebende Muster ist damit weniger Ausdruck einer reduzierten Datenqualität im engeren Sinne als vielmehr Ausdruck einer Phase, in der die institutionellen Rahmenbedingungen für eine kontinuierliche Erhebung nicht in vollem Umfang gegeben waren.

Die Erfassungspraxis selbst war historisch durch ein gewisses Mass an Beobachterabhängigkeit geprägt. Dies entspricht der allgemeinen Einschätzung von Yann Vitasse, wonach phänologische Erhebungen, insbesondere für Herbstphasen, von subjektiven Wahrnehmungsunterschieden zwischen einzelnen Beobachtern beeinflusst sind (Vitasse, persönliche Mitteilung). Diese Einschätzung wird in der konkreten Erfahrung des Parkwächerteams bestätigt: Beobachterabhängige Effekte sind nach Aussage von Bott im SNP-Datensatz sehr wahrscheinlich gegeben und werden durch fehlende einheitliche Referenzunterlagen, die in der Vergangenheit nicht durchgängig zur Hand genommen wurden, zusätzlich verstärkt (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Mit der Einführung der digitalen Datenerfassung im Jahr 2023 hat sich diese Situation deutlich verbessert: Die in der neuen Erhebungs-App enthaltenen Definitionen der phänologischen Stadien reduzieren den Interpretationsspielraum spürbar und sind aus Sicht der Erhebenden eine wesentliche Erleichterung der täglichen Arbeit.

Eine weitere Beobachtung aus dem Gespräch betrifft die Standortpraxis vor etwa 2013. In der frühen Phase der Erhebung kann nicht ausgeschlossen werden, dass an einem gegebenen Standort über die Jahre hinweg nicht durchgängig dasselbe Pflanzenindividuum bemessen wurde, sondern teilweise auch zugänglichere Alternativen aus der Umgebung herangezogen wurden (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Diese Aussage ist mit Vorsicht zu interpretieren, weil sie weder durchgängig dokumentiert noch flächig nachprüfbar ist. Sie liefert jedoch eine plausible Erklärung für einzelne Inhomogenitäten in den Anfangsjahren der Zeitreihen, die in der späteren Trendanalyse (Kapitel 4.3) ebenfalls sichtbar werden und ist daher für die methodische Einordnung der Trendergebnisse relevant.

Auf der Ebene der methodischen Brüche zeigt der Datensatz drei besonders bedeutsame Übergänge. Der Übergang 2003/2004 ist eng mit der oben beschriebenen Reduktionsphase verbunden. Die Erweiterung ab 2015 brachte vor allem zusätzliche Standorte und Arten in das Monitoring. Der Übergang 2023 stellt schliesslich einen besonders relevanten strukturellen Bruch dar. Mit der digitalen Datenerfassung wurden mehrere Veränderungen gleichzeitig eingeführt: eine konstante jährliche Anzahl von 134 Beobachtungen, eine systematische Dokumentation von Anomalien, die Erfassung der Nichtbeobachtbarkeit sowie die Möglichkeit, Eintrittsintervalle statt einzelner Datumsangaben festzuhalten. Aus Sicht der Datenqualität ist dieser Übergang ein deutlicher Gewinn, gleichzeitig erzeugt er aber eine Trennlinie zwischen den Daten vor und nach 2023, die bei jeder langfristigen Trendinterpretation berücksichtigt werden muss.

Von den insgesamt 2'418 Beobachtungen im Datensatz liegen für 87 Datenpunkte keine konkreten Eintrittsdaten vor, sondern lediglich Vermerke zur Nichtbeobachtbarkeit in fünf differenzierten Kategorien. Auffällig ist die starke zeitliche Häufung dieser Einträge ab 2023, als 54 der 87 Fälle entstanden sind. Diese Konzentration ist auf die Umstellung der Datenerhebung auf das digitale System zurückzuführen, in dem nicht beobachtbare Ereignisse erstmals systematisch dokumentiert werden können; vor 2023 erschienen entsprechende Fälle vermutlich gar nicht im Datensatz, sondern wurden als nicht erfasste Beobachtungen

behandelt. Geografisch konzentrieren sich die Beobachtungen ohne Eintrittsdatum auf wenige Art-Region-Kombinationen, was darauf hinweist, dass bestimmte Standorte oder Arten anfälliger für Witterungs- oder Wildtierschäden sind. Ergänzend ist anzumerken, dass die persönlichen Notizen der Parkwächter im Feld in der Regel ausführlicher sind als die im CSV-Datensatz hinterlegten Bemerkungen, was darauf hindeutet, dass nicht alle qualitativ relevanten Hinweise den Weg in die strukturierte Datenbank finden (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026).

Auch die in der explorativen Analyse identifizierten Lückenstrukturen einzelner Zeitreihen lassen sich aus dem Gespräch heraus differenziert einordnen. Die Lärche zeigt in ihrer Blattverfärbung in der Region Mingèr eine deutliche Unterbrechung, die mit der Kündigung des dortigen Gebietsverantwortlichen zusammenfällt und für die in diesem Zeitraum keine adäquate Stellvertretung organisiert werden konnte (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026, Abbildung 7).

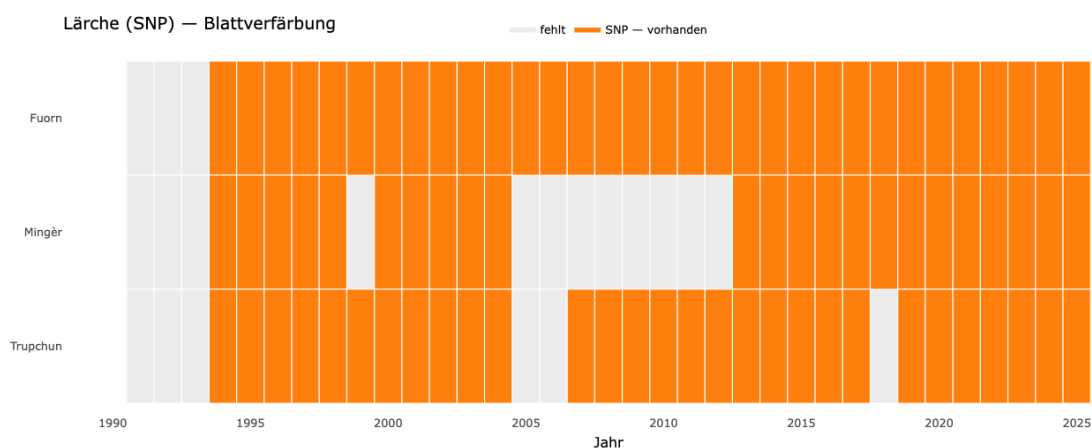


Abbildung 7: Datenverfügbarkeit der Lärchen-Blattverfärbung nach Region und Jahr.

Eine ähnliche Lückenstruktur zeigt sich für die Erika-Vollblüte in Mingèr. Die singulären Erfassungen in Trupchun lassen sich vermutlich darauf zurückführen, dass für die Erika-Vollblüte dort keine durchgehende Erfassungsverpflichtung bestand (Abbildung 8).

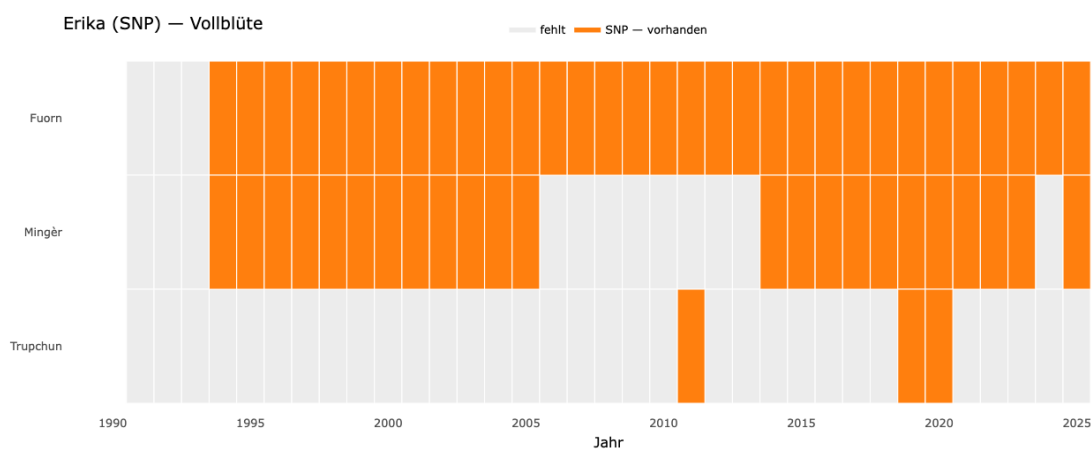


Abbildung 8: Datenverfügbarkeit der Erika-Vollblüte nach Region und Jahr.

Bei der Vogelbeere-Vollblüte in Fuorn ist die Ursache hingegen biologischer Natur: Der ursprünglich bemessene Baum wurde durch eine Lawine beschädigt und stand für weitere Erhebungen nicht mehr zur Verfügung; in der näheren Umgebung konnte kein geeignetes Ersatzindividuum gefunden werden, sodass die Erhebung an diesem Standort eingestellt wurde (Abbildung 9). Diese drei Fälle illustrieren exemplarisch, dass die im Datensatz erkennbaren Lücken nicht auf eine einzige Ursache zurückzuführen sind, sondern eine Mischung aus personellen Veränderungen, regional unterschiedlicher Erfassungsplanung und realen biologischen Ereignissen widerspiegeln.

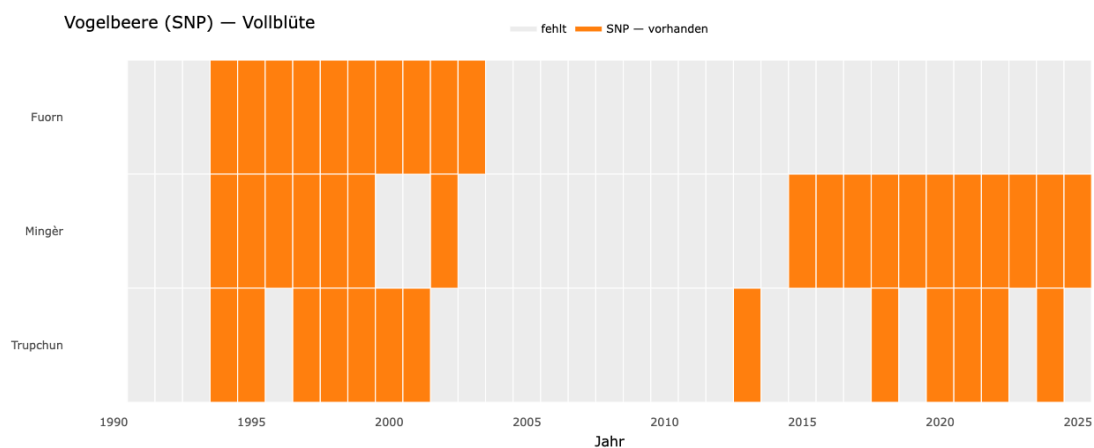


Abbildung 9: Datenverfügbarkeit der Vogelbeere-Vollblüte nach Region und Jahr.

Eine weitere im Datensatz sichtbare Auffälligkeit betrifft die Preiselbeere-Fruchtreife (Abbildung 10) in Mingèr und Fuorn zwischen 2000 und 2005, wo einzelne Eintrittsdaten deutlich vom üblichen Muster abweichen. Diese Datenpunkte lassen sich nach Einschätzung des Parkwächerteams vermutlich auf Erfassungs- oder Übertragungsfehler zurückführen und sollten in einer künftigen Datenpflege gezielt überprüft werden (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026).

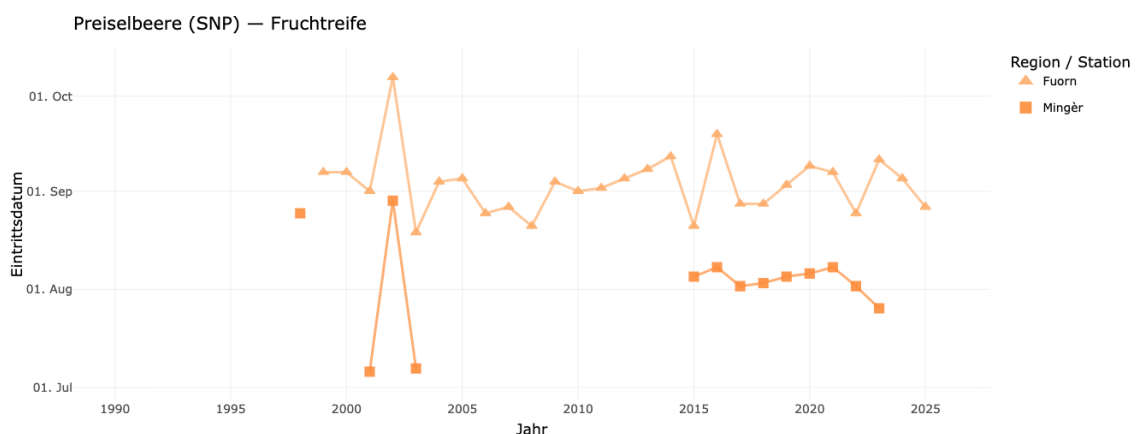


Abbildung 10: Sichtbare Auffälligkeit bei der Preiselbeere-Fruchtreife.

Stark abweichende Einzelbeobachtungen finden sich darüber hinaus auch in anderen Zeitreihen, beispielsweise bei der Vogelbeere-Vollblüte in Trupchun in den Jahren 2000 und 2001 mit Abweichungen von 28 bis 29 Tagen vom standortspezifischen. Nicht alle Einzelbefunde konnten im Gespräch im Detail eingeordnet werden, was angesichts des grossen zeitlichen Abstands und der historischen Datenlage nicht überrascht. Sie verbleiben in der weiteren Analyse als Ausreisser, deren Charakter, reales Wetterereignis oder methodische Abweichung, nicht abschliessend bestimmbar ist.

Eine letzte strukturelle Eigenschaft des Datensatzes betrifft die regionale Verteilung der erfassten Arten und Stadien. Während Lärche, Vogelbeere und Roter Holunder in fast allen Regionen erfasst werden, sind einzelne Arten wie Alpenrose, Türkenbund oder Edelweiss nur in einer einzigen Region vertreten. Diese regional exklusive Erfassung ist nach Einschätzung des Parkwächterteams nicht auf eine zentral koordinierte Auswahl zurückzuführen, sondern auf das persönliche Interesse einzelner Erhebender, die diese Arten in den lokalen Beobachtungsplan in den Anfangsjahren aufgenommen haben (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Daraus erklären sich auch die in der Regel unvollständigen und für vertiefte Analysen nur eingeschränkt geeigneten Datensätze dieser Arten.

Die topografische Struktur der Regionen unterscheidet sich erheblich, was aus den Höhenprofilen entlang der jeweiligen Talachsen ersichtlich wird (Abbildung 11). Cluozza und Mingè verfügen mit Höhenspannweiten von 691 beziehungsweise 671 Metern über die ausgeprägteste topografische Differenzierung, gefolgt von Fuorn mit 536 Metern. Trupchun weist mit 310 Metern eine vergleichsweise moderate Höhenspannweite auf, dokumentiert jedoch als einzige Region des Datensatzes alle sieben phänologischen Stadien sowie 15 Pflanzenarten, während die anderen Regionen jeweils sechs Stadien abdecken. Lü ist mit einer Spannweite von lediglich 116 Metern weniger ein klassisches Tal als ein Hochplateau und konzentriert sich auf einen engen Höhenbereich zwischen rund 1880 und 1995 Metern. Aus dieser differenzierten Betrachtung folgt, dass die topografische Spannweite zwar einen relevanten Faktor für die phänologische Vielfalt einer Region darstellt, dass aber die Auswahl der Standorte und die kontinuierliche Erhebungspraxis mindestens ebenso bedeutsam sind, um eine breite Stadienabdeckung zu erreichen. Der Fall Trupchun verdeutlicht dies besonders: Trotz mittlerer Höhenstaffelung wurde dort eine vollständige Abdeckung aller Phänostadien erreicht, was auf eine gezielte und konsistente Erhebungspraxis hinweist.

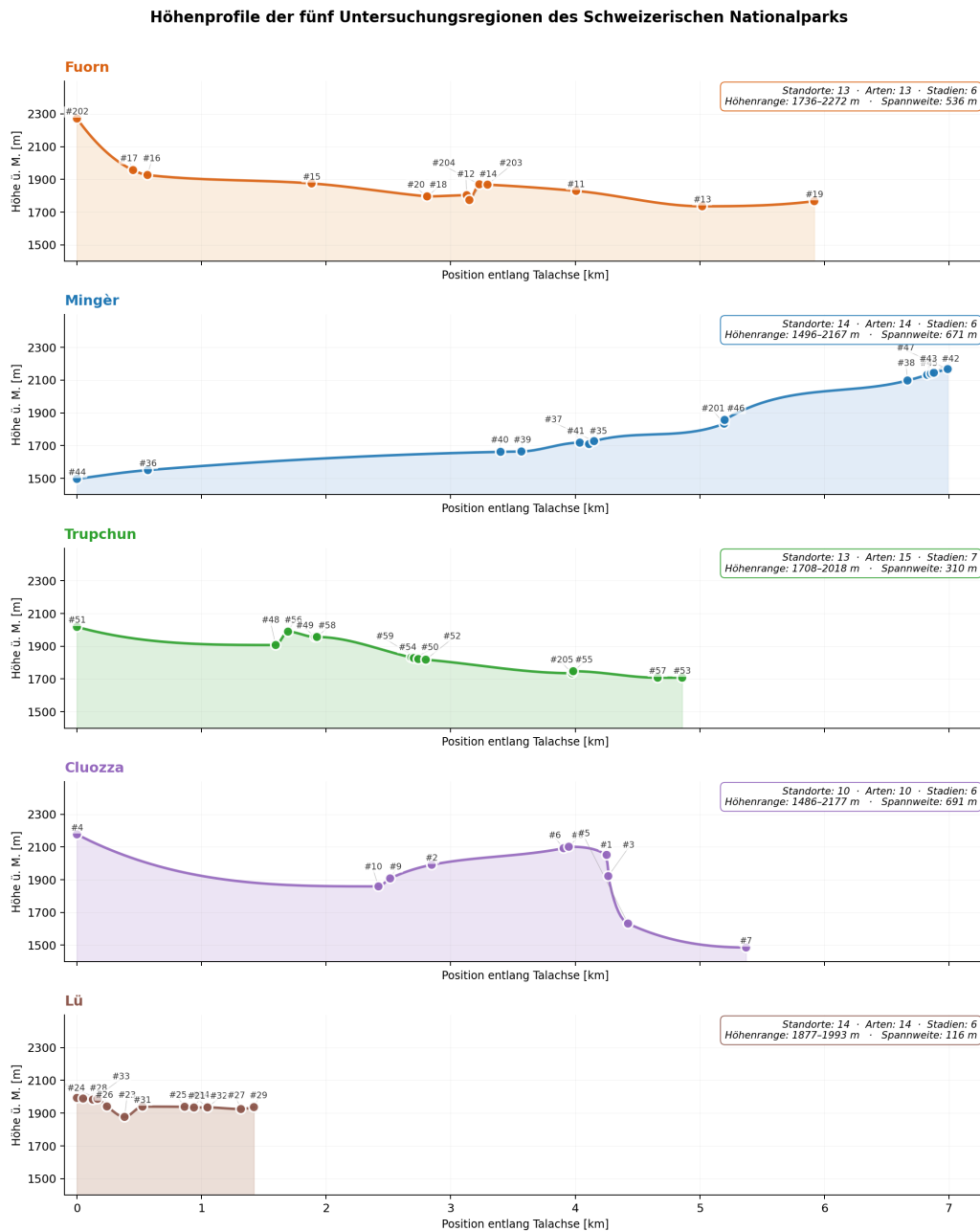


Abbildung 11: Höhenprofile der fünf Untersuchungsregionen des SNP

Aus der Zusammenschau der datenbasierten Analyse und der Expertenbefragung ergibt sich ein differenziertes Bild der Datenqualität des SNP-Phänologie-Datensatzes. Erstens enthält der Datensatz einen Kern von rund 30 belastbaren Zeitreihen, die sich nach formalen Kriterien wie Länge und Vollständigkeit für eine vertiefte Trendanalyse eignen und die sich auf wenige Standorte, vor allem in den Regionen Fuorn und Trupchun, konzentrieren. Zweitens weist der Datensatz mehrere strukturelle Bruchstellen auf, deren Ursachen aus dem Gespräch weitgehend nachvollziehbar geworden sind. Diese Bruchstellen sind nicht

Datenfehler im engeren Sinne, sondern Eigenschaften des Datensatzes, die jede langfristige Trendaussage methodisch begleiten und in der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Drittens zeigt die Untersuchung, dass die in der klimatologischen Literatur beschriebenen Fehlerkategorien für meteorologische Stationsdaten auf phänologische Beobachtungen nicht direkt anwendbar sind. Im SNP-Datensatz stehen vielmehr beobachterbezogene und organisatorische Aspekte im Vordergrund, deren Verständnis ohne den Einbezug von Personen mit institutionellem Gedächtnis nicht möglich gewesen wäre.

Für die zukünftige Weiterführung des Phänologie-Monitorings im Schweizerischen Nationalpark lassen sich aus dieser Analyse mehrere konkrete Ansatzpunkte ableiten, die in den Kapiteln 5.4 und 5.5 vertieft werden, hier aber bereits sichtbar werden. Eine institutionell klar verankerte Projektverantwortung mit kontinuierlicher Begleitung des Erhebungsprogramms würde nicht nur die Konsistenz der Erhebung absichern, sondern auch die Sinnvermittlung gegenüber den Erhebenden stärken und eine systematische Rückmeldung an das Parkwächterteam ermöglichen. Eine ergänzende Möglichkeit ist die in der digitalen Erhebungs-App noch nicht voll ausgereifte automatisierte Erinnerung an die zu erwartenden Phänostadium-Eintrittsdaten, die, basierend auf den Vorjahres-Eintrittsdaten, das Personal gezielt auf den anstehenden Beobachtungszeitraum hinweist. Diese Empfehlung wurde im Gespräch als wünschenswert formuliert (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Darüber hinaus wäre eine fachlich begleitete Reduktion der erhobenen Arten und Stadien auf ein definiertes Set besonders aussagekräftiger phänologischer Indikatoren, beispielsweise solcher mit klarer Frühlings-, Sommer- oder Herbst-Signalwirkung, eine vielversprechende Möglichkeit, die verfügbaren Ressourcen auf jene Erhebungen zu konzentrieren, die einen besonders hohen wissenschaftlichen Nutzen erwarten lassen. Eine solche Reduktion sollte unter Beizug einer phänologischen Fachperson erfolgen, um sicherzustellen, dass die verbleibenden Arten als verlässliche Indikatoren für die saisonalen Entwicklungen im Nationalpark dienen können.

Die für die nachfolgende statistische Trendanalyse in Kapitel 4.3 verwendete Methodenkombination berücksichtigt die hier dargestellten Eigenschaften des Datensatzes, indem sie sich auf die als belastbar identifizierten Zeitreihen beschränkt, robuste und gegenüber Ausreißern unempfindliche Verfahren anwendet und die bekannten Bruchstellen in der Interpretation der Trendaussagen explizit aufgreift.

4.3 Ergebnisse der statistischen Analyse

Die in Kapitel 3.6 hergeleitete Methodenkombination aus Mann-Kendall-Test, Sen's Slope und ergänzender GAM-Glättung wurde auf die im Rahmen der Daten- und Fehleranalyse als belastbar identifizierten Zeitreihen angewendet. Die Resultate werden im Folgenden zunächst übersichtlich präsentiert, anschliessend an mehreren vertieften Beispielen illus-

triert und schliesslich kritisch hinsichtlich ihrer methodischen Belastbarkeit, ihrer Vergleichbarkeit mit publizierten phänologischen Studien und ihrer Verwertbarkeit für mögliche Prognosen diskutiert

4.3.1 Auswahl der Zeitreihen

Aus den 30 Zeitreihen, die das Vitasse-Kriterium von mindestens 20 Jahren mit hoher Vollständigkeit erfüllen, wurden zwölf Zeitreihen für die formale Trendanalyse ausgewählt. Die Auswahl folgte drei Kriterien: hohe Vollständigkeit (mindestens 85 Prozent), ausreichende Spannweite (mindestens 25 Jahre) sowie eine möglichst ausgewogene Verteilung zwischen Frühjahrs-, Sommer- und Herbstphasen. Aufgrund der in Kapitel 4.1 dargelegten regionalen Konzentration der belastbaren Zeitreihen stammen neun der zwölf Reihen aus der Region Fuorn und drei aus Trupchun. Die Regionen Cluozza, Mingèr und Lù konnten aufgrund unzureichender Datenlage nicht in die formale Trendanalyse einbezogen werden. Dies stellt eine Limitation dar, deren Konsequenzen weiter unten in der kritischen Diskussion aufgegriffen werden.

Die Zeitreihen wurden den drei Kategorien Frühjahr (fünf Zeitreihen), Sommer/Blüte (vier Zeitreihen) und Herbst (drei Zeitreihen) zugeordnet. Die Kategorisierung folgt der biologischen Logik der phänologischen Stadienabfolge und ist methodisch relevant, da Frühjahrsphasen gemäss internationaler Literatur und gemäss der Stellungnahme von Yann Vitasse (persönliche Mitteilung) als robuster und weniger beobachterabhängig gelten als Herbstphasen

4.3.2 Übersicht der Trendergebnisse

Die Trendanalyse für alle zwölf Zeitreihen liefert ein differenziertes Bild, das in Tabelle 1 sowie in Abbildung 12 dokumentiert ist. Die Tabelle zeigt für jede Zeitreihe die Anzahl Beobachtungen, die Sen's-Slope-Schätzung mit zugehörigem 95 %-Konfidenzintervall, das Kendall'sche τ als Mass für die monotone Korrelation zwischen Jahr und Eintrittsdatum sowie den p-Wert des Mann-Kendall-Tests. Die Zuordnung zu den drei phänologischen Kategorien ist farblich hinterlegt (grün für Frühjahr, gelb für Sommer/Blüte, violett für Herbst), signifikante Trends sind rot hervorgehoben.

Tabelle 1: Ergebnisse der Mann-Kendall- und Sen's-Slope-Analyse für die zwölf ausgewählten Zeitreihen.

Nr.	Kategorie	Zeitreihe (Art - Phase, Region)	n	Sen's Slope [95%-KI] (Tage/Dekade)	τ (Kendall)	p-Wert
1	Frühjahr	Lärche - Blattentfaltung, Fuorn	32	-0.52 [-3.33; +2.73]	-0.048	0.7085
2	Frühjahr	Lärche - Beginn Blattentfaltung, Trupchun	28	-2.73 [-5.62; +1.11]	-0.201	0.1374
3	Frühjahr	Espe - Blattentfaltung, Fuorn	30	+2.11 [-1.33; +5.45]	+0.161	0.2175
4	Frühjahr	Fichte - Blattentfaltung, Fuorn	30	+0.62 [-2.92; +3.33]	+0.053	0.6940
5	Frühjahr	Huflattich - Blühbeginn, Trupchun	29	-4.40 [-7.50; -0.67]	-0.310	0.0188 *
6	Sommer/Blüte	Erika - Vollblüte, Fuorn	32	-5.00 [-10.00; +0.00]	-0.260	0.0377 *
7	Sommer/Blüte	Huflattich - Vollblüte, Fuorn	30	-2.00 [-7.14; +1.54]	-0.124	0.3433
8	Sommer/Blüte	Stengelloser Enzian - Vollblüte, Fuorn	29	-1.46 [-4.58; +1.48]	-0.131	0.3278
9	Sommer/Blüte	Preiselbeere - Fruchtreife, Fuorn	27	+0.50 [-4.55; +4.55]	+0.037	0.8019
10	Herbst	Lärche - Blattverfärbung, Fuorn	32	+3.33 [+1.11; +6.67]	+0.345	0.0057 **
11	Herbst	Lärche - Blattverfärbung, Trupchun	29	+1.33 [-0.95; +3.00]	+0.172	0.1936
12	Herbst	Vogelbeere - Blattverfärbung, Trupchun	31	+0.00 [-2.50; +2.50]	-0.022	0.8780

Signifikanzniveaus: * $p < 0.05$ · ** $p < 0.01$ · *** $p < 0.001$ (unkorrigiert). Nach Bonferroni-Korrektur ($\alpha = 0.0042$) bleibt keine Zeitreihe signifikant.

Drei der zwölf Trends erreichen bei einem unkorrigierten Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ statistische Signifikanz. Die stärkste Verfrühung zeigt die Erika-Vollblüte in Fuorn mit -5.00 Tagen pro Dekade ($p = 0.038$), gefolgt vom Huflattich-Blühbeginn in Trupchun mit -4.40 Tagen pro Dekade ($p = 0.019$). Die einzige signifikante Verspätung betrifft die Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn mit $+3.33$ Tagen pro Dekade ($p = 0.006$). Bei den übrigen neun Zeitreihen kann kein statistisch signifikanter Trend nachgewiesen werden, wobei die Punktschätzungen der Steigung in den meisten Fällen die in der Literatur dokumentierte Richtung andeuten: Frühjahrs- und Sommerphasen verschieben sich tendenziell nach vorne, Herbstphasen tendenziell nach hinten. Die Spannweite der Sen's-Slope-Schätzungen reicht von -5.00 bis $+3.33$ Tage pro Dekade, die Kendall'schen τ -Werte liegen zwischen -0.310 und $+0.345$, alles Grössenordnungen, die zur Datenlage und zur Stichprobengrösse passen.

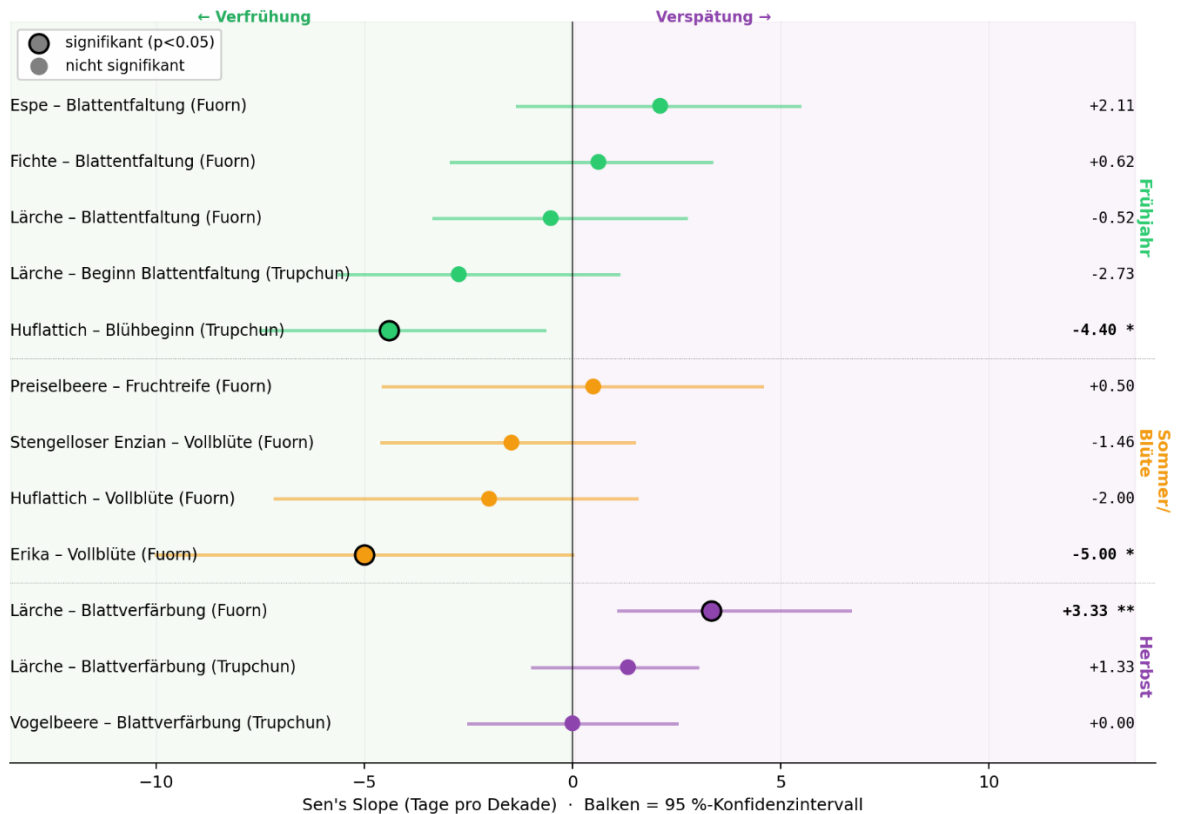


Abbildung 12: Forest-Plot der zwölf Sen's-Slope-Schätzungen mit 95 %-Konfidenzintervallen. Punkte mit schwarzer Umrandung kennzeichnen signifikante Trends bei $\alpha = 0.05$ (unkorrigiert).

Die Forest-Plot-Darstellung macht zwei zusätzliche Beobachtungen deutlich. Erstens sind die Konfidenzintervalle der Sen's-Slope-Schätzungen durchgehend breit, was bei einem Stichprobenumfang von 27 bis 32 Beobachtungen und der typischen Streuung phänologischer Daten methodisch zu erwarten ist. Zweitens überlappen die Konfidenzintervalle aller zwölf Zeitreihen mit dem Nullwert oder liegen knapp an dessen Grenze, eine Konstellation, die für die nachfolgende Interpretation entscheidend ist.

4.3.3 Detailbetrachtung ausgewählter Zeitreihen

Lärchen-Blatentfaltung in Fuorn

Die Lärchen-Blatentfaltung in Fuorn ist die längste und vollständigste Zeitreihe im SNP-Datensatz ($n = 32$, 1994–2025, Vollständigkeit 100 %). Aus der phänologischen Klimawandel-Literatur wäre für diese Phase eine signifikante Verfrühung zu erwarten gewesen, Menzel et al. (2006) berichten für europäische Frühjahrsphasen typischerweise Verfrühungen in der Größenordnung von zwei bis vier Tagen pro Dekade. Im SNP-Datensatz beträgt der

Sen's Slope hingegen nur -0.52 Tage pro Dekade (95 %-KI $[-3.33; +2.73]$), was statistisch nicht von null unterscheidbar ist ($p = 0.708$, Abbildung 13).

Lärche - Blattentfaltung (Region Fuorn, Standort 11)

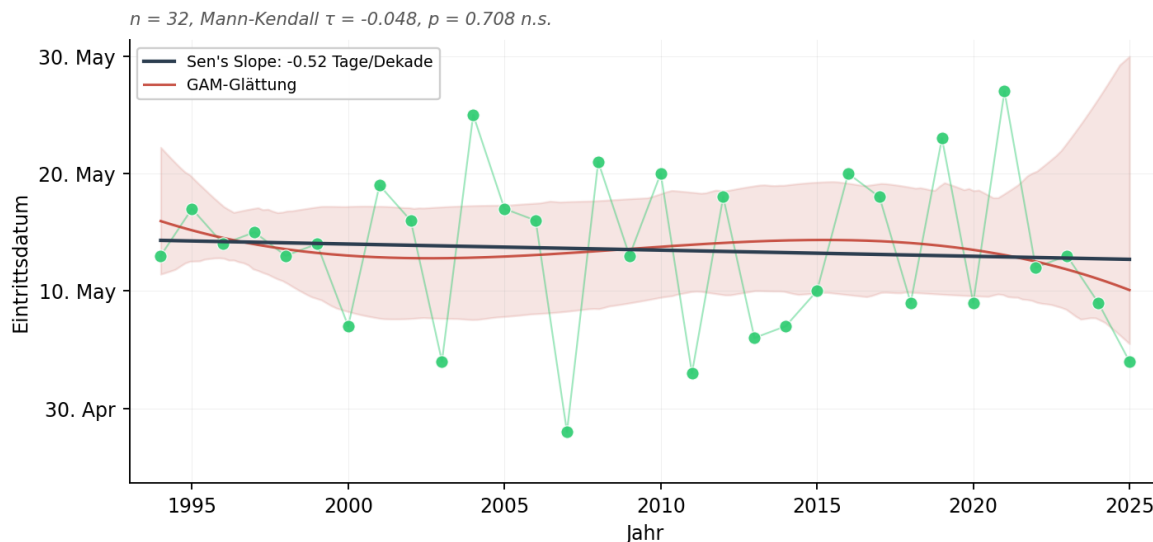


Abbildung 13: Zeitreihe der Lärchen-Blattentfaltung in Fuorn mit Sen's-Slope-Trendlinie und GAM-Glättung.

Dieses Resultat ist auf den ersten Blick überraschend und verdient eine differenzierte Betrachtung. Die GAM-Glättung zeigt, dass die Zeitreihe zwischen 1994 und etwa 2025 ein weitgehend konstantes Niveau aufweist. Die hohe interannuelle Variabilität, einzelne Jahre wie 2007 mit besonders frühem Eintritt oder 2021 mit besonders spätem, dominiert die Reihe und überlagert einen allfälligen langfristigen Trend. Ein zweiter Punkt ist methodisch bedeutsam: Die Lärche ist eine alpine Art, die in höheren Lagen ohnehin spät austreibt und deren Phänologie stark durch die Schneeschmelze bestimmt wird. Diese komplexe Steuerung kann den linearen Klimawandel-Effekt teilweise puffern.

Huflattich-Blühbeginn in Trupchun

Der Huflattich gehört zu den frühesten blühenden Arten im SNP-Datensatz, mit einem mittleren Eintrittsdatum des Blühbeginns Anfang April. Die Zeitreihe in Trupchun ($n = 29$, 1994–2025, Vollständigkeit 91 %) zeigt eine signifikante Verfrühung von 4.40 Tagen pro Dekade (95 %-KI $[-7.50; -0.67]$, $p = 0.019$, Abbildung 14).

Huflattich - Blühbeginn (Region Trupchun, Standort 53)

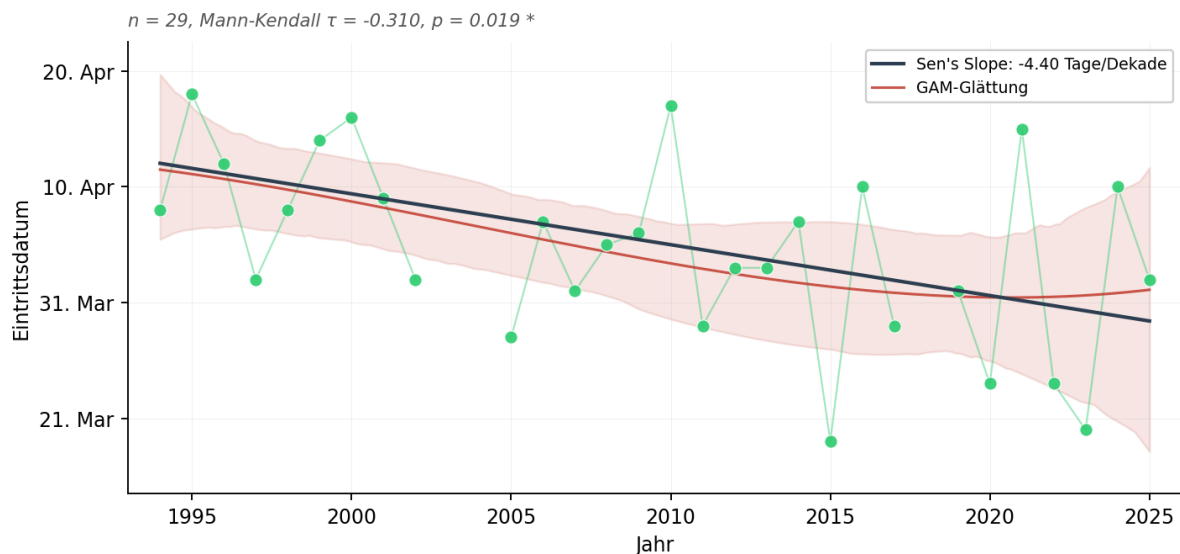


Abbildung 14: Zeitreihe des Huflattich-Blühbeginns in Trupchun mit Sen's-Slope-Trendlinie und GAM-Glättung.

Diese Verfrühung passt inhaltlich gut zur Erwartung aus der Literatur, liegt aber mit -4.40 Tagen pro Dekade am oberen Rand der publizierten Werte. Mehrere Faktoren begünstigen vermutlich diesen vergleichsweise starken Effekt. Der Huflattich blüht in Trupchun früh im Jahr, oft noch vor oder kurz nach der lokalen Schneeschmelze, und reagiert daher besonders sensitiv auf eine veränderte Frühjahrsstemperatur. Gleichzeitig ist die Phase „Blühbeginn“ relativ klar definierbar, der erste vollständig geöffnete Blütenstand ist auch für unterschiedliche Beobachter konsistent zu erkennen, was die Beobachterunsicherheit reduziert. Trotz dieser inhaltlich plausiblen Erklärung ist die statistische Robustheit des Resultats begrenzt. Mit $p = 0.019$ liegt der Test nahe an der Signifikanzgrenze, und im weiter unten diskutierten Lichte der Mehrfachprüfung bleibt der Befund interpretationsbedürftig.

Erika-Vollblüte in Fuorn

Die Erika-Vollblüte in Fuorn liefert mit -5.00 Tagen pro Dekade die zahlenmässig stärkste Verfrühung des gesamten Datensatzes ($n = 32$, $p = 0.038$, 95 %-KI $[-10.00; 0.00]$, Abbildung 15). Auffällig ist die ausgeprägte interannuelle Variabilität der Reihe: In einzelnen Jahren liegt der Eintritt der Vollblüte um Mitte Juni (2002), in anderen bereits Mitte April (2011), die Spanne zwischen Jahresminimum und -maximum beträgt damit rund zwei Monate.

Erika - Vollblüte (Region Fuorn, Standort 15)

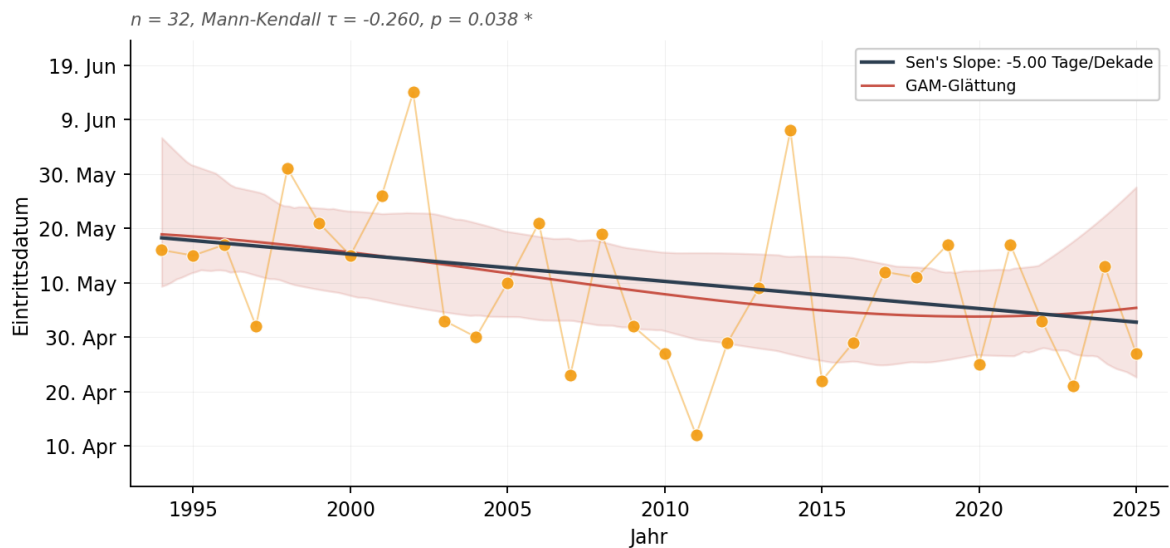


Abbildung 15: Zeitreihe der Erika-Vollblüte in Fuorn mit Sen's-Slope-Trendlinie und GAM-Glättung.

Mehrere Aspekte sind hier diskussionswürdig. Erstens reicht das obere Ende des 95 %-Konfidenzintervalls genau bis zum Nullwert. Dies bedeutet, dass der Trend zwar formell signifikant ist, die Aussage aber statistisch nur knapp belastbar bleibt, eine geringe Veränderung der zugrundeliegenden Daten oder das Hinzukommen weniger weiterer Beobachtungen könnte die Signifikanz aufheben. Zweitens ist die Erika eine Art mit ungewöhnlich frühem Blühbeginn, deren Vollblüte sehr variabel mit den Frühjahrsbedingungen schwanken kann. Die hohe interannuelle Variabilität legt nahe, dass entweder die Erfassungspraxis schwankt oder die Pflanze tatsächlich sehr stark auf kurzfristige Witterungsschwankungen reagiert. Drittens verläuft die GAM-Glättung in den 2020er Jahren eher flach, was darauf hindeuten könnte, dass der Trend in jüngerer Zeit auf einem tieferen Niveau einläuft, statt sich ungebremst fortzusetzen.

Lärchen-Blattverfärbung

Die Verspätung der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn ist mit einem Sen's Slope von +3.33 Tagen pro Dekade ($p = 0.006$) der einzige Trend, der auch bei strengerer Betrachtung als statistisch deutlich belastbar gelten kann. Auch die GAM-Glättung zeigt diesen Verlauf von Ende September in den 1990er Jahren zu Mitte Oktober in den 2020er Jahren (Abbildung 16).

Lärche - Blattverfärbung (Region Fuorn, Standort 11)

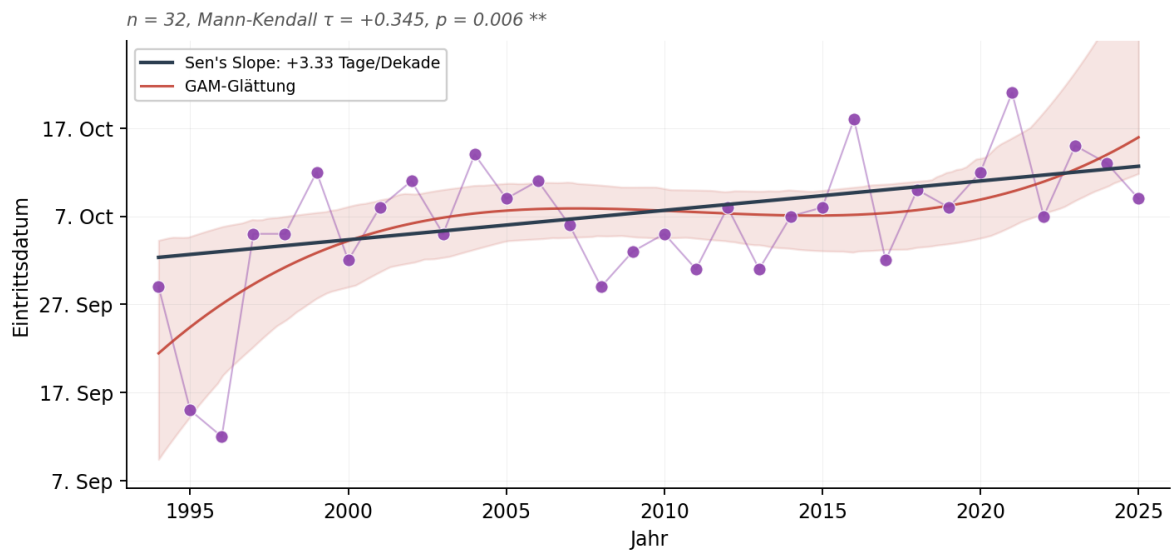


Abbildung 16: Zeitreihe der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn mit Sen's-Slope-Trendlinie und GAM-Glättung.

Allerdings sind die drei sehr frühen Beobachtungen der Jahre 1994–1996 (Mitte September) augenfällig. Es ist nicht auszuschliessen, dass diese drei Datenpunkte einen Methodenwechsel oder einen Beobachterwechsel widerspiegeln, der den Beginn des Monitorings markiert. Ohne diese drei Werte würde der Trend deutlich schwächer ausfallen. Dieser Befund unterstreicht, wie sensibel die Tendaussage gegenüber wenigen Anfangswerten ist und wie zentral die in Kapitel 4.2 dokumentierte Datenqualitätsanalyse für die korrekte Interpretation ist.

Regionaler Vergleich Fuorn ↔ Trupchun — Replikation oder Divergenz?

Die Lärchen-Blattverfärbung ist die einzige Phase, für die zwei Regionen mit ausreichender Datenqualität verfügbar sind und ein direkter Vergleich möglich wird (Abbildung 17).

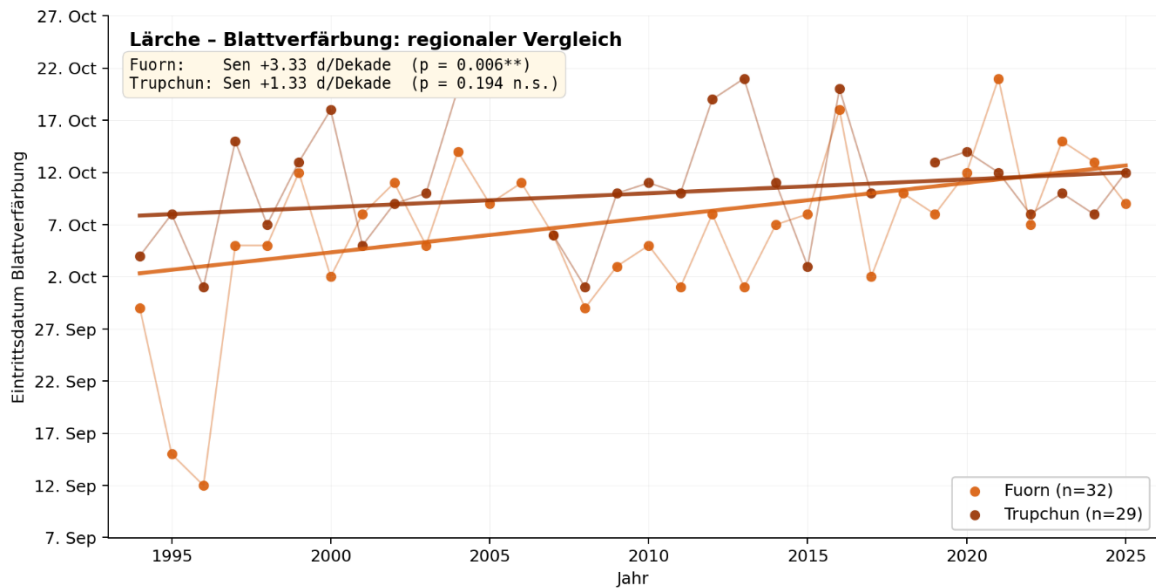


Abbildung 17: Vergleich der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn und Trupchun.

In Fuorn beträgt der Trend +3.33 Tage pro Dekade (95 %-KI [+1.11; +6.67], $p = 0.006$), in Trupchun +1.33 Tage pro Dekade (95 %-KI [−0.95; +3.00], $p = 0.194$). Beide Punktschätzungen weisen in dieselbe Richtung, Verspätung der Blattverfärbung und die beiden Konfidenzintervalle überlappen im Bereich von etwa +1.1 bis +3.0 Tagen pro Dekade substantiell. Statistisch lässt sich daraus keine belastbare Aussage einer Divergenz zwischen den beiden Regionen ableiten; im Gegenteil, das Ergebnis stützt eher den Gedanken eines gemeinsamen Trends, der in beiden Regionen wirksam ist, in Trupchun aber aufgrund kleinerer Stichprobe und höherer Reststreuung das Signifikanzniveau nicht erreicht. Dieser regionale Vergleich ist damit eher eine vorsichtige Bestätigung des Fuorn-Befunds als seine Relativierung. Gleichzeitig bleibt die Möglichkeit bestehen, dass lokale Bedingungen oder Beobachtungsprotokolle die Trendstärke in Fuorn akzentuieren, eine Frage, die aus zwei Zeitreihen allein nicht abschliessend zu beantworten ist.

4.3.4 Plausibilisierung mit publizierten Trends

Eine Plausibilisierung der SNP-Trendaussagen erfolgt durch den Vergleich mit publizierten phänologischen Studien aus dem Alpenraum. Menzel et al. (2006) berichten für europäische Frühjahrsphasen mittlere Verfrühungen von zwei bis vier Tagen pro Dekade, für Herbstphasen Verspätungen von 0.3 bis 1.6 Tagen pro Dekade. Auchmann et al. (2018) dokumentieren für das Schweizer Phänologie-Netzwerk Verfrühungen der Lärchen-Blatt-

entfaltung in der Grössenordnung von einem bis drei Tagen pro Dekade. Die Vorgehensweise von MeteoSchweiz für die Erstellung der phänologischen Klimanormwerte deutet in dieselbe Richtung.

Die Resultate aus dem SNP-Datensatz fügen sich teilweise in dieses Bild ein, weichen aber in mehreren Aspekten ab. Die Verfrühungen der signifikanten Frühjahrs- und Sommerphasen (Huflattich-Blühbeginn, Erika-Vollblüte) liegen mit -4.40 und -5.00 Tagen pro Dekade am oberen Rand oder sogar über den Literaturwerten. Die Verspätung der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn von $+3.33$ Tagen pro Dekade ist deutlich grösser als die typischen Literaturwerte für Herbstphasen. Beide Diskrepanzen können als Hinweis auf reale Besonderheiten des Untersuchungsgebiets (höhere Lage, kleinklimatische Bedingungen) gedeutet werden oder aber auf methodische Eigenheiten zurückzuführen sein, insbesondere die geringe Anzahl Standorte pro Trenderaussage. Die Lärchen-Blattentfaltung in Fuorn passt hingegen nicht zum Literaturbild und stellt eine echte Auffälligkeit dar, die in der Diskussion (Kapitel 5) vertieft werden muss.

4.3.5 Anmerkungen zur Prognose-Frage

In Kapitel 3.6 wurde bewusst auf eine prognostische Modellierung verzichtet, weil die hier verwendeten Verfahren keine kausalen Treibervariablen einschliessen. Die statistischen Ergebnisse stützen diese Entscheidung. Eine Extrapolation der Lärchen-Blattverfärbung mit $+3.33$ Tagen pro Dekade würde bedeuten, dass diese Phase in 30 Jahren um zehn Tage später eintritt, also Mitte bis Ende Oktober. Eine solche Aussage wäre aus mehreren Gründen problematisch. Erstens setzt sie eine lineare Fortsetzung des beobachteten Trends voraus. Zweitens berücksichtigt sie keine physiologischen Grenzen, die Blattverfärbung kann durch Tageslicht und Frostereignisse begrenzt werden, was eine reine Zeit-Extrapolation überflüssig macht. Drittens würde eine Punktprognose den breiten Konfidenzintervallen nicht gerecht. Eine seriöse Vorhersage zukünftiger phänologischer Entwicklungen erfordert ein Modell, das Temperatur, Photoperiode und gegebenenfalls Winterkühlung berücksichtigt, etwa ein Growing-Degree-Day-Modell oder ein photoperiode-erweitertes Modell wie das M1-Modell (vergleiche Vitasse, persönliche Mitteilung). Beides liegt ausserhalb des Rahmens dieser Arbeit und wird als Ausblick in Kapitel 5 weiter ausgeführt.

4.3.6 Zwischenfazit für Kapitel 5

Aus der statistischen Analyse ergeben sich drei Aussagen, die in der nachfolgenden Diskussion vertieft werden. Erstens enthält der SNP-Datensatz vermutlich keinen einzigen Trend, der einer strengen Multiplizitätskorrektur standhält. Ein einzelnes robustes Signal, die Verspätung der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn, steht im Zentrum, sollte aber im Lichte möglicher Inhomogenitäten und Beobachtereffekte vorsichtig interpretiert werden.

Zweitens stützen die Punktschätzungen der übrigen Zeitreihen tendenziell die in der Literatur dokumentierte Richtung (Frühjahrsverfrühung, Herbstverspätung), erreichen aber bei den vorliegenden Stichprobengrößen keine statistische Belastbarkeit. Drittens zeigt der einzige mögliche regionale Vergleich zwischen Fuorn und Trupchun gleichgerichtete Trends, deren unterschiedliche Stärken statistisch nicht voneinander unterscheidbar sind, ein Befund, der Sparsamkeit bei Generalisierungen auf den gesamten Park nahelegt, ohne den Trend selbst in Frage zu stellen. Für die Nationalpark-Verantwortlichen bedeutet dies, dass die phänologische Datenerhebung in ihrer gegenwärtigen Form wertvolle Hinweise liefert, aber für robuste langfristige Aussagen sowohl eine ausgewogenere räumliche Repräsentativität als auch eine längere Beobachtungsdauer benötigt.

4.4 Plausibilisierung mit MeteoSchweiz-Daten

Wie in Kapitel 3.5 dargelegt, dienen die Phänologie-Daten von MeteoSchweiz in dieser Arbeit nicht als Bestandteil der eigentlichen Trendanalyse, sondern als externe Referenz zur Einordnung und Plausibilisierung der SNP-Beobachtungen. Im Lichte der in Kapitel 4.2 beschriebenen Eigenschaften des SNP-Datensatzes, insbesondere der historischen Beobachterabhängigkeit und der vor 2023 nicht durchgängig vereinheitlichten Erhebungspraxis, stellt sich die Frage, ob die SNP-Zeitreihen über die Jahre ein phänologisch konsistentes Bild zeichnen oder ob die genannten Eigenschaften das beobachtete Signal merklich verzerren. Der nachfolgende Vergleich mit den vergleichbaren Stationen des Schweizer Phänologie-Netzwerks erlaubt eine erste qualitative Antwort auf diese Frage.

Für den Vergleich wurden fünf MeteoSchweiz-Stationen herangezogen, die in geographischer Nähe zum Schweizerischen Nationalpark liegen und in topografischer wie klimatischer Hinsicht mit den Untersuchungsregionen vergleichbar sind: Davos, Pontresina, Sent, St. Moritz und Zuoz. Die Stationen erstrecken sich über einen ähnlichen Höhenbereich wie die SNP-Standorte und decken im Wesentlichen denselben Beobachtungszeitraum ab. Methodisch handelt es sich um einen visuellen Zeitreihenvergleich der jährlichen Eintrittsdaten. Auf eine formale statistische Gegenüberstellung, etwa über parallel berechnete Mann-Kendall-Tests und Sen's-Slope-Schätzungen für identische Arten und Stadien, wurde im Rahmen dieser Arbeit bewusst verzichtet. Eine solche quantitative Validierung wird im Ausblick (Kapitel 5.5) als Anschlussperspektive ausgewiesen.

Die Lärchen-Blattentfaltung eignet sich für einen solchen Vergleich besonders gut, weil sie sowohl im SNP-Datensatz als auch im MeteoSchweiz-Netzwerk an mehreren Stationen erfasst wird (Abbildung 18). Die jährlichen Eintrittsdaten beider Datenquellen folgen über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg einem auffallend konsistenten Muster. Jahre mit besonders frühem Austrieb wie 2007 und 2020 zeichnen sich gleichermassen in den SNP-Regionen Fuorn, Mingèr, Cluozza und Lü wie in den MeteoSchweiz-Stationen ab. Auch Jahre mit verzögertem Austrieb wie 2013 sind in beiden Datensätzen als überdurchschnittlich späte Eintrittsdaten erkennbar. Die interannuelle Variabilität der SNP-Reihen verläuft

damit nicht eigenständig oder zufällig, sondern bewegt sich im gleichen Witterungstakt wie die unabhängig erhobenen MeteoSchweiz-Daten.

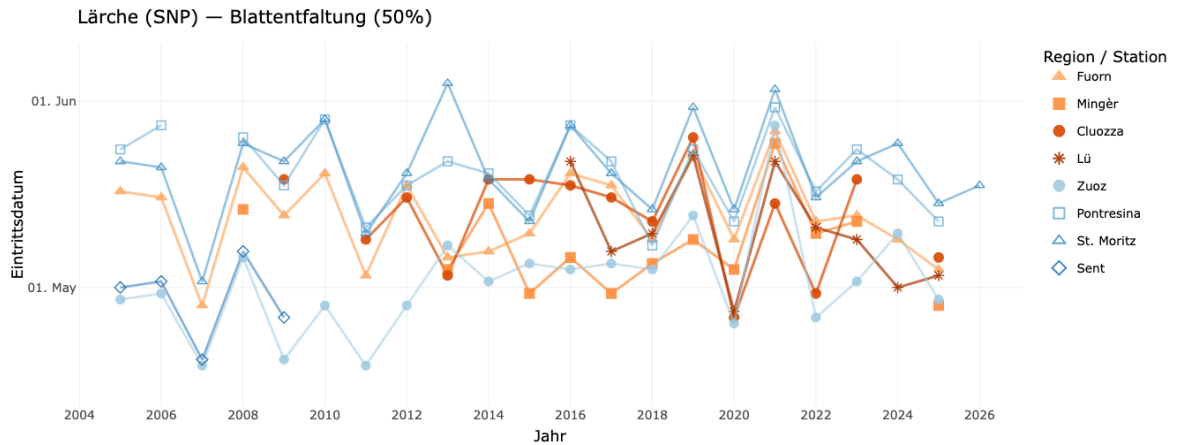


Abbildung 18: Lärchen-Blattentfaltung (50 %) im Vergleich zwischen den SNP-Regionen (Fuorn, Mingèr, Cluozza, Lü) und den vergleichbaren MeteoSchweiz-Stationen Davos, Pontresina, Sent, St. Moritz und Zuoz.

Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei der Vogelbeere-Blattentfaltung ab (Abbildung 19). Auch hier laufen die jährlichen Eintrittsdaten der SNP-Standorte und der MeteoSchweiz-Stationen im Wesentlichen synchron. Markante Witterungsjahre wie 2019 mit relativ spätem Austrieb oder 2021 mit deutlich verzögerten Eintrittsdaten lassen sich in beiden Datensätzen klar wiedererkennen. Höhenbedingte Unterschiede in der absoluten Lage der einzelnen Stationen, die MeteoSchweiz-Stationen Zuoz und Pontresina liegen in der Regel an früher austreibenden Talböden, während die SNP-Standorte häufig in höheren Lagen anzutreffen sind, spiegeln sich erwartungsgemäss in unterschiedlichen mittleren Eintrittsdaten wider, beeinträchtigen aber nicht die Gleichläufigkeit der interannuellen Variation.

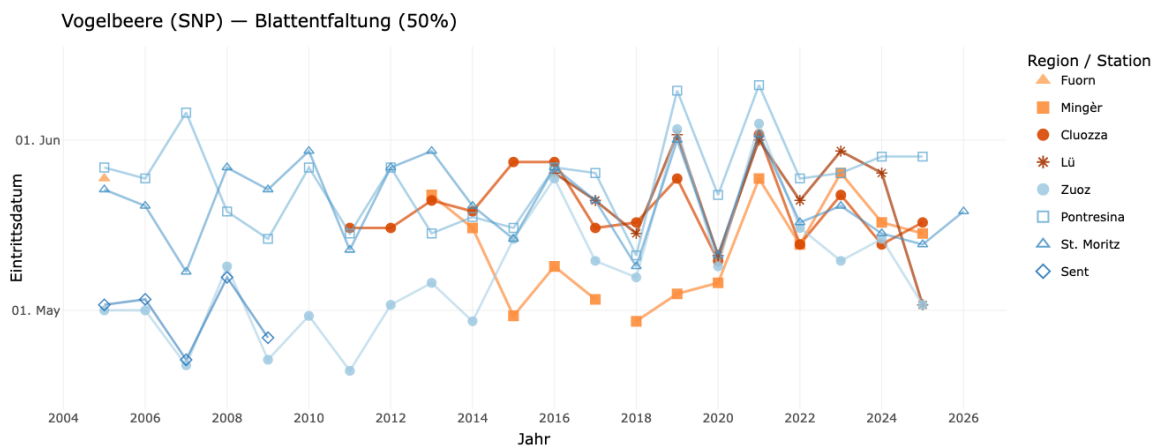


Abbildung 19: Vogelbeere-Blattentfaltung (50 %) im Vergleich zwischen den SNP-Regionen und den vergleichbaren MeteoSchweiz-Stationen.

Aus diesem qualitativen Vergleich lassen sich zwei zentrale Aussagen ableiten. Erstens reagieren die SNP-Beobachtungen offensichtlich auf dieselben grossräumigen Witterungssignale, die auch in den unabhängig erhobenen MeteoSchweiz-Daten sichtbar werden. Ausreisser oder systematische Verzerrungen, die ausschliesslich im SNP-Datensatz auftreten und nicht durch ein vergleichbares Signal in den Referenzdaten gestützt werden, sind in den gut belegten Zeitreihen nicht erkennbar. Zweitens lässt sich aus diesem Befund schliessen, dass die in Kapitel 4.2 diskutierten methodischen Eigenschaften der SNP-Erhebung, insbesondere die historische Beobachterabhängigkeit und die vor 2023 wenig standardisierten Erhebungsroutinen, die phänologische Aussagekraft der Daten nicht in einem Mass beeinträchtigen, das einen Vergleich mit dem nationalen Phänologie-Netzwerk grundsätzlich infrage stellen würde.

Dieser Befund stützt die Interpretation der in Kapitel 4.3 dargestellten Trendresultate. Die im SNP-Datensatz identifizierten phänologischen Verschiebungen sind nicht das Ergebnis einer isolierten und möglicherweise verzerrten Erhebungspraxis, sondern fügen sich in die im Schweizer Mittel beobachteten Tendenzen ein. Damit gewinnt der SNP-Datensatz an überregionaler Anschlussfähigkeit, auch wenn die formale quantitative Gegenüberstellung, wie eingangs erwähnt, einer vertieften Anschlussuntersuchung vorbehalten bleibt. Für das Phänologie-Monitoring im Schweizerischen Nationalpark bedeutet dieses Resultat zugleich, dass die Erhebung trotz ihrer organisationsbedingten Eigenheiten ein konsistentes phänologisches Signal liefert, das den Vergleich mit etablierten Referenzdatensätzen besteht.

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Interpretation der Ergebnisse

5.1.1 Bewertung der Datenqualität

Die in den Kapiteln 4.1 und 4.2 dargestellten Befunde zur Struktur und zu den Eigenschaften des SNP-Phänologie-Datensatzes erlauben eine zusammenfassende Bewertung der Datenqualität, die für die Einordnung der nachfolgenden Tendaussagen ebenso wichtig ist wie für die strategische Weiterentwicklung des Monitorings. Die nachfolgende Bewertung folgt dem Grundsatz, die Eigenschaften des Datensatzes nicht als pauschal positiv oder negativ zu klassifizieren, sondern in ihren jeweiligen Stärken und ihren strukturellen Begrenzungen differenziert zu betrachten.

Eine zentrale Stärke des Datensatzes liegt in seinem Langzeitcharakter. Mit einer maximalen Beobachtungsdauer von 32 Jahren für einzelne Standorte und einem Erhebungsbeginn im Jahr 1994 erfüllt der SNP-Datensatz das in der phänologischen Klimaforschung üblicherweise geforderte Minimum von 20 Jahren deutlich. Die kontinuierliche Erhebung über drei Jahrzehnte hinweg, die sich durch institutionelle Wechsel und veränderte Erhebungspraktiken hindurch erstreckt, ist ein wissenschaftlich wertvolles Gut. Hinzu kommt die räumliche Differenzierung über fünf topografisch unterschiedliche Regionen sowie die thematische Breite mit 19 erfassten Arten und sieben phänologischen Stadien. Diese Kombination aus zeitlicher Tiefe, räumlicher Verteilung und thematischer Vielfalt verleiht dem Datensatz eine grundsätzliche Belastbarkeit, die für viele explorative Analysen mehr als ausreichend ist.

Diesem positiven Befund stehen mehrere strukturelle Heterogenitäten gegenüber, die in der Bewertung mitzudenken sind. Räumlich konzentriert sich die Datendichte auf die Regionen Fuorn und Trupchun, während Cluozza, Mingèr und Lü deutlich weniger belastbare Zeitreihen liefern. Zeitlich zerfällt der Datensatz in fünf identifizierbare Erhebungsphasen, deren Übergänge mit Veränderungen in der Erhebungspraxis, in der personellen Ausstattung und in der methodischen Standardisierung zusammenfallen. Methodisch markiert die Umstellung auf die digitale Datenerfassung im Jahr 2023 einen substanziellen Bruch, der die Vergleichbarkeit von Beobachtungen vor und nach diesem Stichdatum prinzipiell anspruchsvoll macht. Diese Heterogenitäten sind keine Mängel im engeren Sinne, sondern Eigenschaften, die das langjährige Wachstum des Monitorings widerspiegeln und die für jede daraus abgeleitete Aussage methodisch zu berücksichtigen sind.

Besonders bemerkenswert ist, wie viele der im Datensatz erkennbaren Muster sich erst durch das Gespräch mit dem Leiter der Nationalparkwächter inhaltlich erschlossen haben. Die Reduktionsphase zwischen 2004 und 2009, die historisch unterschiedliche Standortpraxis vor etwa 2013, die personellen Hintergründe konkreter Lückenstrukturen sowie das biologische Ereignis einer Lawine, die einen einzelnen Beobachtungsbaum zerstörte, sind

Erkenntnisse, die aus dem Datensatz allein nicht ableitbar gewesen wären. Dies hat eine wichtige methodische Konsequenz: Die Bewertung der Datenqualität eines langjährig gewachsenen Monitoring-Datensatzes ist ohne den Einbezug von Personen mit institutionellem Gedächtnis nur eingeschränkt möglich. Diese Erkenntnis spricht für eine kontinuierliche Dokumentation der organisatorischen Rahmenbedingungen des Monitorings als integraler Bestandteil der Datenerhebung selbst, damit die heute aus dem Gespräch gewonnenen Einsichten in zwanzig oder dreissig Jahren nicht erneut mühsam rekonstruiert werden müssen.

Die Beobachterabhängigkeit der phänologischen Erhebung verdient in einer Datenqualitätsbewertung gesonderte Beachtung. Phänologische Beobachtungen beruhen prinzipiell auf der visuellen Beurteilung von Übergangsstadien und sind damit grundsätzlich subjektiv. Yann Vitasse weist in seiner Stellungnahme darauf hin, dass diese Subjektivität besonders bei Herbstphasen wirksam ist (Vitasse, persönliche Mitteilung), und die Erfahrung des Parkwächerteams bestätigt diese Einschätzung im konkreten Kontext des SNP (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Vor der Einführung der digitalen Erhebungs-App im Jahr 2023 wurde die Erfassung der Phänostadien überwiegend nach dem individuellen Wissensstand der Erhebenden vorgenommen, ohne dass einheitliche Referenzunterlagen durchgängig zur Hand genommen wurden. Mit der App und ihren strukturierten Definitionen ist der Interpretationsspielraum spürbar reduziert worden, was die Datenqualität künftiger Erhebungen substanziell verbessern wird. Für die Bewertung der historischen Daten bedeutet dies, dass eine gewisse Spannweite zwischen Beobachtern als realistischer Bestandteil der Streuung anzunehmen ist, ohne dass diese Spannweite die langfristigen Trends grundsätzlich überdecken würde.

Im Vergleich zu anderen phänologischen Datensätzen ordnet sich der SNP-Datensatz in einer mittleren Position ein. Das MeteoSchweiz-Phänologie-Netzwerk umfasst deutlich mehr Stationen über die gesamte Schweiz und ermöglicht damit grossräumigere Aussagen, deckt aber das spezifische Hochlagegebiet des Schweizerischen Nationalparks nicht in vergleichbarer Dichte ab. Internationale phänologische Langzeitdatensätze, beispielsweise diejenigen des Pan European Phenology Project oder einzelner deutscher und österreichischer Wetterdienste, verfügen teilweise über Zeitreihen von fünfzig Jahren und mehr, sind aber in der Regel nicht auf ein klar umrissenes geografisches Untersuchungsgebiet mit dem Schutzcharakter eines Nationalparks fokussiert. Der SNP-Datensatz besetzt damit eine spezifische Nische: vergleichsweise kurz, regional konzentriert, aber inhaltlich tief und an einen klar definierten geographischen und institutionellen Kontext gebunden.

Für die in dieser Arbeit durchgeführte statistische Trendanalyse ergibt sich aus dieser Bewertung eine pragmatische Konsequenz: Aus dem Gesamtdatensatz von 2'418 Beobachtungen verteilt auf 165 Zeitreihen liessen sich rund 30 Zeitreihen identifizieren, die das in der phänologischen Forschung übliche Vollständigkeits- und Längenkriterium erfüllen und damit eine formale Trendanalyse erlauben. Diese Beschränkung auf einen belastbaren Kern des Datensatzes ist nicht eine Schwäche der Arbeit, sondern Ausdruck eines metho-

disch verantwortungsvollen Umgangs mit den Daten. Sie zeigt aber auch, dass eine flächendeckende Aussage über phänologische Verschiebungen im gesamten Schweizerischen Nationalpark auf der gegenwärtigen Datengrundlage noch nicht möglich ist. Dafür wären entweder eine längere Beobachtungsdauer oder eine ausgewogenere räumliche Verteilung der belastbaren Zeitreihen erforderlich.

Insgesamt lässt sich die Datenqualität des SNP-Phänologie-Datensatzes als für die in dieser Arbeit gestellten Forschungsfragen ausreichend bewerten, gleichzeitig aber als noch nicht ausreichend für eine umfassende quantitative Trendaussage über den gesamten Park einordnen. Die seit 2023 wirksamen strukturellen Verbesserungen sind ein klarer Schritt in Richtung höherer Datenqualität. In Verbindung mit den in Kapitel 5.4 formulierten Handlungsempfehlungen lässt sich erwarten, dass die nächste vergleichbare Auswertung in etwa zehn Jahren auf einer wesentlich belastbareren Datengrundlage aufbauen kann. Die heute identifizierten Eigenschaften des Datensatzes liefern dafür eine differenzierte Ausgangslage, die in dieser Form auch international nicht selbstverständlich ist.

5.1.2 Einordnung der Trendanalyse

Die in Kapitel 4.3 dargelegten quantitativen Ergebnisse erlauben eine inhaltliche Einordnung, die über die rein statistische Beschreibung hinausgeht. Während dort der Schwerpunkt auf der formalen Belastbarkeit der einzelnen Trends lag, geht es im Folgenden um die Frage, was die beobachteten Verschiebungen für das Verständnis der phänologischen Entwicklung im Schweizerischen Nationalpark bedeuten und wie sie sich in das Bild der internationalen phänologischen Klimawandelforschung einfügen.

Der zentrale interpretative Befund der vorliegenden Analyse ist die in den Daten erkennbare Asymmetrie zwischen Frühjahrs- und Herbstphasen. Während die Punktschätzungen der Frühjahrs- und Blütephasen mehrheitlich in Richtung Verfrühung weisen, zeigen die Herbstphasen einen Trend zur Verspätung. Dieses Muster entspricht der international gut dokumentierten Klimawandel-Signatur in phänologischen Datensätzen Mitteleuropas und der Alpen, wie sie unter anderem in den umfassenden Auswertungen von Menzel et al. (2006) und in den Studien des Schweizer Phänologie-Netzwerks beschrieben wird. Inhaltlich bedeutet dies, dass sich die vegetative Aktivitätsperiode der untersuchten Pflanzenarten in beide Richtungen ausdehnt, sie beginnt früher und endet später. Auch wenn die einzelnen Befunde im SNP-Datensatz nach Korrektur für multiples Testen nicht alle statistisch signifikant bleiben, ist die Konsistenz der Richtung über elf der zwölf untersuchten Zeitreihen ein eigenständig interpretierbarer Hinweis darauf, dass die in der internationalen Literatur dokumentierten Effekte auch im SNP-Untersuchungsgebiet wirksam sein dürften.

Die drei statistisch signifikanten Einzeltrends lassen sich vor diesem Hintergrund inhaltlich plausibel einordnen. Die Verfrühung der Erika-Vollblüte in Fuorn um fünf Tage pro Dekade

und die Verfrühung des Huflattich-Blühbeginns in Trupchun um 4.4 Tage pro Dekade betreffen beide Arten, die früh im Jahreszyklus blühen und deren phänologische Entwicklung daher besonders sensitiv auf die Frühjahrstemperaturen reagiert. Der Huflattich gilt als klassische Pionierart, die unmittelbar nach der Schneeschmelze blüht. Eine zeitliche Verschiebung dieser Phase ist daher direkt mit einer veränderten Schneedeckenlogik und mit höheren Frühjahrstemperaturen verknüpft. Auch die Erika reagiert in alpinen Lagen empfindlich auf den Witterungsverlauf der Vorblütezeit. Beide Trends fügen sich somit in ein ökologisch nachvollziehbares Bild ein, auch wenn sie an der Grenze der statistischen Belastbarkeit operieren und unter Vorbehalt der in Kapitel 4.3 diskutierten Mehrfachprüfung interpretiert werden müssen.

Die Verspätung der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn um 3.3 Tage pro Dekade ist der quantitativ und statistisch robusteste Einzelbefund. Inhaltlich entspricht dieses Resultat einer länger andauernden vegetativen Aktivität der Lärche im Spätsommer und Frühherbst. Eine mögliche Erklärung liegt in den in den letzten Jahrzehnten dokumentierten überdurchschnittlich warmen Septembren und Oktobren im Alpenraum, die den physiologischen Übergang von der grünen zur verfärbten Blattphase verzögern. Die in der Detailanalyse erwähnten Anfangsjahre 1994 bis 1996 mit auffällig frühen Eintrittsdaten relativieren diesen Befund methodisch, sind aber inhaltlich nicht ohne Plausibilität: Ein methodischer Beobachtungswechsel zu Beginn des Monitorings ist genauso denkbar wie eine reale klimatische Anomalie dieser Jahre. Selbst unter konservativer Annahme einer Anfangsinhomogenität bleibt die Tendenz zur späteren Blattverfärbung in der Zeitreihe nachvollziehbar erhalten.

Besondere interpretative Aufmerksamkeit verdient das Ausbleiben eines signifikanten Trends bei der Lärchen-Blattentfaltung in Fuorn. Diese Zeitreihe ist die längste und vollständigste des gesamten Datensatzes, und aus der Klimawandel-Literatur wäre eine Verfrühung in der Grössenordnung von zwei bis vier Tagen pro Dekade zu erwarten gewesen. Der gemessene Wert von 0.5 Tagen pro Dekade liegt deutlich darunter und ist statistisch nicht von null unterscheidbar. Mehrere Erklärungsansätze sind denkbar. Eine erste, in der alpinen Phänologie gut etablierte Hypothese verweist auf die Schneeschmelze als limitierenden Faktor: In hochgelegenen Standorten kann eine Pflanze auch bei deutlich gestiegenen Lufttemperaturen erst dann austreiben, wenn die Schneedecke abgeschmolzen ist und die Bodentemperatur einen kritischen Schwellenwert überschreitet. Eine zweite Hypothese, die ebenfalls in der Vitasse-Stellungnahme (Vitasse, persönliche Mitteilung) anklingt, betrifft die photoperiodische Steuerung des Austriebs. Bei Arten mit starker Tageslichtabhängigkeit, zu denen die Lärche zählt, bleibt der Eintritt der Blattentfaltung relativ stabil, auch wenn sich die Temperaturbedingungen verändern. Eine dritte Erklärung ergibt sich aus dem GAM-Verlauf der Zeitreihe selbst, der erst ab den späten 2010er Jahren eine leichte Verfrühung andeutet; möglicherweise befindet sich die Lärche im untersuchten Höhenbereich erst seit kurzer Zeit in einer Phase erkennbarer Verschiebung, die in einer längeren Zeitreihe in zehn oder zwanzig Jahren statistisch deutlich werden könnte.

Der einzige direkte regionale Vergleich, der in der vorliegenden Datenbasis möglich ist, die Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn und Trupchun, stützt die Interpretation eines real wirksamen Trends. Beide Regionen weisen gleichgerichtete Verschiebungen auf, und die Konfidenzintervalle ihrer Sen's-Slope-Schätzungen überlappen substantiell. Inhaltlich ist diese Übereinstimmung ein wichtiges Indiz dafür, dass die in Fuorn beobachtete Verspätung nicht auf lokale Standortbedingungen oder einzelne Beobachtungsmuster zurückgeht, sondern Ausdruck eines übergeordneten Klimasignals ist. Die fehlende Signifikanz in Trupchun ist hingegen vorwiegend stichprobenbedingt und nicht inhaltlich gegen den Trend zu interpretieren. Diese Lesart einer regionalen Konsistenz erhöht die Belastbarkeit der inhaltlichen Aussage, ohne über die statistischen Vorbehalte hinwegzutäuschen.

Für das Verständnis der Phänologie im Schweizerischen Nationalpark ergibt sich aus diesen Befunden ein differenziertes Bild. Die Vegetationsperiode der untersuchten Pflanzenarten dehnt sich tendenziell aus, wobei die Verfrühung früher Blütenphasen und die Verspätung der herbstlichen Blattverfärbung gemeinsam auf eine längere physiologische Aktivität hindeuten. Diese Verschiebungen sind nicht nur botanisch interessant, sondern haben mittel- und langfristig auch ökologische Implikationen, etwa für die Wechselwirkung zwischen Pflanzen und ihren bestäubenden Insekten, für die Verfügbarkeit von Nahrungsressourcen für Wildtiere im Spätherbst oder für die Konkurrenzverhältnisse zwischen alpinen und subalpinen Arten an den Höhengradienten des Parks. Eine vertiefte Untersuchung dieser Wechselwirkungen liegt ausserhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit, ist aber als logische Anschlussperspektive im Ausblick adressiert.

Methodisch sind die hier dargestellten Interpretationen unter den in Kapitel 4.3 ausgeführten Vorbehalten zu verstehen: räumliche Konzentration auf zwei Regionen, knappe Stichprobengrösse, Wegfall der formalen Signifikanz nach Korrektur für multiples Testen sowie potenzielle Anfangsinhomogenitäten in einzelnen Zeitreihen. Diese methodischen Limitationen relativieren die Aussagekraft, schwächen aber nicht die inhaltliche Plausibilität des Gesamtbefunds, der mit den international etablierten Mustern phänologischer Klimasignale im Alpenraum gut übereinstimmt. Die Trendanalyse ist damit weniger als isoliert verifizierter Beleg eines Klimaeffekts im SNP zu verstehen, sondern als regionale Bestätigung eines übergreifenden, überregional dokumentierten Musters — eine Einordnung, die der Datenbasis ebenso gerecht wird wie der inhaltlichen Relevanz des Befunds für das Nationalpark-Monitoring.

5.2 Nutzen der Shiny-App für den Nationalpark

Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelte Shiny-App stellt einen zentralen Bestandteil der Projektergebnisse dar. Sie überführt den heterogenen Phänologie-Datensatz des Schweizerischen Nationalparks zusammen mit den korrespondierenden Phänologie- und Klimadaten von MeteoSchweiz in eine interaktive Analyseumgebung, die nicht nur den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Auswertungen als Werkzeug diente, sondern auch

nach Projektabschluss als laufende Plattform für die Nationalpark-Verantwortlichen verfügbar bleiben soll.

Den funktionalen Kern bildet eine Gliederung in neun thematische Tabs, die unterschiedliche analytische Perspektiven auf den Datensatz eröffnen. Die Übersichts-, Karten- und Saisonprofil-Tabs sind primär explorativer Natur und ermöglichen einen schnellen Zugang zur räumlichen Verteilung der Erhebungen, zu den Eintrittsdaten einzelner Arten und Phasen sowie zur Saisonalität der phänologischen Stadien. Die Trend- und Vergleichs-Tabs bieten quantitative Auswertungsfunktionen mit einer integrierten linearen Regression, die Steigung pro Jahr und pro Dekade, Bestimmtheitsmass und p-Wert direkt darstellt. Der Höhenprofil-Tab erlaubt es, die topographische Komponente der Phänologie sichtbar zu machen, was in einem alpinen Untersuchungsgebiet ein zentrales Element jeder Interpretation darstellt. Der SNP-Boxplots- und der Datenlücken-Tab schliesslich dienen der Qualitätsprüfung, indem sie Verteilungsmuster und strukturelle Lücken im Datenbestand unmittelbar sichtbar machen, die für jede künftige Trendanalyse von Bedeutung sind.

Der Nutzen der App lässt sich aus drei Anwenderperspektiven heraus beschreiben. Für das wissenschaftliche Personal des Schweizerischen Nationalparks, namentlich Sam Cruickshank, sowie für die Forschungskommission unter der Leitung von Stefanie Gubler, stellt die App ein Werkzeug zur niederschweligen Sichtung des bestehenden Datenbestandes dar. Auswertungen, die zuvor nur über manuelle Datenaufbereitung in R oder Excel möglich waren, lassen sich nun in Sekunden direkt über die Browseroberfläche durchführen. Für externe Wissenschaftler, die sich für den SNP-Datensatz interessieren, dient die App zugleich als Visitenkarte des Monitorings: Sie zeigt auf einen Blick, welche Arten und Standorte über welche Zeiträume verfügbar sind und welche Datenqualität zu erwarten ist. Für die Parkwächter unter der Leitung von Fadri Bott schliesslich kann die App als kontextueller Rahmen für die laufende Erhebung dienen, indem aktuelle Beobachtungen unmittelbar in den Zusammenhang historischer Entwicklungen gestellt werden können.

Ein weiterer Mehrwert liegt in der Verbindung der SNP-Daten mit den MeteoSchweiz-Phänologie- und Klimadaten in einer einzigen Plattform. Diese Integration ist in der bisherigen Datenpraxis des SNP in dieser Form nicht vorhanden gewesen — die beiden Datensätze wurden in der Regel separat betrachtet. Durch den parallelen Zugang innerhalb der App lassen sich erstmals Plausibilitätsprüfungen über vergleichbare Arten und Stadien hinweg unmittelbar durchführen, was sowohl für die Qualitätsbeurteilung des eigenen Datensatzes als auch für die kontextuelle Einbettung in das nationale Phänologie-Netzwerk von Bedeutung ist.

Die Rückmeldungen aus der konzeptionellen Begleitung waren während der Entwicklung durchgehend positiv. Sowohl Sam Cruickshank als auch Stefanie Gubler haben sich in mehreren Iterationen der App zustimmend zu Funktionsumfang und Bedienbarkeit geäussert (Cruickshank, persönliche Mitteilung; Gubler, persönliche Mitteilung). Alle in der initia-

len Anforderungsphase formulierten Vorgaben, insbesondere die Erfassbarkeit der fünf Untersuchungsregionen, die Integration der MeteoSchweiz-Referenzdaten und der gleichzeitige Zugang zu allen sieben phänologischen Stadien, konnten umgesetzt werden.

Trotz dieser positiven Bilanz ist eine kritische Reflexion auf mehreren Ebenen angebracht. Eine erste Einschränkung betrifft die in der App integrierte Statistik. Die Trendanalyse beschränkt sich auf eine lineare Regression mit klassischer Steigungsschätzung und p-Wert. Die in Kapitel 4.3 als methodisch belastbarer eingeschätzten Verfahren, Mann-Kendall-Test und Sen's Slope, sind in der App nicht integriert. Dies ist eine bewusste Entscheidung, da diese Verfahren in der Anwender-Kommunikation komplexer zu vermitteln sind und in einer interaktiven Visualisierung schnell zu Fehlinterpretationen führen können. Die Konsequenz ist jedoch, dass die App die quantitativ belastbareren Aussagen nicht direkt darstellen kann. Sie verbleibt damit primär ein exploratives Werkzeug und kein abschliessendes Trend-Analyse-Instrument. Wer aus der App eine formale Tendaussage ableiten möchte, sollte sich der methodischen Grenzen der dort integrierten linearen Regression bewusst sein.

Eine zweite Einschränkung liegt in der technischen Abhängigkeit der App vom kontinuierlichen Betrieb der zugrundeliegenden Schnittstellen. Die MeteoSchweiz-Daten werden über die STAC-API bezogen und in einem Pre-Build-Snapshot abgelegt, der periodisch aktualisiert werden muss. Verändert sich die Struktur dieser API in Zukunft, wird ein Eingriff in die Build-Skripte notwendig. Ebenfalls anfällig ist der File-Upload-Mechanismus für die SNP-Daten: Sollte sich die Spaltenstruktur der CSV-Exporte ändern, etwa durch eine Erweiterung des digitalen Erhebungssystems, müssten der Loader und mehrere abhängige Funktionen angepasst werden. Diese Wartungsabhängigkeit ist die zentrale offene Frage für den langfristigen Nutzen der App.

Eine dritte Einschränkung betrifft die Bedienbarkeit für unterschiedliche Nutzerprofile. Während die App für technisch versierte Anwenderinnen und Anwender intuitiv zu bedienen ist, ergeben sich für gänzlich ungeschulte Nutzer Hürden bei der Interpretation der dargestellten Statistiken. Eine ergänzende Dokumentation in Form eines kurzen Benutzerhandbuchs oder eines integrierten Hilfetexts pro Tab wäre hier sinnvoll, konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr in vollem Umfang ausgearbeitet werden. Hinzu kommt, dass die App primär für Desktop-Bildschirme optimiert ist. Eine Nutzung auf Tablets oder Smartphones, etwa durch Parkwächter im Feld, wäre nur eingeschränkt möglich und stellt damit einen möglichen Ansatzpunkt für eine künftige Erweiterung dar.

Der Aspekt der Nachhaltigkeit über den Projektabschluss hinaus verdient eine besondere Erwähnung. Die App wird nach Abschluss dieser Arbeit über eine vom Nationalpark betriebene Hosting-Lösung verfügbar gemacht, womit die unmittelbare Verfügbarkeit für die Stakeholder gesichert ist. Die längerfristige Pflege, also die Aktualisierung der R-Paketabhängigkeiten, das Einspielen neuer Datenexporte und die Anpassung an mögliche Veränderungen in den Datenstrukturen, ist hingegen nicht institutionell verankert und müsste im

Rahmen einer Folgeaufgabe oder durch eine wissenschaftliche Hilfskraft sichergestellt werden. Ohne eine solche Kontinuität besteht das Risiko, dass die App über die Jahre an Aktualität verliert und ihr Nutzen damit erodieren würde. Dieses Risiko ist nicht akademischer Natur, sondern eine konkrete Herausforderung, die in der Übergabe der App vom Projekt an den Nationalpark explizit adressiert werden sollte.

Insgesamt stellt die App einen substanziellen Mehrwert für den Schweizerischen Nationalpark dar, indem sie einen über Jahrzehnte aufgebauten, aber bislang nur schwer zugänglichen Datenschatz in eine bedienbare Form überführt. Sie bietet einen niederschweligen Zugang zu komplexen Daten, fördert eine breitere Auseinandersetzung mit dem Monitoring und schafft eine Grundlage für künftige Forschungsfragen, die ohne ein solches Werkzeug deutlich aufwendiger zu beantworten wären. Gleichzeitig ist sie kein Endpunkt, sondern ein Anfangspunkt, ein Werkzeug, das nur dann seinen Wert behält, wenn es kontinuierlich gepflegt, weiterentwickelt und durch zusätzliche Funktionen ergänzt wird. Die Verantwortung für diese Pflege liegt nach Projektabschluss beim Nationalpark, und ihre konkrete Ausgestaltung wird wesentlich darüber entscheiden, ob die App ihr Potenzial mittel- und langfristig entfalten kann.

5.3 Limitationen der Arbeit

Eine offene Auseinandersetzung mit den Limitationen der vorliegenden Arbeit ist eine Voraussetzung, um die Tragweite der erzielten Ergebnisse korrekt einordnen zu können. Die nachfolgend benannten Einschränkungen sind nicht als Mängel im engeren Sinne zu verstehen, sondern als Eigenschaften der Datenbasis, der gewählten Methodik und des Projektrahmens, die bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden müssen. Sie werden im Folgenden in vier thematischen Gruppen dargestellt: Limitationen der Datenbasis, der Methodik, des konzeptionellen Zuschnitts und des Projektrahmens.

Eine zentrale Limitation der Datenbasis liegt in der räumlichen Verteilung der für eine formale Trendanalyse belastbaren Zeitreihen. Wie in Kapitel 4.3 dargelegt, stammen neun der zwölf untersuchten Zeitreihen aus der Region Fuorn und drei aus Trupchun, während Cluozza, Mingèr und Lü aufgrund unzureichender Datenlage nicht in die formale Trendanalyse einbezogen werden konnten. Eine Trendaussage für „den Schweizerischen Nationalpark“ in seiner Gesamtheit ist auf dieser Datengrundlage nicht möglich. Hinzu kommt, dass die maximale Beobachtungsdauer mit 32 Jahren zwar das von Yann Vitasse empfohlene Minimum von 20 Jahren überschreitet, im Vergleich zur internationalen phänologischen Forschungspraxis aber im unteren Bereich liegt. Mehrere Studien arbeiten mit Zeitreihen von 50 und mehr Jahren, was eine deutlich höhere statistische Belastbarkeit erlaubt. Die Reduktionsphase zwischen 2004 und 2009 verstärkt diese Limitation, indem sie für 25 Zeitreihen eine zusammenhängende Unterbrechung erzeugt, die nur teilweise durch nachfolgende Erhebungen kompensiert werden konnte.

Eine zweite Limitation betrifft die beobachtertechnischen Eigenschaften des Datensatzes. Phänologische Erhebungen sind grundsätzlich beobachterabhängig, da sie auf der visuellen Beurteilung von Übergangsstadien beruhen. Vitasse weist explizit darauf hin, dass Herbstphasen subjektiver und damit fehleranfälliger erfasst werden als Frühjahrsphasen (Vitasse, persönliche Mitteilung). Eine systematische Quantifizierung der Beobachterunsicherheit ist im vorliegenden Datensatz nicht möglich, da die Beobachterzuteilung historisch nicht durchgängig dokumentiert wurde. Ergänzend dazu ist die Information zu witterungsbedingten Anomalien erst seit der Umstellung auf die digitale Datenerfassung im Jahr 2023 systematisch verfügbar. Für die rund drei Jahrzehnte davor lassen sich auffällige Eintrittsdaten daher nicht von vornherein als reales biologisches Ereignis oder als methodische Abweichung einordnen. Der methodische Übergang von der analogen zur digitalen Erfassung im Jahr 2023 stellt zudem einen strukturellen Bruch dar, dessen langfristige Konsequenzen für die Vergleichbarkeit der Zeitreihen erst in den kommenden Jahren beurteilbar werden.

Statistisch-methodische Einschränkungen ergeben sich aus mehreren Quellen. Die formale Trendanalyse umfasst zwölf parallele Mann-Kendall-Tests, deren Signifikanzaussagen bei einer Korrektur für multiples Testen nicht mehr aufrechterhalten werden können. Eine ausführliche Diskussion dieses Punktes findet sich in Kapitel 4.3. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Modellentwicklung der Versuch unternommen, die hierarchische Struktur des Datensatzes, Beobachtungen in Standorten innerhalb von Regionen, mit einem gemischten additiven Modell (GAMM) abzubilden. Dieser Ansatz wurde nach Auswertung der Residuen wieder verworfen, da die Random Effects keine substantielle Verbesserung der Modellgüte brachten. Inhaltlich ist diese Entscheidung gut begründet, dennoch bleibt offen, ob ein anders parametrisiertes hierarchisches Modell oder ein alternativer Ansatz wie eine generalisierte Kleinst-Quadrat-Schätzung mit räumlicher Korrelationsstruktur zusätzliche Erkenntnisse hätte liefern können. Ebenso wurde auf eine systematische Bruchpunkt-Detektion verzichtet, obwohl die Daten der Lärchen-Blattverfärbung in Fuorn der Jahre 1994 bis 1996 deutliche Hinweise auf eine mögliche Anfangsinhomogenität liefern. Eine entsprechende Analyse hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt, stellt aber einen unbestreitbar relevanten Ansatzpunkt für eine vertiefte methodische Untersuchung dar.

Konzeptionell ist die Arbeit auf eine retrospektive Trendcharakterisierung ausgerichtet und liefert keine prognostische Modellierung. Wie in Kapitel 4.3 erläutert, wäre eine prognostische Aussage nur auf Basis kausaler Klimatreiber methodisch tragfähig. Die hierfür etablierten Verfahren, das Growing-Degree-Day-Modell (GDD) und das photoperiode-erweiterte M1-Modell, wurden bewusst nicht angewendet, weil ihre Implementierung eine eigene methodische Tiefe erfordert hätte. Ein direkter quantitativer Vergleich zwischen SNP-Stationen und MeteoSchweiz-Stationen auf Stations- oder Höhenklassen-Ebene wurde innerhalb der App ermöglicht, im Rahmen der Trendanalyse aber nur qualitativ durchgeführt. Eine formale statistische Gegenüberstellung, beispielsweise über parallele Mann-Kendall-

Tests für vergleichbare Arten in beiden Datensätzen, wäre methodisch reizvoll, war innerhalb des Bachelorrahmens jedoch nicht umsetzbar. Auch die Beschränkung der Analyse auf die im SNP-Datensatz erfassten 19 Arten und sieben Stadien ist eine konzeptionelle Vorentscheidung. Eine Erweiterung auf zusätzliche Indikatoren wie Tierwanderungen oder Vogelphänologie wäre denkbar gewesen, hätte aber die Datenakquisition wesentlich verändert.

Die Limitationen der entwickelten Shiny-App wurden bereits in Kapitel 5.2 ausführlich diskutiert. Sie betreffen insbesondere die ausschliessliche Integration der linearen Regression als statistisches Verfahren in der App, die technische Wartungsabhängigkeit von externen Schnittstellen sowie die noch nicht institutionell verankerte Pflege nach Projektabschluss. Diese Aspekte werden hier nicht erneut entfaltet, sind aber für die Gesamteinschätzung der Arbeit ebenso relevant wie die übrigen Limitationen.

Eine letzte Gruppe von Einschränkungen ergibt sich aus dem Projektrahmen einer Bachelorarbeit. Der gegebene Zeitrahmen begrenzt die Tiefe der einzelnen Analyseschritte. Ebenso begrenzt er die Möglichkeit, einzelne Verfahren über mehrere Iterationen hinweg zu vergleichen. Die methodische Iteration vom linearen Modell über das GAM zum GAMM und zurück zum GAM, die in Kapitel 3.6 dokumentiert ist, ist Ausdruck dieses Lernprozesses. Sie illustriert zugleich, dass methodische Entscheidungen in einer Bachelorarbeit pragmatisch zu treffen sind und nicht alle theoretisch interessanten Optionen ausgeschöpft werden können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Limitationen die Aussagekraft der Arbeit nicht aufheben, wohl aber präzisieren. Die formulierten Trendaussagen sind als Hinweise auf phänologische Entwicklungen in einzelnen, gut belegten Standortreihen zu verstehen, nicht als abschliessende quantitative Aussagen für den gesamten Schweizerischen Nationalpark. Die entwickelte Shiny-App ist ein leistungsfähiges exploratives Werkzeug, ersetzt aber keine vertiefte statistische Auswertung. Die kritische Reflexion der eigenen methodischen Wahlentscheidungen und der vorliegenden Datenbasis stellt damit nicht eine nachträgliche Relativierung der Ergebnisse dar, sondern einen integralen Bestandteil der wissenschaftlichen Aussage selbst. Sie bildet die Grundlage für die im nachfolgenden Kapitel formulierten Handlungsempfehlungen.

5.4 Handlungsempfehlungen

Aus der vorliegenden Arbeit lassen sich mehrere konkrete Handlungsempfehlungen ableiten, die sich an unterschiedliche Adressatengruppen richten. Operative Empfehlungen mit unmittelbarem Bezug zur Erhebungspraxis adressieren in erster Linie die Verwaltung des Schweizerischen Nationalparks sowie die Projektverantwortlichen vor Ort. Strategische und methodische Empfehlungen richten sich primär an die wissenschaftliche Begleitung des Monitorings. Die folgenden Empfehlungen sind in dieser Reihenfolge angeordnet: zunächst die übergeordnete Empfehlung zur Fortführung der Erhebung, anschliessend operative

Empfehlungen zur Erhebungspraxis, zu Organisation und Werkzeugen, sowie abschliessend methodische Empfehlungen zur künftigen wissenschaftlichen Nutzung des Datensatzes.

Die zentrale strategische Empfehlung dieser Arbeit lautet, das phänologische Monitoring im Schweizerischen Nationalpark fortzuführen. Der in Kapitel 4.4 vorgelegte Vergleich mit den vergleichbaren MeteoSchweiz-Stationen zeigt, dass die SNP-Beobachtungen trotz der historischen Eigenheiten der Erhebung in einem phänologisch konsistenten Verhältnis zu den unabhängig erhobenen Referenzdaten stehen. Gleichzeitig deckt der SNP-Datensatz Aspekte ab, die das schweizweite Phänologie-Netzwerk in dieser Form nicht leistet: die phänologische Beobachtung in einem grossräumig geschützten, anthropogen wenig beeinflussten Gebiet, die Erfassung in alpinen Höhenlagen sowie die Berücksichtigung von Arten und Stadien, die für die Biodiversitäts- und Naturschutzforschung von besonderem Interesse sind. Die SNP-Erhebung ist damit kein Doppelaufwand zu MeteoSchweiz, sondern eine komplementäre und eigenständig wertvolle Datenquelle, deren Fortführung sich fachlich rechtfertigen lässt.

Eine erste operative Empfehlung betrifft den Umfang der Erhebung. Wie sich aus der explorativen Analyse (Kapitel 4.1) und aus dem Gespräch mit dem Leiter der Nationalparkwächter (Kapitel 4.2) ergibt, sind die zur Verfügung stehenden personellen Ressourcen auf eine vollständige Erfassung sämtlicher Arten und Stadien an allen Standorten nicht ausgerichtet. Statt diese strukturelle Realität als Mangel zu betrachten, kann sie als Ausgangspunkt für eine bewusste Fokussierung dienen. Empfohlen wird eine Reduktion der erhobenen Arten und Stadien auf ein definiertes Set besonders aussagekräftiger phänologischer Indikatoren, die jeweils stellvertretend für den Frühling, den Sommer und den Herbst stehen und in allen fünf Untersuchungsregionen erfasst werden. Die Auswahl dieser Indikatoren sollte unter Beizug einer phänologischen Fachperson erfolgen, um sicherzustellen, dass die verbleibenden Arten als verlässliche Indikatoren für die saisonalen Entwicklungen im Nationalpark dienen können. Eine schlankere, aber konsistentere Erhebung verspricht über die kommenden Jahrzehnte eine substanziell höhere wissenschaftliche Aussagekraft als eine breite, aber lückenhafte Erfassung.

Eine zweite operative Empfehlung betrifft die institutionelle Verankerung der Projektverantwortung. Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, war die Projektverantwortung für das Phänologie-Monitoring historisch nicht durchgängig einer einzelnen Stelle zugewiesen, was sich in der Reduktionsphase zwischen 2004 und 2009 besonders deutlich gezeigt hat. Der Nationalpark hat mit der Einsetzung einer Verbindungsperson zwischen Forschung und Parkwächter-Team bereits einen wichtigen Schritt unternommen. Empfohlen wird, diese Funktion gezielt zu stärken, indem sie formal als Projektleitung für das Phänologie-Monitoring eingesetzt und mit klar definierten Aufgaben in den Bereichen Koordination, Datenqualität, jährlicher Berichterstattung und institutioneller Kontinuität ausgestattet wird. Eine solche dedizierte Verantwortung würde nicht nur die Konsistenz der Erhebung absichern, sondern auch sicherstellen, dass das Programm bei personellen Wechsels nicht erneut in Phasen reduzierter Steuerung gerät.

Eng damit verbunden ist die Empfehlung, die Kommunikation des Forschungsziels gegenüber den Erhebenden zu intensivieren und eine regelmässige Rückmeldekultur zu etablieren. Aus dem Gespräch mit dem Leiter der Nationalparkwächter geht hervor, dass die übergeordnete wissenschaftliche Bedeutung der Erhebung den Beobachtern im Feld nicht immer transparent war (Bott, persönliche Mitteilung, Juni 2026). Eine jährliche kompakte Rückmeldung an das Parkwächterteam mit Hinweisen darauf, was aus den erhobenen Daten wissenschaftlich gewonnen werden konnte, würde sowohl die Motivation als auch die Erhebungssorgfalt stärken. Diese Empfehlung richtet sich gleichermassen an die SNP-Verwaltung und an die wissenschaftliche Begleitung, die einen solchen Austausch gemeinsam organisieren können.

Auf technischer Ebene bietet die seit 2023 eingesetzte digitale Erhebungs-App des Nationalparks erhebliches Weiterentwicklungspotenzial. Empfohlen wird die Integration einer automatisierten Erinnerung an die zu erwartenden Phänostadium-Eintrittsdaten, basierend auf den standortspezifischen Vorjahres-Eintrittsdaten. Eine solche Funktion würde die Erhebenden gezielt auf den anstehenden Beobachtungszeitraum hinweisen und das Risiko verpasster Phänostadien reduzieren. Ebenfalls technisch zu adressieren ist die Pflege der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Shiny-App: Ihre Wartung über die kommenden Jahre, insbesondere die Aktualisierung der R-Paketabhängigkeiten und die Anpassung an mögliche Veränderungen der MeteoSchweiz-Schnittstellen, sollte institutionell verankert werden, damit die App ihren Mehrwert über den Projektabschluss hinaus tatsächlich entfalten kann. Eine Erweiterung um eine für mobile Endgeräte optimierte Ansicht würde es den Parkwächtern erlauben, die App auch im Gelände als Referenzwerkzeug zu nutzen.

Im Bereich der methodischen Weiterentwicklung lassen sich drei konkrete Anschlusspunkte benennen, die in erster Linie die wissenschaftliche Begleitung adressieren. Erstens wäre eine systematische Bruchpunkt-Detektion für die langen Zeitreihen, wie sie nach den Verfahren von Auchmann et al. (2018) beschrieben wird, geeignet, um die in dieser Arbeit identifizierten Inhomogenitäten der Anfangsjahre, insbesondere die augenfälligen frühen Beobachtungen der Lärchen-Blattverfärbung 1994–1996 in Fuorn, formal abzusichern oder zu relativieren. Zweitens wäre eine formale, statistische Gegenüberstellung der SNP-Trends mit denjenigen vergleichbarer MeteoSchweiz-Stationen, etwa über parallel berechnete Mann-Kendall-Tests und Sen's-Slope-Schätzungen, eine logische Vertiefung des in Kapitel 4.4 angelegten qualitativen Vergleichs. Drittens würde eine Erweiterung der Trendanalyse um kausale Klimavariablen wie Temperatur, Niederschlag oder Photoperiode den retrospektiven Charakter der bisherigen Analyse überwinden und prognostische Aussagen ermöglichen, wofür sich insbesondere Growing-Degree-Day-Modelle oder das M1-Modell anbieten würden.

Die hier formulierten Empfehlungen verstehen sich nicht als abschliessender Katalog, sondern als ein Vorschlag für die nächsten Schritte in der Weiterentwicklung des phänologischen Monitorings im Schweizerischen Nationalpark. Werden sie schrittweise umgesetzt, kann erwartet werden, dass die Datengrundlage in zehn bis fünfzehn Jahren eine deutlich höhere wissenschaftliche Aussagekraft erreicht als heute und eine vergleichbare zweite

Trendanalyse auf einer wesentlich belastbareren Basis aufbauen kann. Die in Kapitel 5.5 skizzierten Ausblicke bauen direkt auf diesen Handlungsempfehlungen auf und zeigen, welche wissenschaftlichen Perspektiven sich aus einer konsequent weiterentwickelten Datenbasis ergeben.

5.5 Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt eine erste systematische Aufbereitung und Analyse des phänologischen Datensatzes des Schweizerischen Nationalparks dar. Sie öffnet damit zugleich eine Reihe von Anschlussfragen, die im Rahmen einer Bachelorarbeit nicht umfassend behandelt werden konnten, aber für die mittel- und langfristige wissenschaftliche Nutzung des Datensatzes von Bedeutung sind. Der folgende Ausblick skizziert mögliche Weiterentwicklungen entlang von vier Dimensionen: methodische Vertiefung, Erweiterung der Datengrundlage, Integration mit benachbarten Forschungsfeldern sowie strategische Weiterentwicklung der entwickelten Plattform.

Auf methodischer Ebene bieten sich mehrere konkrete Anschlusspunkte an. Eine prognostische Modellierung der phänologischen Eintrittsdaten würde den retrospektiven Charakter der vorliegenden Trendanalyse überwinden. Dafür eignen sich insbesondere das in der phänologischen Klimaforschung etablierte Growing-Degree-Day-Modell sowie das photoperiode-erweiterte M1-Modell, dessen Anwendung Yann Vitasse in seiner Stellungnahme explizit als vielversprechend bezeichnet (Vitasse, persönliche Mitteilung). Ein systematischer Vergleich beider Modelle anhand der gut belegten SNP-Zeitreihen wäre methodisch wie inhaltlich reizvoll und könnte Hinweise darauf liefern, ob die Photoperiode in einem alpinen Untersuchungsgebiet eine erkennbare zusätzliche Erklärungskraft besitzt. Eng damit verbunden ist die Frage nach einer systematischen Bruchpunkt-Detektion in den langen Zeitreihen, wie sie etwa nach den Verfahren von Auchmann et al. (2018) für phänologische und klimatologische Datensätze beschrieben wird. Eine solche Analyse könnte insbesondere die in der vorliegenden Arbeit identifizierten Inhomogenitäten der Anfangsjahre formal absichern und damit die Belastbarkeit der Trendaussagen erhöhen.

Auf der Ebene der hierarchischen Modellierung lohnt sich ein erneuter Versuch mit einer veränderten Parametrisierung. Die im Rahmen dieser Arbeit verworfene GAMM-Modellierung könnte beispielsweise mit Standort und Region als verschachtelte Random Effects oder mit einer expliziten räumlichen Korrelationsstruktur über die geographischen Koordinaten erneut geprüft werden. Voraussetzung dafür wäre eine Erweiterung der Datenbasis in den derzeit unterrepräsentierten Regionen Cluozza, Mingèr und Lü, sodass eine ausgewogenere räumliche Stichprobe vorliegt. Eine solche Erweiterung der hierarchischen Modellierung könnte zusätzlich von der Integration kausaler Klimavariablen profitieren, indem nicht das Kalenderjahr, sondern Temperatur- und Niederschlagskennzahlen aus den nahegelegenen MeteoSchweiz-Stationen als Prädiktoren herangezogen werden. Damit würde

sich die Trendanalyse von einer rein deskriptiven Beschreibung zu einer ursachenorientierten Modellierung weiterentwickeln, was eine wesentlich tiefergehende Interpretation der beobachteten Verschiebungen erlauben würde.

Eine zweite Dimension möglicher Weiterentwicklung betrifft die Datengrundlage selbst. Die Konsolidierung des Datenbestandes in den Regionen Cluozza, Mingèr und Lü wäre nicht nur statistisch wertvoll, sondern auch inhaltlich gerechtfertigt, weil diese Regionen unterschiedliche kleinklimatische und topographische Bedingungen abdecken, die in einer auf wenige Standorte konzentrierten Analyse nicht abgebildet werden. Mit der Umstellung auf die digitale Datenerfassung im Jahr 2023 sind zudem strukturelle Voraussetzungen geschaffen worden, die eine konsequente Dokumentation von witterungsbedingten Anomalien, Beobachterzuteilungen und Erhebungsintervallen erlauben. Eine systematische Nutzung dieser Funktionen über die kommenden Jahre würde die Qualität der Daten substantiell erhöhen und in einer zweiten Trendanalyse in etwa zehn bis fünfzehn Jahren eine deutlich belastbarere Datengrundlage zur Verfügung stellen.

Eine dritte Dimension liegt im Vergleich mit benachbarten Datensätzen und Forschungsfeldern. Der direkte quantitative Vergleich zwischen den SNP-Zeitreihen und den entsprechenden MeteoSchweiz-Stationen wurde in der vorliegenden Arbeit qualitativ angedeutet, aber nicht formal durchgeführt. Eine solche vergleichende Analyse — etwa über parallel berechnete Mann-Kendall-Tests und Sen's-Slope-Schätzungen für gleiche Arten in vergleichbaren Höhenlagen — könnte aufzeigen, in welchem Mass die SNP-Trends mit den im Schweizer Mittel beobachteten Tendenzen übereinstimmen oder von ihnen abweichen. Über die Schweiz hinausgehend wäre ein Vergleich mit phänologischen Monitorings in anderen alpinen Nationalparks, beispielsweise im Nationalpark Hohe Tauern in Österreich oder im Nationalpark Berchtesgaden in Deutschland, methodisch reizvoll. Solche grenzüberschreitenden Vergleiche würden den Datensatz des Schweizerischen Nationalparks in einen breiteren europäischen Kontext stellen und seine Aussagekraft entsprechend stärken.

Eine weiterführende inhaltliche Perspektive liegt in der Verknüpfung der Pflanzenphänologie mit anderen ökologischen Indikatoren. Im Schweizerischen Nationalpark werden bereits seit Jahrzehnten Daten zu Tierphänologie, Vegetationsbedeckung und Wildtieraktivitäten erhoben. Eine integrierte Analyse dieser Datensätze könnte aufzeigen, inwiefern phänologische Verschiebungen bei den Pflanzen mit korrespondierenden Veränderungen bei bestäubenden Insekten, bei Singvögeln oder bei Huftieren einhergehen. Eine solche multidisziplinäre Erweiterung würde der ökosystemaren Komplexität des Untersuchungsgebiets gerechter und könnte aufzeigen, wo der Klimawandel zu einer Entkopplung etablierter Interaktionsmuster zwischen Arten führt, ein in der internationalen Forschung intensiv diskutiertes Phänomen, das im SNP unter günstigen Beobachtungsbedingungen besonders gut untersuchbar wäre.

Auf der Ebene der entwickelten Plattform bietet die Shiny-App selbst Raum für zukünftige Weiterentwicklungen. Denkbar wäre die Integration der Mann-Kendall- und Sen's-Slope-Verfahren als zusätzliche statistische Analyseoption, ergänzt um eine kurze interaktive Erläuterung der Ergebnisse, die auch ungeschulten Anwendern eine sachgerechte Interpretation ermöglicht. Eine Optimierung der Bedienoberfläche für mobile Endgeräte würde es den Parkwächtern erlauben, die App auch im Gelände als Referenzwerkzeug zu nutzen. Schliesslich wäre eine modulare Erweiterung der App auf zusätzliche Datenquellen, beispielsweise Wildtier-Beobachtungsdaten oder hochaufgelöste Klimadaten aus dem MeteoSchweiz-Reanalyseprodukt, eine logische Fortsetzung der bestehenden Architektur und würde der App eine breitere wissenschaftliche und betriebliche Verwendung eröffnen.

Über die einzelnen methodischen und thematischen Perspektiven hinaus ist ein abschliessender strategischer Gedanke wichtig. Phänologische Datensätze gewinnen ihren wissenschaftlichen Wert mit zunehmender zeitlicher Tiefe. Was heute als „relativ kurze“ Zeitreihe von 32 Jahren erscheint, wird in zehn oder zwanzig Jahren eine erstrangige Quelle für die Bewertung klimabedingter Verschiebungen im alpinen Raum sein, vorausgesetzt die Erhebung wird kontinuierlich fortgeführt und methodisch konsistent gehalten. Der Schweizerische Nationalpark verfügt mit seinem Phänologie-Monitoring über ein Instrument, dessen voller Wert sich erst in den kommenden Jahrzehnten erschliessen wird. Die vorliegende Arbeit ist in diesem Sinn als Zwischenbilanz zu verstehen, sie dokumentiert den derzeitigen Stand, identifiziert die offenen Fragen und legt die Grundlage dafür, dass künftige Generationen von Forschenden auf einer strukturierten, gut zugänglichen und kritisch reflektierten Datenbasis aufbauen können.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- Auchmann, R., Brugnara, Y., Rutishauser, T., Brönnimann, S., Gehrig, R., Pietragalla, B., Begert, M., Sigg, C., Knechtel, V., Calpini, B. & Konzelmann, T. (2018). *Quality Analysis and Classification of Data Series from the Swiss Phenology Network*. Technical Report MeteoSwiss 269, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich.
- Benjamini, Y. & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Brugnara, Y., Auchmann, R., Rutishauser, T., Gehrig, R., Pietragalla, B., Begert, M., Sigg, C., Knechtel, V., Konzelmann, T., Calpini, B. & Brönnimann, S. (2020). Homogeneity assessment of phenological records from the Swiss Phenology Network. *International Journal of Biometeorology*, 64, 71–83. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01794-y>
- Chuine, I. & Régnière, J. (2017). Process-Based Models of Phenology for Plants and Animals. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 159–182. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022706>
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A. & Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7), 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Gubler, S., Hunziker, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Brönnimann, S., Schwierz, C., Oria, C. & Rosas, G. (2017). The influence of station density on climate data homogenization. *International Journal of Climatology*, 37(13), 4670–4683. <https://doi.org/10.1002/joc.5114>
- Hollander, M. & Wolfe, D. A. (1973). *Nonparametric Statistical Methods*. John Wiley & Sons, New York.
- Hunziker, S., Gubler, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade, M., Velarde, F., Ticona, L., Carrasco, G., Castellón, Y., Oria, C., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Rohrer, M. & Brönnimann, S. (2017). Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations. *International Journal of Climatology*, 37(11), 4131–4145. <https://doi.org/10.1002/joc.5037>

- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. & Zhou, B. (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK und New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Körner, C. (2003). *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems* (2. Aufl.). Springer, Berlin/Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18970-8>
- Menzel, A. & Fabian, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721), 659. <https://doi.org/10.1038/17709>
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., ... Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12(10), 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- MeteoSchweiz (o. J.). *Phänologie der Pflanzen – Beobachtungsanleitung*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich. <https://www.meteoschweiz.admin.ch>
- MeteoSchweiz (o. J.). *Open Government Data – Phenological Observations*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich. <https://opendatadocs.meteoswiss.ch/a-data-groundbased/a9-phenological-observations>
- Schwartz, M. D. (Hrsg.) (2013). *Phenology: An Integrative Environmental Science* (2. Aufl.). Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6925-0>
- Walde, M. G., Vitasse, Y. & Wolkovich, E. M. (2025). Rethinking the interpretation of spring phenological temperature sensitivity. *npj Science of Plants*, 1, Article 3. <https://doi.org/10.1038/s44383-025-00004-6>
- Wood, S. N. (2017). *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2. Aufl.). Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL.

6.2 Persönliche Mitteilungen

Persönliche Mitteilungen werden im Text mit Namensnennung und Datum zitiert. Sie werden gemäss üblicher wissenschaftlicher Praxis im Literaturverzeichnis nicht aufgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden persönliche Mitteilungen folgender Personen verwendet:

Bott, F. (Leiter der Nationalparkwächter, Schweizerischer Nationalpark): Persönliches Gespräch im Juni 2026 in den Büroräumlichkeiten des Schweizerischen Nationalparks.

Cruickshank, S. (Schweizerischer Nationalpark): Persönliche Mitteilungen im Rahmen der Datenbereitstellung und der App-Entwicklung, 2025/2026.

Gubler, S. (Leiterin der Forschungskommission Schweizerischer Nationalpark, SCNAT): Persönliche Mitteilungen im Rahmen der fachlichen Begleitung, 2025/2026.

Vitasse, Y. (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL): Persönliche Mitteilung zu methodischen Fragen der phänologischen Trendanalyse, 2025/2026.

6.3 Verzeichnis generativer KI-Systeme

OpenAI. (2026). ChatGPT. Modellversionen GPT-5.3 Instant und GPT-5.5 Instant.
<https://chatgpt.com>

Eingesetzt als Produktivitätswerkzeug für:

- Strukturierung der Kapitel und formale Ausarbeitung von Textentwürfen auf Basis eigener inhaltlicher Vorgaben
- Erstellung und Optimierung von R-Skripten für die Datenaufbereitung, die statistische Trendanalyse sowie für ergänzende Auswertungen
- Hilfe bei der Entwicklung und Dokumentation der begleitenden Shiny-Applikation, README und Inline-Kommentare
- Dialogische Reflexion methodischer Optionen mit dem Ziel, alternative Sichtweisen aktiv einzubeziehen

Anhang

Der vollständige Quellcode der im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelten Shiny-Applikation wird aufgrund seines Umfangs von rund 4'600 Zeilen R-Code separat abgegeben und enthält die folgenden Dateien:

README.md — Projektdokumentation, Installation und Nutzungshinweise

global.R — Globale Konfiguration, Bibliotheken, Datenpfade und gemeinsame Funktionen

ui.R — Benutzeroberfläche der Applikation mit Aufbau der neun thematischen Tabs

server.R — Server-Logik mit Reactives, Plot-Generierung und Datenverarbeitung pro Tab

snp_loader.R — Lade- und Aufbereitungsmodul für die SNP-Phänologiedaten

meteoswiss_downloader.R — STAC-API-Anbindung an die MeteoSchweiz Open-Data-Plattform

meteoswiss_transform.R — Transformation der MeteoSchweiz-Daten in das interne Format der Applikation

enrich_snp_elevations.R — Anreicherung der SNP-Standorte mit Höhendaten von swisstopo

build_snapshot.R — Erstellung konsolidierter Daten-Snapshots zur Beschleunigung des App-Starts

Detaillierte Hinweise zur lokalen Installation, zur Datenstruktur und zur Bedienung der Applikation finden sich in der mitgelieferten Datei **README.md**.