

AdaMedOr – Adapting Mediterranean Orchards

Kurzbericht

Im Rahmen des AdaMedOr-Projekts arbeitete ein Konsortium von acht Partnerorganisationen aus Deutschland, Marokko, Spanien und Tunesien zusammen. Dabei wurden Daten, Methoden und Tools gesammelt, weiterentwickelt und verbreitet mit dem Ziel die Obstbauern im Mittelmeerraum bei der Klimawandelfolgenanpassung zu unterstützen.

Das Konsortium legte einen besonderen Schwerpunkt auf den Temperaturanstieg während der Dormanz (Ruhezeit) der Bäume. Eine solche Erwärmung während der kühlen Jahreszeit kann schwerwiegende Folgen für Anbausysteme von Stein- und Kernobst sowie Nüssen haben. Vor allem in wärmeren Klimaten wie Tunesien, Marokko und Südspanien können wärmere Winter die bereits unter jetzigen Bedingungen agroökologischen Bedürfnisse lediglich marginal erfüllt, bei einer weiteren Erwärmung können die Bäume erheblich beeinträchtigt werden.

Nachdem Laubbaumarten im Herbst alle Blätter abgeworfen haben, verbringen sie den Winter in Dormanz, einer Art Ruhephase. Die Bäume benötigen bestimmte Temperatursignale, um ihr aktives Wachstum wieder aufnehmen zu können. Sie benötigen zunächst kühle Temperaturen, die auch als „Chill“ oder „Kältereiz“ bezeichnet wird, und anschließend warme Temperaturen (auch als „Heat“ oder „Forcing“ bezeichnet). Die Anforderungen an Kältereiz und Wärme sind von Baumart zu Baumart und sogar von Sorte zu Sorte sehr unterschiedlich. Damit ein kommerzieller Obstanbau wirtschaftlich rentabel ist, müssen die Erzeuger Baumsorten auswählen, deren klimatische Bedürfnisse gut auf das lokale Klima abgestimmt sind.

Obstbäume im Mittelmeerraum

In vielen Teilen des Mittelmeerraums sind die Temperaturbedingungen für den Anbau von Obst- und Nussbäumen bereits grenzwertig. Der voranschreitende Klimawandel wird diese Situation wahrscheinlich noch verschärfen. Es wurden bereits akute Symptome einer unzureichenden Kälteakkumulation beobachtet, und es scheint wahrscheinlich, dass die Produktivität der Obstanbausysteme auch ohne solche sichtbaren Symptome bereits durch die Wintererwärmung beeinträchtigt wurde.

Die Unterstützung der Landwirte bei der Identifizierung geeigneter Baumsorten wurde lange Zeit durch einen Mangel an geeigneten Analyseinstrumenten erschwert. Die Dormanz von Obstbäumen ist ein komplexes Phänomen, und die Akkumulation von Kälte und Wärme lässt sich nicht leicht beobachten. Dementsprechend gab es bisher keine zuverlässigen Informationen über die klimatischen Bedürfnisse der meisten Baumarten und -sorten in der Region.

Die Analyseinstrumente von AdaMedOr

Informationen über die klimatischen Bedürfnisse von Bäumen können auf drei Arten gewonnen werden: durch Experimente, durch statistische Analysen und durch Modellierung. AdaMedOr hat alle drei Wege beschritten.

Was die Experimente betrifft, so hat das AdaMedOr-Konsortium ein gemeinsames Protokoll für die Durchführung kontrollierter Forcing-Experimente erstellt. Bei diesen Experimenten werden die Triebe von Bäumen, die unter Außenbedingungen gewachsen sind, zu verschiedenen Zeitpunkten im Winter geschnitten und in eine Wärmekammer gebracht. In den darauffolgenden Wochen werden die Triebe sorgfältig beobachtet, um festzustellen, ob die Knospen aufbrechen und sich zu Blättern oder Blüten entwickeln. Wenn die meisten Knospen nach einem bestimmten Zeitraum aufbrechen, geht man davon aus, dass das Kältebedürfnis erfüllt war, bevor die Triebe von den Bäumen entfernt wurden. Solche

kontrollierten Versuche wurden in Tunesien an 10 Sorten von 2 Arten, in Marokko an 70 Sorten von 9 Arten und in Spanien an 165 Sorten von 6 Arten durchgeführt.

Wenn langfristige phänologische Aufzeichnungen verfügbar sind, kann auch eine statistische Analyse Einblicke in die klimatischen Anforderungen von Baumarten liefern. Die Partner des AdaMedOr-Konsortiums verwendeten eine Methode auf der Grundlage der Partial Least Squares Regression, um die klimatischen Bedürfnisse von 40 Sorten von 4 Arten in Tunesien, von 331 Sorten von 1 Art in Marokko und von 78 Sorten von 3 Arten in Spanien zu bestimmen.

Was die Modellierung anbelangt, so musste das Team zunächst einige konzeptionelle und rechnerische Herausforderungen überwinden, die den Erfolg von modellbasierten Ruhezeitbewertungen seit Jahrzehnten einschränken. Das im Rahmen des Projekts entwickelte PhenoFlex-System stellt einen neuen Ansatz für die Modellierung der gesamten Dormanzperiode dar. Während bisherige Modellierungsansätze auf der starken Annahme beruhen, dass alle Bäume ähnlich auf die Temperatur reagieren, kann PhenoFlex kulturspezifische Modelle erstellen. Solche Modelle liefern bessere Erklärungen für die beobachteten Blühtermine und sind wahrscheinlich zuverlässiger für die Prognose der Auswirkungen des Klimawandels. Das PhenoFlex-System wurde angewandt, um die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Phänologie der Bäume zu prognostizieren. Unter Verwendung eines Ensembles von Klimawandelprognosen erstellten die AdaMedOr-Forscher Prognosen für 110 Baumarten aus 7 Arten.

Mediterrane Obstgärten in einem sich erwärmenden Klima

Die Beobachtungen des Projektteams in den Obstanlagen der Region, Gespräche mit Erzeugern, statistische Analysen, Experimente und Modellierungen ermöglichten differenzierte Rückschlüsse auf die Auswirkungen des Klimawandels auf Obst- und Nussbäume im Mittelmeerraum. Vor allem in den wärmsten Regionen Tunesiens und Marokkos ist zu erwarten, dass viele Sorten in einer wärmeren Zukunft nicht überlebensfähig sein werden. Wenn die Anforderungen an das Kältebedürfnis nicht mehr erfüllt werden, oder auch wenn sie erst spät in der Saison erfüllt werden, kann die Produktion stark beeinträchtigt werden. Bäume, die nicht blühen, können keine Früchte tragen, und Bäume, die zu spät blühen, können Früchte von geringer Qualität hervorbringen. Andererseits können Bäume, die zu früh blühen, Spätfrösten ausgesetzt sein, die ebenfalls große Schäden verursachen können.

Die im Rahmen des Projekts gesammelten Informationen liefern den Landwirten neue Anhaltspunkte für die Wahl der Baumarten und -sorten. Bei den meisten Arten gab es beträchtliche Unterschiede zwischen den Sorten, was darauf hindeutet, dass durch eine sorgfältige und wissenschaftlich fundierte Auswahl die Produktivität der mediterranen Obstgärten auch in einem wärmeren Klima erhalten werden kann. Für einige Arten an einigen Orten, z. B. für Pistazien in Tunesien oder Äpfel und Birnen in Marokko, deuten die Projektergebnisse jedoch auf ernsthafte Produktionsprobleme hin, die die Erzeuger möglicherweise nicht bewältigen können.

Natürlich war das AdaMedOr-Projekt nicht in der Lage, detaillierte Empfehlungen für alle Obstanbaugebiete in der Region zu geben. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Open-Source-Tools können jedoch zur Erstellung solcher Empfehlungen verwendet werden, und die Versuchsprotokolle können auf weitere Sorten angewandt werden. AdaMedOr hat somit eine solide Grundlage für weitere Arbeiten geschaffen, um Landwirte in ihrem Bestreben zu unterstützen, widerstandsfähige und produktive Obstanlagen für eine wärmere Zukunft anzulegen.

Projektnummer: 01DH20012

Projektakronym: AdaMedOr

Projektname: Adapting Mediterranean Orchards



Teil 2: Eingehende Darstellungen

Projektzeitraum: 01-06-2020 bis 31-12-2023

Adapting Mediterranean Orchards (AdaMedOr)

Gefördert vom:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Allgemeiner Kontext

Mit Millionen von Hektar an Plantagen ist der Mittelmeerraum eine der wichtigsten Regionen der nördlichen Hemisphäre für die Erzeugung von Obst. Diese Obstanbausysteme leisten einen wichtigen Beitrag zur Wirtschaft und erbringen zahlreiche Ökosystemdienstleistungen wie die Regulierung des Wasserkreislaufs, die Bindung von Kohlenstoff, die Verbesserung des Mikroklimas und Erosionsschutz. Diese Systeme stehen jedoch aufgrund des Klimawandels vor Herausforderungen in Bezug auf die Nachhaltigkeit, insbesondere aufgrund von steigenden Temperaturen im Winter. In den Wintermonaten treten die Knospen von vielen Obstbaumarten in eine Ruhephase, auch Dormanz genannt, zu dessen Überwindung die Knospen einem Kältereiz ausgesetzt sein müssen. In diesem Zusammenhang zielte das Projekt Adapting Mediterranean Orchards (AdaMedOr) darauf ab, einen Beitrag zu Biodiversitätsportfolios zu leisten, die eine robuste und nachhaltige Obstproduktion gewährleisten und künftigen klimatischen Herausforderungen standhalten kann. Durch die Bewertung der aktuellen Agrobiodiversität und den Einsatz modernster Modellierung und Klimaprojektionen unterstützte AdaMedOr Landwirte im Mittelmeerraum, indem es wissenschaftlich fundierte Alternativen zur Anpassung ihrer Betriebe an die Auswirkungen des Klimawandels anbietet.

Zusammenarbeit mit Partnern

In diesem Bericht fassen wir die Aktivitäten des AdaMedOr Projekts zusammen und stellen die Ergebnisse während der gesamten Projektlaufzeit (1. Juni 2020- 31. Dezember 2023) vor. Das AdaMedOr-Konsortium besteht aus acht Institutionen in Spanien, Marokko, Tunesien und Deutschland (Tabelle 1). In diesem Dokument wird über die Aktivitäten aller Konsortiumsmitglieder berichtet, wobei der Fokus vor allem auf Work Packages unter der Verantwortung des Uni Bonn Teams liegt.

Tabelle 1. Partnerinstitutionen und Leiter der jeweiligen Institutionen, die im Rahmen von AdaMedOr zusammenarbeiten

Institution	Partner	Land
University of Bonn (Uni Bonn)	Prof. Dr. Eike Luedeling	Deutschland
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CEBAS-CSIC)	Dr. David Ruiz	Spanien
Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA)	Dr. Javier Rodrigo	Spanien
Institut National Agronomique de Tunisie (INAT)	Prof. Dr. Mehdi Ben Mimoun	Tunesien
Institut de l'Olivier (IO)	Dr. Mohammed Ghrab	Tunesien
Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès (ENA)	Prof. Dr. Ossama Kodad	Marokko
Superior School of Technology Khenifra, University Sultan Moulay Slimane (USMS)	Prof. Dr. Adnane El Yaacoubi	Marokko
Agromillora Méditerranée (AgMed)	Khaled Didri	Tunesien

1.1. Zielsetzungen

AdaMedOr verfolgte drei Hauptziele mit jeweils mehreren spezifischen Unterzielen.

Ziel 1: Erfassung der derzeitigen Agrobiodiversität von Obstbäumen im Mittelmeerraum.

- Erfassung der Agrobiodiversität von Obstbäumen in den Partnerländern des Mittelmeerraums auf inter- und intraspezifischer Ebene (z. B. Reichtum, Abundanz, Ähnlichkeiten auf der Ebene der Arten und Sorten).
- Identifizierung und Charakterisierung genetischer Ressourcen und natürlicher Mutanten, die dazu beitragen können, die Vielfalt der kultivierten Obstsorten zu erhöhen, insbesondere im Hinblick auf die Anpassung an künftige Klimabedingungen (z. B. Sorten mit geringem Kältebedürfnis).
- Zusammenstellung bestehender Datensätze, die die Phänologie und die agronomische Leistung von Obstbaumarten und -sorten erfassen.

Im Rahmen des AdaMedOr-Projekts haben wir mehrere große Datensätze erstellt, die die Grundlage für die späteren Ziele bilden. Alle Mitglieder des Konsortiums trugen Informationen über die Arten und Sorten bei, die in den Zielländern angebaut werden. In Anbetracht der zu erwartenden wärmeren Winter legten wir ein besonderes Augenmerk auf Sorten mit geringerem Kältebedürfnis, da die wärmeren Winter eine große Bedrohung für den Anbau von Obstbäumen im Mittelmeerraum darstellt. Wir stützten uns auf zwei Informationsquellen: langfristige phänologische Aufzeichnungen und Forcing Experimente, bei denen die Stecklinge von Zweigen zu mehreren Zeitpunkten im Winter warmen Temperaturen ausgesetzt werden. Wir haben die langfristigen phänologischen Aufzeichnungen zusammengetragen, die vier Länder (Tunesien, Marokko, Spanien, Deutschland), 10 Standorte, 10 Arten und mehr als 270 Sorten umfassen. Dieser Datensatz deckt einen großen klimatologischen Gradienten ab, von gemäßigttem Klima in Westdeutschland bis zu semiariden Bedingungen in Zentraltunesien. Die meisten Beobachtungen decken den Zeitraum von 1990 bis heute ab, für einige Sorten liegen jedoch auch Beobachtungen vor, die bis ins Jahr 1958 zurückreichen. Der Datensatz enthält phänologische Beobachtungen über den Beginn der Blüte, die Vollblüte und das Ende der Blüte. Während des Projekts stützten wir uns nicht nur auf phänologische Aufzeichnungen, die in der Vergangenheit gesammelt wurden, sondern wir generierten weitere Beobachtungen in koordinierten Versuchen an allen Partnerstandorten. Ein standardisiertes und optimiertes Versuchsprotokoll ermöglichte die Bewertung der agroklimatischen Anforderungen vieler Sorten an den verschiedenen Standorten. Wir konzentrierten uns bei diesen Versuchen auf Sorten, über die wir keine vorherigen Informationen hatten. Insgesamt erfassten wir 218 Sorten von neun Arten.

Wir verwendeten verschiedene Methoden, um die agroklimatischen Bedürfnisse der Sorten zu ermitteln, die wir aus phänologische Langzeitbeobachtungen und aus den Versuchen ableiten. Die erste Methode ist die Partial Least Squares (PLS)-Analyse, eine datengetriebene Methode, die sich bei der Analyse phänologischer Aufzeichnungen als nützlich erwiesen hat (Luedeling und Gassner, 2012). Auf der Grundlage dieser Methode haben wir den Kälte- und Wärmebedarf von Süßkirsche, Birne und Aprikose in Spanien und Deutschland ermittelt. Die Analyse half bei der Identifizierung von Sorten mit hohem und niedrigem Kältebedarf. Die Unzulänglichkeiten der datengetriebenen Methode wurden deutlich, als wir versuchten, die deutschen und spanischen Datensätze gemeinsam zu analysieren. Der PLS-Algorithmus war nicht in der Lage, gemeinsame Kälte- und Wärme-Perioden zu identifizieren, was auf die Grenzen dieser Analysemethode hinwies. Zudem ermittelten wir die agroklimatischen Anforderungen auf Grundlage unseres neu entwickelten phänologischen Modellierungssystems PhenoFlex. Die Parametrisierung des Modells erfordert eine ganze Reihe von Phänologiebeobachtungen, da das Modell 12 Parameter hat die angepasst werden müssen. Einer der Hauptvorteile dieses Ansatzes besteht darin, dass er es uns ermöglicht, phänologische Beobachtungen

zu kombinieren, die unter klimatisch sehr unterschiedlichen Bedingungen gesammelt wurden (wo die PLS-Methode an ihre Grenzen stieß).

Ziel 2: Vorhersage der künftigen Leistungsfähigkeit von Obstbäumen auf der Grundlage modernster phänologischer Modellierungs- und Klimafolgenprognoseansätze.

- Verwendung eines innovativen phänologischen Modellierungssystems um Vorhersagen zu künftiger Phänologie für verschiedene Obst- und Nussbaumarten und -sorten in Deutschland, Spanien, Tunesien und Marokko zu tätigen.
- Kartierung der aktuellen und zukünftigen Verfügbarkeit von Kältereiz für Obstbäume in den Mittelmeer-Partnerländern.
- Durchführung von Experimenten unter kontrollierten Klimabedingungen, um Wissenslücken zu schließen, die durch die Modellierungsaktivitäten aufgedeckt wurden.
- Projektion möglicher zukünftiger geografischer Verbreitungen und Lebensfähigkeiten wichtiger mediterraner Baumarten und -sorten auf der Grundlage von Prognosen zum Klimawandel, unter Verwendung von Phänologiemodellen und Ensemble-Nischen-Modellierungsansätze.

Wir bewerteten Veränderungen der akkumulierten Kältereiz im Mittelmeerraum für ein großes Netzwerk von Wetterstationen und kartierten diese Veränderungen auf der Grundlage einer neuen Methode, die für die räumliche Interpolation des Kältereizes auf kontinentaler oder subkontinentaler Ebene gut geeignet ist. Diese prognostizierten Veränderungen in der Verfügbarkeit von Winterkälte wurden mit dem Expertenwissen der Projektpartner über aktuelle und zukünftige Herausforderungen in Obstanlagen, die mit der Erwärmung des Winters zusammenhängen, ergänzt. Wir haben das neuartige Phänologiemodell PhenoFlex entwickelt, das gängige Modelle für die Kälteakkumulation (Dynamic Model) und die Wärmeakkumulation (Growing Degree Hour Model) auf neue Weise kombiniert. Während die meisten Phänologiemodelle starre Annahmen darüber treffen, ob und wie Kälte- und Wärmeakkumulation interagieren, kann PhenoFlex einen streng sequentiellen Prozess von Kälte- und Wärmeakkumulation, einen fast vollständig parallelen Prozess und alles dazwischen modellieren. Die Interaktion von Kälte- und Wärmeakkumulation wird anhand von Daten während der Modellkalibrierung bestimmt. Um die Grenzen des neu entwickelten Phänologiemodells zu testen, haben wir Temperaturexperimente an jungen Topfbäumen in verschiedenen Umgebungen durchgeführt. Indem wir die Bäume häufig zwischen den verschiedenen Temperaturumgebungen hin- und herbewegten, konnten wir sehr viel vielfältigere Temperaturzeitreihen erzeugen, als dies unter natürlichen Bedingungen zu beobachten wäre. Die phänologischen Beobachtungen, die während dieses Experiments gemacht wurden, halfen uns, Mechanismen der Blüteninduktion unter stark erhöhten Temperaturen zu identifizieren, die derzeit von den Phänologiemodellen für Obstbäume nicht gut erfasst werden. Um für jeden Partnerstandort Vorhersagen über die Lebensfähigkeit von Obstbaumarten unter dem Klimawandel treffen zu können, kombinierten wir das kalibrierte PhenoFlex-Modell mit Vorhersagen über zukünftige Temperaturbedingungen. Wir kalibrierten PhenoFlex in mehreren Fallstudien für sieben Arten und über 100 Sorten in Deutschland, Spanien, Marokko und Tunesien. Wir modellierten Blühtermine unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen und schätzten so mögliche Verschiebungen im Blühverhalten ab. Wir bezifferten das Risiko nicht erfüllter agroklimatischer Anforderungen, das sich darin äußerte, dass das Modell den Blühzeitpunkt nicht vorhersagen konnte. Um die Vorhersagen zu präzisieren, haben wir eine neue und einfache Methode entwickelt, um Blühfenster für jede Obstbaumart und jeden Standort zu bestimmen. Eine Hauptmotivation für die Entwicklung von Blühfenstern war es, klimasensitive Abgrenzungen geeigneter Blühzeiten zu ermöglichen, die sich im Zuge von Klimaveränderungen verschieben können, anstatt sich auf starre Kalenderdaten zu beziehen. Mit dieser Methode konnten wir Blühereignisse, die außerhalb der für die Blüte geeigneten Temperaturbedingungen liegen, als potenzielle Produktionsausfälle kennzeichnen. Unsere Schätzungen zur Verschiebung des Blühzeitpunkts, zur Unterschreitung der

agroklimatischen Anforderungen sowie zu Blühereignissen außerhalb der üblichen Blütezeit liefern wertvolle Informationen über Arten und Sorten, die am ehesten an die künftigen Bedingungen an den jeweiligen Standorten angepasst sein können.

Ziel 3: Entwicklung und Verbreitung von Biodiversitätsportfolios, die eine widerstandsfähige und nachhaltige Obstproduktion für künftige Klimabedingungen gewährleisten.

- Erfassung der Perspektive von Landwirten in Workshops mit Interessenvertretern unter Anwendung partizipativer Verfahren.
- Nutzung von Informationen, die im Rahmen der Aktivitäten unter Ziel 1 und 2 gewonnen wurden, sowie von Beiträgen der Interessengruppen zur Empfehlung von Baumsortenportfolios, die für die Zielländer unter den prognostizierten künftigen Klimabedingungen geeignet sind.
- Erstellung von automatisierten und frei zugänglichen Werkzeugen für die Phänologie-Modellierung, die Projektion von Klimaauswirkungen und die Zusammenstellung von Baumportfolios. Dies wird die Auswahl von Sorten und passenden Pollenspendern mit ähnlichen Blütezeiten erleichtern, die je nach Kälte- und Wärmebedarf gut an das jeweilige Anbaugebiet angepasst sind.

Wir haben eine Reihe von Informationsmaßnahmen durchgeführt, um Trends bei der Kälteakkumulation zu untersuchen, ihre Auswirkungen auf Obstbäume zu bewerten und die Ansichten der Landwirte zum Klimawandel und zur Anpassung zu verstehen. Zu diesen Aktivitäten gehörten Infotage, Workshops und Interviews. Während der Infotage wurden die Landwirte über die Auswirkungen einer unzureichenden Winterkälte aufgrund des Klimawandels informiert und äußerten ihre Besorgnis über Wasserknappheit, extreme Wetterereignisse und die Verbreitung von Schädlingen und Krankheiten. Workshops und Feldbegehungen ermöglichten zudem Diskussionen über Anpassungsherausforderungen und -strategien, wie die Auswahl geeigneter Sorten und Gartenbaupraktiken. Die Landwirte betonten die Notwendigkeit von Kälteakkumulationskarten und Sortenportfolios mit agroklimatischen Anforderungen. Wir haben alle relevanten Instrumente, die in diesem Projekt verwendet wurden, öffentlich zugänglich gemacht und für jeden relevanten Schritt eine ausführliche Dokumentation in Form von Vignetten und Broschüren bereitgestellt. Dazu gehören das neu entwickelte Phänologiemodell PhenoFlex sowie Anleitungen zur Ausführung, Kalibrierung und Bewertung des Modells. Wir stellen auch Methoden zur Verfügung, um auf die Ergebnisse der neuesten Generation von Klimavorhersagen zuzugreifen, und Werkzeuge, um sie zu verarbeiten. Wir leisten einen Beitrag zur Stärkung der Kapazitäten im Bereich der Modellierung von Klimawandelauswirkungen durch ein frei zugängliches E-Book, das einen Masterstudiengangkurs begleitet. Das E-Book enthält ausführliche Erläuterungen zum Code und zu den Methoden sowie zu den zugrundeliegenden Konzepten und möglichen Fallstricken der (Phänologie-)Modellierung.

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Bei der Aufzählung der wichtigsten Projektergebnisse orientieren wir uns an dem ursprünglichen Projektplan mit den sechs wissenschaftlich-technischen Work Packages (WP1 – WP6) und dem organisatorischen Work Package WP0 (Abbildung 1). Jedem Work Package sind Meilensteine (M) und Deliverables (D) zugeordnet. Während wir die Ergebnisse der Work Packages unter Verantwortung des Bonner Teams detailliert erläutern werden (WP0, WP2, WP4, WP6), werden wir die übrigen Work Packages (WP1, WP3, WP5) lediglich grob umreißen.

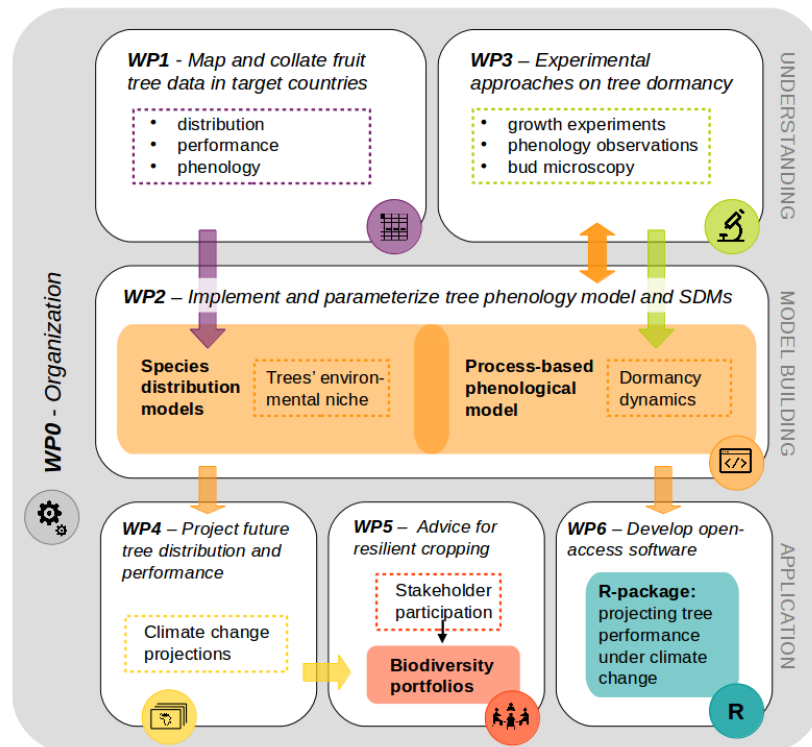


Abbildung 1. Aufbau des AdaMedOr Projekts anhand der einzelnen Work Packages (WP), wobei Informationsfluss zwischen den WP sind als Pfeile dargestellt sind.

WP 0 – Organisation (Uni Bonn)

Datenmanagementplan (D.0.1): Die Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Phänologie von Obstbäumen und die Identifizierung klimaresistenter Arten und/oder Sorten hängt von verlässlichen Aufzeichnungen entweder aus Langzeitbeobachtungen oder Phänologie-Experimenten ab. Dies umfasst aufgezeichnete Wetterdaten in der Nähe der Anlagen, auf denen die Phänologiebeobachtungen gemacht wurden. Vor Beginn des Projekts waren die Beobachtungen entweder fragmentiert oder aufgrund fehlender standardisierter Berichterstattung nicht vergleichbar. Der vom Konsortium entwickelte Datenmanagementplan zielte darauf ab, Leitlinien für die Erfassung von Phänologiedaten der Projektmitglieder bereitzustellen und diese dem Konsortium zugänglich zu machen. Am Ende des Projekts sollten die Daten öffentlich zugänglich gemacht werden, mit Ausnahme von Dateien, die durch Eigentumsvereinbarungen geschützt sind. Im Falle geschützter Daten stellen wir die Dateien auf begründete Anfragen zur Verfügung. Wir folgen dem „FAIR“-Prinzip, um die Daten auffindbar (findable), zugänglich (accessible), interoperabel (interoperable) und wiederverwendbar (reusable) zu machen. Dies beinhaltet das Hinzufügen von Metadaten zur Beschreibung der Daten, Schlüsselwörtern zur Verbesserung der Auffindbarkeit, detaillierten Beschreibungen der durchgeführten Verfahren zur Analyse der Daten und die Veröffentlichung der Daten in einem öffentlichen Repository.

Projekttreffen (M.0.1): Das Konsortium traf sich persönlich bei zwei Gelegenheiten, um die Zusammenarbeit zu erleichtern und die Partner über den bereits erzielten Fortschritt zu informieren. Das erste persönliche Projekttreffen fand etwa zur Mitte der Projektlaufzeit statt, da die Pandemiesituation ein früheres Treffen nicht zuließ. Dieses Treffen fand vom 6. bis 8. September 2022 in Meknès, Marokko, statt und wurde von Prof. Ossama Kodad (ENA) ausgerichtet. Ein zweites Projekttreffen fand am Ende der Projektlaufzeit (7. bis 8. November 2023) in Bonn, Deutschland, statt. Bei den Projekttreffen waren alle Partner anwesend bis auf die tunesischen Partner, die am ersten

Treffen aufgrund fehlender Visa nicht teilnehmen konnten. Die Projekttreffen halfen, die Entwicklung gemeinsamer wissenschaftlicher Manuskripte zu koordinieren.

Fortschrittsberichte (D.0.2), sowie **Kommunikation mit der Öffentlichkeit (D.0.3)** wurden den Anforderungen entsprechend durchgeführt.

WP 1 – Kartierung und Zusammenstellung (CEBAS-CSIC)

Datensatz zu Standorten von Obstbaumarten und -sorten (M.1.1, M.1.2 & D.1.1): Unter der Leitung von CEBAS-CSIC und CITA sammelten die AdaMedOr-Partner Informationen über die gesamte Anbaufläche und die wichtigsten angebauten Sorten in den bedeutendsten Regionen für den Steinfruchtanbau Spaniens. Der Datensatz wurde von Agroseguro, einem landesweit tätigen privaten Versicherungsunternehmen in Spanien, bereitgestellt. Während der Datensatz wertvolle Einblicke in die Steinfruchtproduktion aggregiert nach Regionen bot, enthielt er keine Informationen über die Verteilung innerhalb dieser Region. Entgegen unseren früheren Erwartungen gelang es uns nicht, vergleichbare Informationen für die anderen Zielländer wie Tunesien und Marokko zu beschaffen. Deshalb haben wir uns dazu entschlossen, das dazugehörige Manuskript (D.1.1) mit dem Manuskript zu den Langzeitbeobachtungen zu kombinieren.

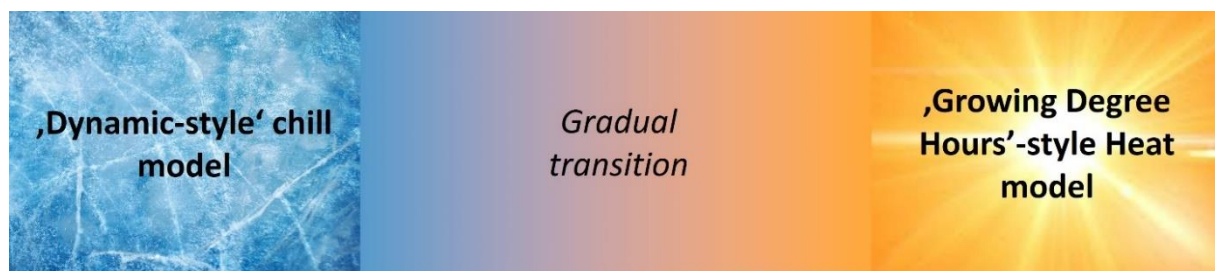
Langzeitbeobachtungen Obstbaumphänologie (M.1.3 & D.1.2): Phänologische Langzeitbeobachtungen von allen Partnerorganisationen wurden zusammengetragen. Insgesamt deckt der Datensatz 10 Obst- und Nussbaumarten ab (Apfel, Birne, europ. und jap. Pflaume, Süßkirsche, Aprikose, Pfirsich, Mandel, Pistazie, Olive) mit insgesamt 282 verschiedenen Sorten. Die Beobachtungen wurden an insgesamt 10 klimatisch stark unterschiedlichen Standorten gemacht: Archena, Cieza, Santomera und Zaragoza in Spanien; Sfax und Mornag in Tunesien; Khenifra, Meknès und Tassaout in Marokko; und Klein-Altendorf in Deutschland. Die Phänologiedaten umfassten die Stadien 10% Blüte, 50% Blüte und Ende der Blüte sowie die Fruchtreife in einigen Fällen. Basierend auf diesem Datensatz erstellten wir eine Liste der in den Zielländern vorhandenen Arten und Sorten. Wir analysieren derzeit noch den Datensatz auf Langzeit-Phänologietrends. In dieser Analyse werden wir untersuchen, wie die Variabilität der Lufttemperatur und der angesammelte Kältereiz die Endodormanzfreisetzung und die Blühdaten von Obstbäumen beeinflusst. Wir planen, die Analyse in einer wissenschaftlichen Zeitschrift zu veröffentlichen. Darüber hinaus haben wir die Datenbank über das Forschungsdaten-Repository bonndata verfügbar gemacht (Luedeling et al., 2024) (DOI: <https://doi.org/10.60507/FK2/MZIELI>).

Weitere Ergebnisse zu WP1: Darüber hinaus hat das Konsortium einige wissenschaftliche Manuskripte publiziert, die über die ursprünglichen Deliverables hinausgehen. Insgesamt wurden bereits neun Manuskripte in wissenschaftlichen Zeitschriften mit Peer-Review-Verfahren publiziert, die wir dem WP1 zuordnen. In dem Reviewmanuskript von Gonzales-Noguer et al. (2023) unter der Leitung von CEBAS-CSIC, erschienen in *Frontiers of Horticulture*, wurden die agroklimatischen Bedürfnisse von insgesamt 125 Apfelsorten zusammengetragen. Unter der Leitung von CITA wurden fünf Manuskripte zur Bestimmung agroklimatischer Bedürfnisse von verschiedenen Obstbaumarten und -sorten veröffentlicht. Analysen wurden mittels Partial Least Square (PLS) Regression des chillR Pakets (Luedeling et al., 2023) durchgeführt. Es wurden die Bedürfnisse von 42 Süßkirschsorten (Fadón et al., 2021b, 2023c, 2023a), 20 Aprikosensorten (Herrera et al., 2022) und 16 Birnensorten (Fadón et al., 2023b) bestimmt. Die Manuskripte erschienen in den Zeitschriften *Agricultural and Forest Meteorology*, *Frontiers in Plant Science*, *European Journal of Agronomy* und *Agronomy*. Auch die marokkanischen Partner der USMS haben ein auf PLS-Regression basierendes Manuskript veröffentlicht, bei dem die agroklimatischen Bedürfnisse zahlreicher Olivensorten untersucht wurden (Abou-Saaid et al., 2022). Der Artikel erschien in der Zeitschrift *Agronomy*. Zudem haben die tunesischen Partner von INAT zwei weitere Manuskripte über die Bestimmung agroklimatischer Bedürfnisse mittels PLS-Regression für mehrere Steinfrüchte (Pflaume, Pfirsich, Aprikose) (Borgini et

al., 2024) und Pistazien (Elloumi et al., 2024) publiziert. Die Manuskripte erschienen beide jeweils in der Zeitschrift *Scientia Horticulturae*.

WP 2 – Phänologiemodellierung (Uni Bonn)

Phänologiemodell PhenoFlex (D.2.1, M.2.1): Die Blüte von Obstbäumen ist hauptsächlich von der Temperatur abhängig. Der wichtigste Zeitraum ist die Winterperiode, in der das Wachstum unterbrochen ist und die Bäume in der Ruhephase sind. Die Ruhephase, oder auch Dormanz, kann in zwei Phasen unterteilt werden: die Endodormanz, in der die Bäume nicht in der Lage sind, auf günstige Bedingungen zu reagieren, und die Ecodormanz, in der die Bäume, nachdem sie ausreichend kühlen Bedingungen ausgesetzt waren, auf günstigere Bedingungen reagieren. Wir haben das neuartige Phänologiemodell für Obstbäume namens PhenoFlex (Luedeling et al., 2021) entwickelt, das Modelle zur Erfassung der Endodormanz (Dynamic Model, (Fishman et al., 1987a, 1987b)) und der Ecodormanz (Growing Degree Hour Model, (Anderson et al., 1986)) auf flexible Weise kombiniert (Abbildung 2). Ein wichtiges Merkmal des Modells ist, dass es keine Vorannahmen über die Interaktion zwischen Endo- und Ecodormanz, oder anders ausgedrückt, die Interaktion zwischen Kälte- und Wärmeakkumulation, trifft. PhenoFlex erlaubt das gesamte Spektrum von der parallelen Akkumulation von Kälte und Wärme bis zur schrittweisen, sequentiellen Akkumulation (erst Kälte, dann Wärme) und alles dazwischen zu modellieren. Im Gegensatz zu den meisten anderen Modellen wird die Interaktion im Rahmen des Modellkalibrierungsprozesses bestimmt und nicht im Modell im Vorhinein festgelegt.



The PhenoFlex framework

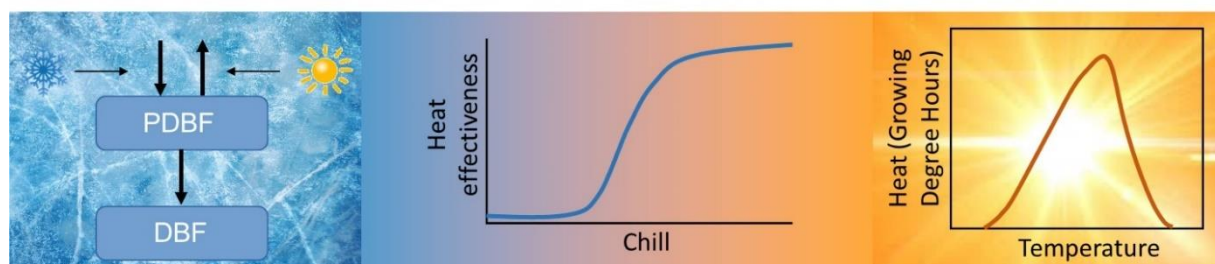


Abbildung 2. Konzeptionelles Modell von PhenoFlex mit dem 'Dynamic-style' Kältemodell (links), dem 'Growing Degree Hours'-style Wärmemodell (rechts) und die Interaktion der beiden (mitte) (entnommen aus Luedeling (2024)).

Das Modell wurde in Zusammenarbeit mit dem Nicht-Konsortiumsmitglied Prof. Dr. Carsten Urbach, Professor für Lattice Gauge Theory and Computational Physics an der Uni Bonn, entwickelt. Wir dokumentierten das Modell in einem wissenschaftlichen Manuskript in der Zeitschrift *Agricultural and Forest Meteorology* und implementierten und dokumentierten es in dem öffentlich verfügbaren R-Paket *chillR* (Luedeling et al., 2023). Wir kalibrierten das Modell auf der Grundlage langjähriger Phänologieaufzeichnungen (60 Jahre) der Apfelsorte 'Boskoop' und der Birnensorte 'Alexander Lucas' in Bonn, Deutschland, und verglichen es mit zwei Benchmark-Modellen. Bei der Verwendung von

PhenoFlex wurde ein Root Mean Square Error (RMSE) in der Vorhersage für Validierungsdaten von 4.0 bzw. 3.8 Tagen für die Apfelsorte 'Boskoop' und die Birnensorte 'Alexander Lucas' festgestellt. Diese Ergebnisse lassen sich gut mit den Validierungsfehlern eines maschinellen Lernmodells mit Gaußschen Prozessen sowie mit dem StepChill-Modell, einem weit verbreiteten Phänologiemodell, vergleichen. Neben der numerischen Bewertung des Modells haben wir auch die geschätzten Modellparameter in einem Temperaturgangdiagramm visualisiert, um den modellierten Kälte- und Wärmeakkumulationsprozess für das PhenoFlex-Modell unter Schätzung aller Modellparameter ($\text{PhenoFlex}_{\text{fitted}}$) und das PhenoFlex-Modell unter Verwendung von Standardmodellparametern der Kälte- und Wärmeuntermodelle ($\text{PhenoFlex}_{\text{fixed}}$, Abbildung 3) zu bewerten. Die visuelle Inspektion zeigte, dass im Falle der Apfelsorte „Boskoop“ trotz des geringen Validierungsfehlers der modellierte Kälte-Akkumulationsprozess nicht überzeugend war, wobei Temperaturen bis zu 30°C für die Kälte-Akkumulation wirksam waren. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, auch die modellierten Prozesse zu validieren.

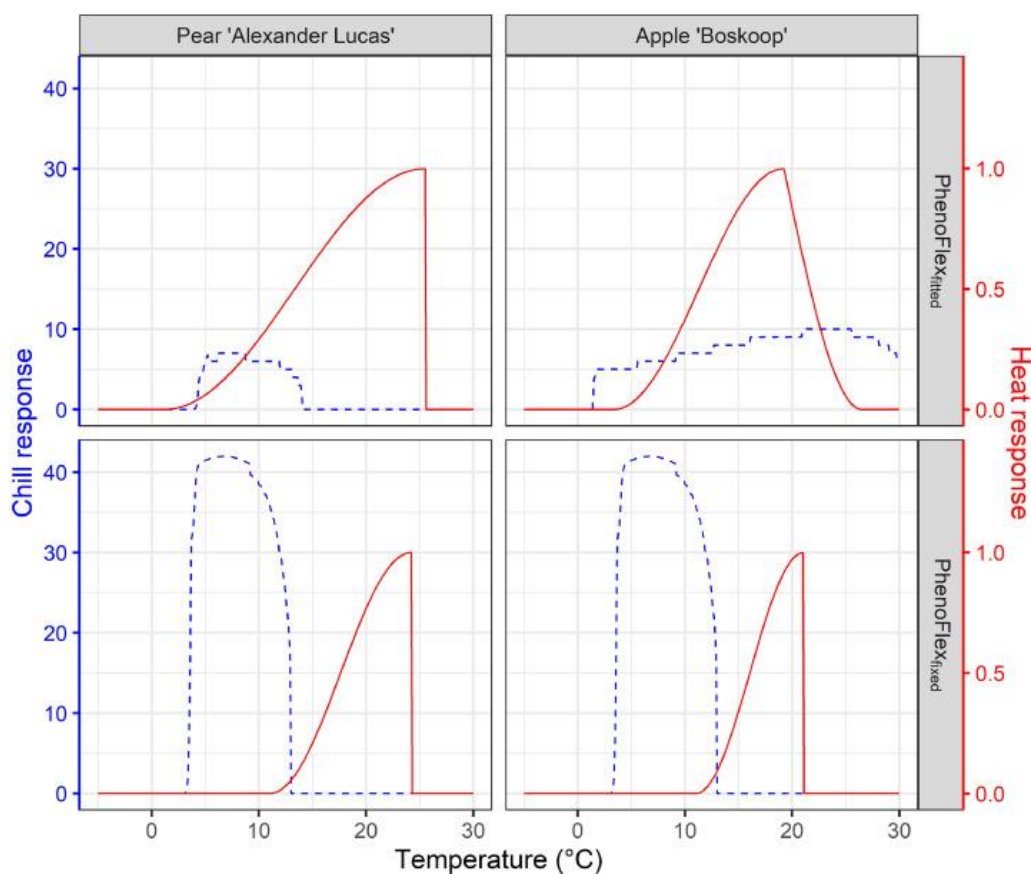


Abbildung 3. Kälte- und wärmerrelevante Temperaturbereiche für zwei verschiedene Kalibrierungen des PhenoFlex Modells ($\text{PhenoFlex}_{\text{fitted}}$, $\text{PhenoFlex}_{\text{fixed}}$). Kältereaktion wird mit blauer gestrichelter Linie gezeigt, die Höhe der Linie zeigt die Menge an akkumulierter Kälte bei konstanten Bedingungen über 1200 Stunden. Die Wärmereaktion (rote durchgehende Linie) zeigt die Wärmeakkumulation in Reaktion auf die Temperatur. (Abbildung entnommen aus: Luedeling et al., 2021).

Bericht mit Empfehlungen für die Versuchsplanung (D.2.2): Wir haben Empfehlungen für die Versuchsplanung von Forcing-Experimenten und für die Kalibrierung von PhenoFlex erarbeitet. Der Bericht beinhaltet Empfehlungen zur Probenahme, die Vorbereitung der beprobten Äste, die Erfassung der physiologischen und phänologischen Reaktionen der Stecklinge und die Bestimmung des Kälte- und Wärmebedarfs der Sorten. Der Bericht enthält auch Empfehlungen für die Parametrisierung des PhenoFlex-Systems. Er unterstreicht den Bedarf an phänologischen Beobachtungen unter wärmeren Bedingungen als in Bonn. Es werden mehr Standorte benötigt, da die Variation der

Temperaturbeobachtungen an einem einzigen Standort gering ist, was die Robustheit des Modells beeinträchtigt. Dies kann durch die Kombination von Daten mit langfristigen phänologischen Aufzeichnungen von wärmeren Standorten erreicht werden. Häufig scheitert dies jedoch daran, dass an den Standorten unterschiedliche Sorten angebaut werden und es nur wenig Überschneidungen gibt. Eine Alternative ist die Verwendung von Multi-Umwelt-Experimenten an Topfbäumen, die die Erzeugung verschiedener und wärmerer Jahreszeiten ermöglichen. Wir haben das PhenoFlex Modell anhand von Blühdaten angepasst, die in einem temperaturkontrollierten Experiment an getopften Apfelbäumen gesammelt wurden (Fernandez et al., 2021). Die Studie wurde von Fernandez et al (2022) durchgeführt, verfasst und in der Zeitschrift *Agricultural and Forest Meteorology* veröffentlicht. Das Modell zeigte bei Validierungsdaten unter Verwendung aller Temperaturbehandlungen eine zufriedenstellende Leistung (RMSE: 5.5 Tage, Abbildung 4). Schließt man jedoch die heißesten Temperaturbehandlungen aus, die auch zu Fällen von unregelmäßiger Blüte führten, steigt die Modellleistung drastisch an (RMSE: 2.3 Tage). Eine der wichtigsten Schlussfolgerungen der Studie war, dass die heißesten, marginalen Jahreszeiten der Temperaturbehandlungen möglicherweise Blühvorgänge ausgelöst haben, die derzeit nicht angemessen durch das PhenoFlex-System erfasst werden.

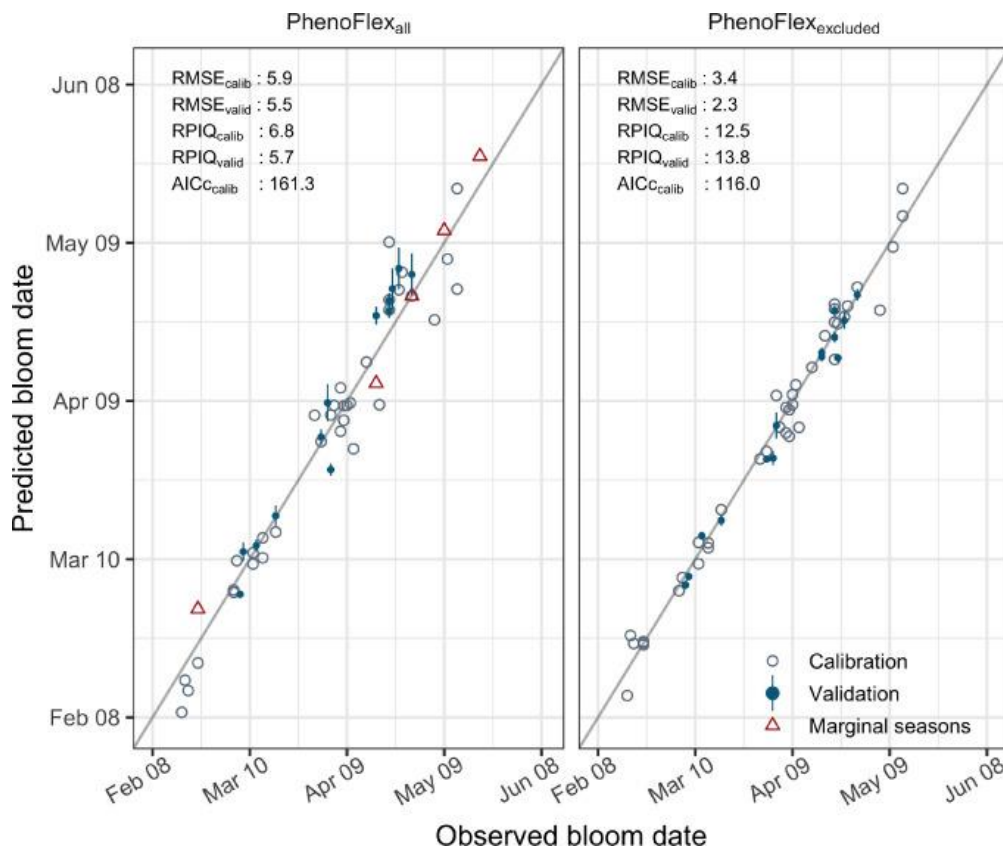


Abbildung 4. Beobachtete und vorhergesagte Blühdaten für Daten aus dem Kalibrierungssatz (Ringe und Dreiecke) und Validierungssatz (blaue Punkte), sowie die Modellgüteparameter für zwei Versionen des PhenoFlex Modells. In PhenoFlex_{all} wurden auch die marginalen Saisons mit extremer Hitze in die Kalibrierung verwendet, bei PhenoFlex_{excluded} wurden die marginalen Saisons (rote Dreiecke) bei der Kalibrierung jedoch weggelassen. Die übrigen Saisons sind mit blauen Kreisen und Punkten dargestellt. Die diagonale graue Linie repräsentiert eine perfekte Übereinstimmung von beobachteten und vorhergesagten Blühdaten. Die Fehlerbalken unter und über den Validierungspunkten stellen die Varianz in der Vorhersage da, ermittelt durch Bootstrapping (entnommen aus: Fernandez et al., 2022).

Modellparametrisierungen für verschiedene Obstbaumarten und -sorten (M.2.2, M.2.3, M.2.4): Derzeit ist das Modell für 3 Arten (Mandel, Apfel, Birne) und insgesamt sechs Sorten kalibriert und in

wissenschaftlichen Zeitschriften dokumentiert worden. Wir haben das Modell jedoch für viel mehr Arten und Sorten kalibriert, und die Manuskripte für diese Studien sind in Vorbereitung oder bereits eingereicht. Wir haben versucht, Phänologiedatensätze für kommerzielle Tafelapfelsorten aus Bonn, Deutschland, und 11 Mostapfelsorten aus Asturien, Spanien, gemeinsam zu analysieren. Die Analyse wird von Mojahid et al. (In preparation) durchgeführt und ist derzeit in Vorbereitung, um in der Fachzeitschrift *Agricultural and Forest Meteorology* veröffentlicht zu werden. Wir haben die Modelle einzeln und gemeinsam kalibriert. In der gemeinsamen Version haben die Sorten die gleichen Modellparameter für die Teilmodelle Kälte und Wärme, aber individuelle Parameter für den Kälte- und Wärmebedarf sowie die Wechselwirkung von Kälte- und Wärmeakkumulation. Die Motivation für die gemeinsame Anpassung war zweierlei: 1) die Anpassung kürzerer phänologischer Zeitreihen zur Kalibrierung des Modells durch die Zusammenführung von Beobachtungen zu ermöglichen und 2) die Teilmodelle für Kälte und Wärme zu harmonisieren, die sehr unterschiedlich sein können, wenn das Modell für jede Sorte einzeln angepasst wird. Im Gegensatz zu der PLS-gestützten Studie von Fadón et al. (2023a) kann der PhenoFlex-Rahmen solche gemeinsamen Datensätze nutzen, die unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen erhoben wurden.

Wissenschaftliches Manuskript zur Modellparametrisierung für ausgewählte Sorten (D.2.3): In einer weiteren Studie mit der maximalen geografischen und arten- bzw. kulturspezifischen Ausdehnung, die unsere Datensätze zuließen, analysierten wir eine Teilmenge von ausreichend langen phänologischen Beobachtungen (M.2.4), die in WP1 gesammelt wurden. Die Studie wurde von Caspersen et al. (In submission) durchgeführt und ist derzeit bei der Zeitschrift *Agricultural and Forest Meteorology* eingereicht. Dieses Manuskript soll als Ergebnis D.2.3 über die Modellkalibrierung ausgewählter Kulturpflanzen dienen. Wir haben PhenoFlex-Modelle für insgesamt 110 Sorten von 7 Arten (39 Mandelsorten, 34 Süßkirscharten, 15 Birnensorten, 13 Aprikosensorten, 5 Apfelsorten, 2 europäische Pflaumensorten und 2 Pistaziensorten) von 6 Standorten kalibriert: Klein Altendorf (Deutschland), Cieza, Santomera, Zaragoza (Spanien), Meknes (Marokko) und Sfax (Tunesien) (Abbildung 5). Vor allem bei kürzeren Datensätzen ist die Wahrscheinlichkeit einer ungünstigen Aufteilung in Kalibrierung und Validierung groß, wie wir auch im Bericht über die allgemeinen Erkenntnisse aus den Modellierungsübungen (D.2.4) ausgeführt haben. Unser Ansatz zur Entschärfung dieses Problems ist die wiederholte Kalibrierung des Modells für verschiedene Kalibrierungs-/Validierungssplits und die anschließende Gewichtung der Vorhersagen auf der Grundlage des Verhältnisses der Leistung zum Interquartilsabstand (RPIQ) der Validierungsdaten. Es ist eine Herausforderung, die verschiedenen kalibrierten Modelle zusammenzufassen, daher haben wir uns entschlossen, hier auf der Ebene der Arten zu berichten (obwohl die Modelle auf der Ebene der Sorten arbeiten). Bei Kernobst (Apfel, Birne) und Steinobst (europäische Pflaume, Süßkirsche, Aprikose) beobachteten wir einen geringeren Vorhersagefehler als bei Nüssen (Mandel, Pistazie), wenn wir die Vorhersagen der gewichteten Mittelwerte der Sortenwiederholungen verwenden und den RMSE für alle Sorten einer Art zusammen berechnen (Abbildung 6). Innerhalb der Arten und zwischen den Wiederholungen für eine Sorte haben wir eine beträchtliche Variation in der Modelleistung festgestellt. Wir vermuten, dass die geringere Leistung bei Nussbaumarten darauf zurückzuführen ist, dass die klimatischen Bedingungen in Bezug auf die Kälteakkumulation bereits marginal sind. Bei der Diskussion der Ergebnisse auf dem zweiten Projekttreffen in Bonn bestätigten die Partner auch Fälle von unregelmäßiger Blüte in Tunesien und Meknes. Wir haben auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Blütenphänologie modelliert, worüber wir im Rahmen von WP4 ausführlicher berichten werden.

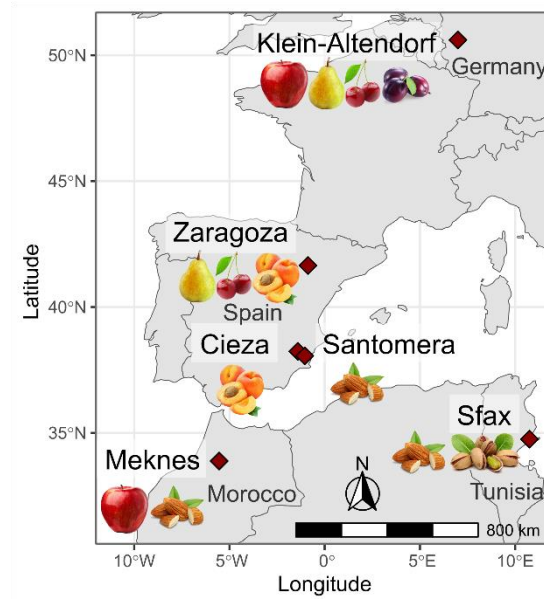


Abbildung 5. Karte mit den Standorten (rote Rauten) und den dazugehörigen analysierten Obstbaumarten.

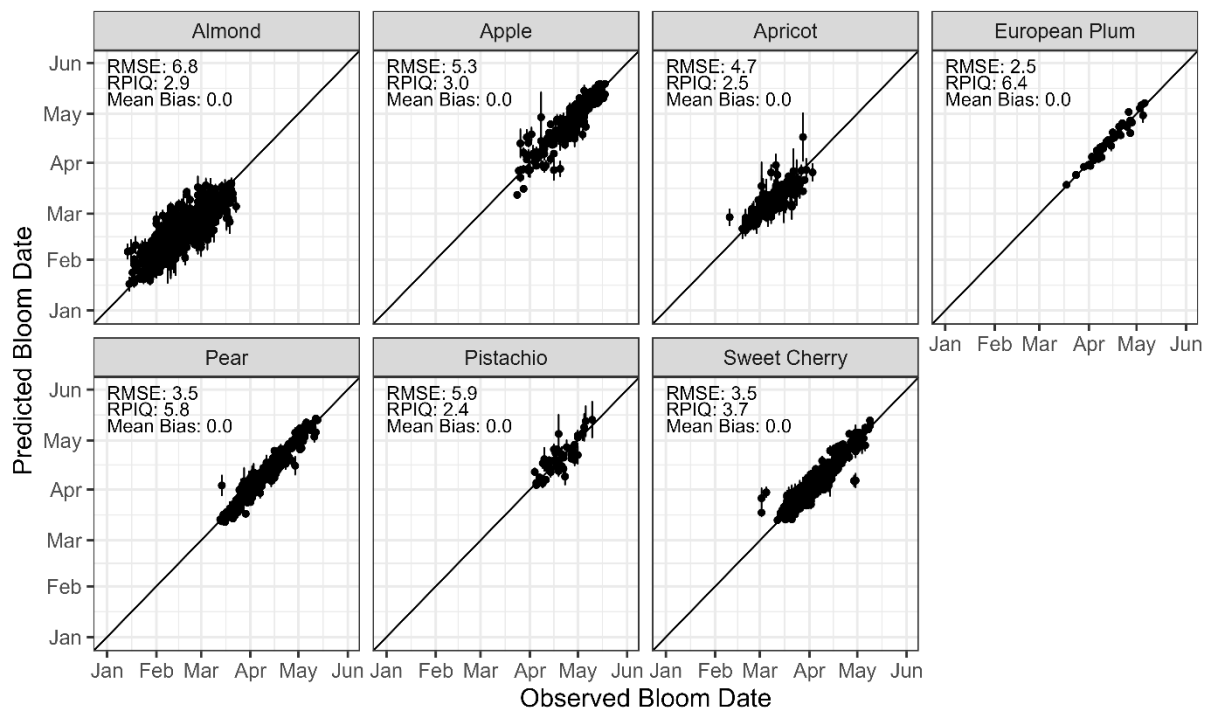


Abbildung 6. Beobachtete und vorhergesagte Blühdaten für die analysierten Obstbaumarten. Die durchgezogene Diagonale repräsentiert eine perfekte Übereinstimmung von Beobachtung und Vorhersage. Die Ergebnisse und die dazugehörigen Modellgüteparameter sind auf Artniveau, aber die einzelnen Modelle sind auf Sortenniveau kalibriert. Die Fehlerbalken an den Punkten spiegeln die Standardabweichung in der Vorhersage wider. (Entnommen aus Caspersen et al. In submission).

Weitere Ergebnisse zu WP2: Da sich die Sammlung der Langzeitbeobachtung verzögerte haben wir zunächst weitere Datensätze analysiert um das PhenoFlex Modell zu erproben. Wir haben das Modell an Blühbeobachtungen von drei Mandelsorten aus zwei Kalifornischen Standorten kalibriert. Zudem haben wir die kalibrierten Modelle verwendet, um Verschiebungen zwischen Blühzeitpunkten unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen vorherzusagen. Dabei haben wir unterschiedlich starke

Verschiebungen abhängig von den Mandelsorten festgestellt. Dies kann auf künftige Probleme bei der Bestäubung hinweisen, da Mandelsorten nicht selbstkompatibel sind und die Blühzeiträume der Bestäubersorten sich überlappen müssen. Die Arbeit fand in Kooperation von Dr. Katherine Jarvis-Shean von der UC Davies statt. Die Ergebnisse haben wir auf einer internationalen Konferenz (VIII International Symposium on Almonds and Pistachios, 07.05.2023 – 11.05.2023 in Davies, Kalifornien, USA) in Form einer mündlichen Präsentation vorgestellt. Zudem sind die Ergebnisse in der wissenschaftlichen Zeitschrift *Acta Horticulturae* erschienen (Caspersen et al., 2023). Darüber hinaus betreuen wir zwei Masterabschlussarbeiten, die das Modell für verschiedene Kulturen anwenden. Zum einen untersuchen wir dabei die Apfelsorte „Pink Crisps“ mit Beobachtungen aus Italien, Frankreich und Spanien an insgesamt sechs Standorten (Kurth et al., 2024). Die Arbeit findet in Zusammenarbeit mit der Pink Ladies Association statt. Außerdem wurde das Modell für einen überaus umfangreichen Datensatz für japanische Zierkirschen kalibriert. Die Arbeit fand in Kooperation mit Dr. Hisayo Yamane von der Universität Kyoto statt. Die Ergebnisse wurden in Form einer mündlichen Präsentation auf einer internationalen Konferenz präsentiert (V International Symposium on Woody Ornamentals of the Temperate Zone, 21.04.2025 – 25.04.2025 Matsue, Shimane, Japan) und in dem wissenschaftlichen Zeitschrift *Acta Horticulturae* publiziert (Bauer et al., In press).

WP 3 – Experimente zur Dormanz (CITA)

Versuchsprotokoll (M.3.1): Dieses Work Package beinhaltet hauptsächlich experimentelle Verfahren um die agroklimatischen Bedürfnisse der Obstbaumsorten zu bestimmen. Vorarbeiten, in denen die verfügbaren Informationen über die agroklimatischen Anforderungen von Steinobst zusammengestellt wurden, zeigten verschiedene Lücken in den verfügbaren Informationen auf, darunter fehlende Informationen über die meisten derzeit angebauten Sorten und über die verwendeten Methoden. Diese Übersicht zeigte, dass die wichtigsten neuen Herausforderungen die Standardisierung der Bedingungen für jede Methode und ein Mangel an biologischen Markern für die Knospendormanz sind (Fadón et al., 2020). Im WP3 trugen wir zur Ausarbeitung eines gemeinsamen Versuchsprotokolls zur Bestimmung der agroklimatischen Anforderungen bei, das von allen AdaMedOr-Partnern genehmigt und angenommen wurde.

Berichte zu den Experimenten (D.3.1, D.3.2): Alle Projektpartner führten Versuche durch, um die agroklimatischen Anforderungen zahlreicher Arten und Sorten zu ermitteln. In Spanien haben wir unter der Leitung von CITA die agroklimatischen Anforderungen von 132 Sorten von 4 Obstbaumarten der gemäßigten Zonen (5 Mandelsorten, 5 Süßkirschensorten, 16 Aprikosensorten und 96 japanische Pflaumensorten) an zwei Standorten experimentell bestimmt: Extremadura und Aragón), über einen Zeitraum von mindestens 2 Jahren. Ähnliche Anstrengungen unternahmen wir in Marokko unter der Leitung von USMS und ENA. Dort haben wir 8 Arten (Pfirsich, Mandel, europäische Pflaume, Aprikose, Süßkirsche, Apfel, Birne, Olive) und 65 Sorten an vier Standorten in Marokko (Meknes, Ain Taoujdate, Khénifra, Azrou und Imouzar-Kandar) über zwei Jahre hinweg analysiert. Auch in Tunesien wurden unter der Leitung des INAT Stecklingsversuche durchgeführt. Es wurden Stecklinge von 6 Pfirsich- und 4 Pflaumensorten gesammelt, die in warmen tunesischen Obstgärten angebaut wurden. Diese Studie wurde in den Jahren 2022 und 2023 in Medjez El Bab in der Region Beja im Nordwesten Tunesiens (36°38'58" N; 9°36'44" E) durchgeführt. Die Projektpartner in Marokko führten umfangreiche Versuche durch, um die agroklimatischen Anforderungen von 74 Mandel-, Apfel-, Aprikosen-, Oliven-, Pfirsich- und Nektarinen-, Birnen-, Pflaumen- und Süßkirschensorten zu ermitteln

Wissenschaftliches Manuskript zu den Experimenten (D.3.3): Auf der Grundlage dieser Ergebnisse haben wir vier Arbeiten veröffentlicht: Guerrero et al. (2024) analysierten 21 japanische Pflaumensorten in Aragón und Extremadura (Spanien), Herrera (2022) (auch in WP1 erwähnt) analysierte 16 Aprikosensorten, und Santolaria et al. (2023) analysierten 12 Süßkirschensorten. Zudem verglich Delgado et al. (2024a) verschiedene Methoden um die agroklimatischen Bedürfnisse von 20

Sorten von 4 Steinobstarten (6 Mandelsorten, 3 Aprikosensorten, 6 japanische Pflaumensorten und 5 Süßkirschensorten) in mindestens zwei Ländern an drei Standorten in Spanien (Murcia, Extremadura und Aragón), Deutschland (Bonn), Marokko (Meknes) und Tunesien zu bestimmen. Dabei wurde deutlich wie unterschiedlich die bestimmten agroklimatischen Bedürfnisse sein können, abhängig von der Methode die verwendet wurde. Die Arbeiten wurden in *Agricultural and Forest Meteorology*, *Frontiers in Plant Science* und *Acta Horticulturae* veröffentlicht. Außerdem haben wir die Ergebnisse von Delgado et al (2024a) auf zwei Kongressen in Avignon (Delgado et al., 2024c) und Teneriffa (Delgado et al., 2024b) vorgestellt.

Weitere Ergebnisse zu WP3: Unter der Leitung von CITA und aufbauen auf früheren Arbeiten (Fadón et al., 2021a) wurde an männlicher Meiose als Bioindikatoren für das Erfüllen des Kältebedarfs bei Süßkirschen und Aprikosen gearbeitet. Die Methode wurde validiert (Herrera et al., 2022) und auf verschiedene Aprikosensorten angewandt (Fadón et al., 2024, 2023d, 2023e). Die Ergebnisse wurden in der wissenschaftlichen Zeitschrift *Plants* und auf zwei wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt: I International Symposium on Apricot and Plum, 22 – 25 April 2024 in Avignon, Frankreich (Posterpräsentation) und auf dem XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas in Mérida, Spanien im Juni 2023 (mündliche Präsentation).

WP 4 – Projektionen / Vorhersagen (Uni Bonn)

In diesem Work Package planten wir ursprünglich, die Vorhersagen von prozessbasierten Modellen wie dem PhenoFlex-System mit Nischenmodellen zu kombinieren. Während die Entwicklung des prozessbasierten Modells erfolgreich war und für viele Arten und Sorten gut funktionierte (siehe WP2), wurde die Verwendung von Nischenmodellen durch den Mangel an räumlich expliziten Eingangsdaten behindert. Dem Konsortium gelang es, Zugang zu arten- und sortenbezogenen Anbauflächendaten auf nationaler und regionaler Ebene zu erhalten (siehe WP1). Zur Parametrisierung von Nischenmodellen werden jedoch Daten mit einer höheren räumlichen Auflösung benötigt. Nichtsdestotrotz konnten wir im Rahmen des Projekts wertvolle Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels erstellen.

Analysesystem für die Auswirkungen des Klimawandels auf Obstbäume (M.4.1): Der Inhalt des Masterkurses „Tree phenology analysis with R“, der an der Universität Bonn angeboten und von Prof. Dr. Eike Luedeling gelehrt wird, deckt alle Methoden ab, die wir zur Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf Obstbäume verwendet haben (Luedeling, 2024). Ein kursbegleitendes E-Book ist öffentlich verfügbar. Es beinhaltet die Konzepte und den zur Durchführung der Analysen benötigten Code (http://inresgb-lehre.iaas.uni-bonn.de/chillR_book/introduction.html).

Phänologievorhersagen (M.4.2, M.4.3): Wir verwendeten kalibrierte Phänologiemodelle des in WP2 vorgestellten Datensatzes und prognostizierten die Auswirkungen des Klimawandels auf die Blühzeitpunkte. Wir fassten die Ergebnisse auf Artenebene zusammen (Abbildung 7), wobei wir auch die Unsicherheiten hervorhoben, die davon abhängen, welches globale Zirkulationsmodell (GCM) verwendet wurde. Außerdem haben wir die Ergebnisse auf Sortenniveau für die Blüherschiebungen (Abbildung 8) und Risiko für Blühausfälle (Abbildung 9) zusammengefasst. Die Ergebnisse sind Teil des wissenschaftlichen Manuskripts von Caspersen et al. (In submission) und wurden in dem wissenschaftlichen Zeitschrift *Agricultural and Forest Meteorology* eingereicht. Im Folgend schildern wir die wichtigsten Ergebnisse der jeweiligen Kulturen.

- Apfel:
 - Klein-Altendorf (Deutschland): Deutlich frühere Blühtermine (~20 Tage) könnten das Frostrisiko während der Blüte und der frühen Fruchtentwicklung erhöhen und möglicherweise zu Ertragseinbußen führen. Es gibt Sortenunterschiede, wobei die Sorte 'Berlepsch' weniger betroffen ist als andere.

- Meknes (Marokko): Keine erhöhten Risiken für Blühausfälle unter SSP1 und SSP2, aber Verzögerungen bei der Blüte (~20 Tage in SSP2) könnten zu ungeeigneten hohen Temperaturen für die Bestäubung und Fruchtentwicklung führen. Unter pessimistischen Szenarien (SSP3, SSP5) hohe bis sehr hohe Risiken für Blühausfälle
- Birne:
 - Klein-Altendorf (Deutschland): Frühere Blüte erhöht das Frostrisiko, ähnlich wie bei Apfel.
 - Zaragoza (Spanien): Niedriges Risiko für Blühausfall unter SSP1 und SSP2, wenn die Anforderungen an Kältereiz erfüllt sind und sich der Blühtermin nur minimal ändert, aber unter SSP3 könnte die Rentabilität aufgrund der verzögerten Blüte und der hohen Temperaturen sinken. SSP5 würde Birnenplantagen wegen unzureichender Kühlung unrentabel machen.
- Europäische Pflaume:
 - Klein-Altendorf: Frühere Blühtermine in allen Szenarien, könnte erhöhte Frostgefahr mit sich ziehen
- Aprikose:
 - Zaragoza (Spanien): Leichte Verzögerungen der Blüte unter pessimistischen Bedingungen (SSP5) für 2085, in anderen Szenarien ähnliche Blühtermine wie unter jetzigen Bedingungen. Risiko für Blühausfälle gering, lediglich in den pessimistischsten Szenarien nahe 20%
 - Cieza (Murcia, Spanien): Erhebliche Verzögerungen der Blüte in allen Szenarien, wobei der Kältereizbedarf in mehr als 80 % der Jahre nur unter SSP1 erfüllt wird. In wärmeren Szenarien (SSP3 und SSP5) kann es in 65-76 % der Jahre zu Kältereiz-Problemen kommen, die die Produktion beeinträchtigen. Die Sorten 'Búlida' und 'Canino' scheinen weniger stark von verspäteter Blüte und erhöhten Blüteausfallrisiko betroffen zu sein als übrige Sorten
- Süßkirsche:
 - Klein-Altendorf: Eine um 10-15 Tage vorgezogene Blüte kann erhöhtes Frostrisiko mit sich bringen.
 - Zaragoza: Optimale Produktion unter SSP1 und SSP2, mit ähnlichen Bedingungen wie jetzt. SSP3 führt zu einer deutlichen Verzögerung der Blüte
- Mandel:
 - Santomera (Spanien): Niedriges Risiko für Blühausfälle unter SSP1 und SSP2, aber stark beeinträchtigt unter SSP3 und SSP5 aufgrund von Blühverzögerungen und geringerem Kältereiz
 - Meknes (Marokko): stabile Blühtermine und niedriges Blühausfallrisiko unter den meisten Szenarien, mit Ausnahme von SSP5 in der verzögerten Blüte und höhere Risiken von Ausfall möglich sind
 - Sfax (Tunesien): generell Trend für verzögerte Blüte, aber niedrige Risiken für Ausfälle unter SSP1, aber nicht unter SSP3 und SSP5 wegen mangelhaften Kältereiz
- Pistazie:
 - Sfax (Tunesien): stark-verspätete Blüte gekoppelt an hohen Ausfallrisiken in allen Szenarien, selbst unter SSP1. Zudem haben Pistazien komplexe Anforderungen an überlappende Blühzeitfenster von Pollenspender und Empfänger, welche unterschiedliche Sorten sind.

Wissenschaftliches Manuskript zu Vorhersagen der Obstbaumphenologie und künftiger räumlicher Verteilung (D.4.1): Aufgrund des Mangels an räumlich expliziten Daten konnten wir die ursprünglich geplante Nischenmodellierung nicht durchführen. Die für mehrere Standorte in den Partnerländern kalibrierten Phänologiemodelle, die für den vorherigen Meilenstein vorgestellt wurden, geben Hinweise darauf, welche Standorte für die Arten unter dem Klimawandel lebensfähig sind.

Wir haben die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels skaliert, indem wir die Veränderung des „Safe Winter Chill“ (SWC; d. h. die Kältemenge, die in 90 % der Jahre erreicht oder überschritten wird) für den Mittelmeerraum berechnet haben. Wir interpolierten die SWC-Anteile auf der Grundlage eines Ansatzes, der in einer Fallstudie über Südamerika demonstriert wurde (Fernandez et al., 2021a). Bei diesem Ansatz interpolieren wir die SWC auf der Grundlage von Kriging und korrigieren dann die Schätzfehler mit Hilfe von Hilfsvariablen, deren räumliche Verteilung bekannt ist. Auf diese Weise konnten wir die Veränderung der SWC für die meisten Orte im Mittelmeerraum zusätzlich zu den Orten, die durch Wetterstationsaufzeichnungen abgedeckt sind, schätzen. Die Studie wurde von Fernandez et al. (2023) durchgeführt und in der Zeitschrift *Regional Environmental Change* veröffentlicht. Für Nordafrika, z. B. in den Küstengebieten Tunesiens oder Marokkos, haben wir unter RCP4.5 bis 2050 einen Rückgang des SWC um etwa 20 Chill Portions (CP) projiziert (Abbildung 10). In ähnlicher Weise schätzten wir Abnahmen von 5 bis 10 CP rund um die Mittelmeerküste in Südeuropa, was einen Kontrast zu leichten Zunahmen in höher gelegenen Gebieten bildet. Unter RCP 8.5-Bedingungen prognostizieren wir einen alarmierenderen Rückgang der SWC bis 2050, insbesondere in Nordafrika, mit einer Abnahme von bis zu 30 CP. Darüber hinaus schätzten wir einen Rückgang der SWC um 10 bis 15 CP in Portugal sowie im Süden und Südwesten Spaniens. Wir ergänzten diese Analyse mit dem Expertenwissen aller Partner des AdaMedOr-Konsortiums. In Nordspanien, einer Region mit relativ kalten Wintern und hoher Kälteakkumulation, könnte die zunehmende Häufigkeit von milden Wintern die Knospendifferenzierung der angebauten Sorten mit hoher Kälte beeinträchtigen. In Südspanien und Tunesien betonten die Experten das Risiko einer verzögerten oder verlängerten Blüte, einer heterogenen Blüte und einer geringen Fruchtqualität aufgrund der wärmeren Temperaturen im Winter und während der Vegetationsperiode. Viele Experten erwarten unter künftigen Bedingungen eine zunehmende Asynchronität zwischen Pollenspendern und -empfängern bei selbstinkompatiblen Sorten. Experten aus Südspanien wiesen auf die Gefahr von physiologischen Störungen als Reaktion auf die warmen Bedingungen im Winter hin.

Weitere Ergebnisse zu WP4: Es wurden weitere Manuskripte zu dem Themenbereich Vorhersage von Agroklimatischen Bedingungen geschrieben. Unter der Leitung von CEBAS-CSIC projizierten Egea et al. (2022) künftige Verteilungen an Kältereiz (chill portions) und Wärmestunden (growing degree hours) für die wichtigsten Steinfruchtanbaugebiete Spaniens. Die Studie erschien in der wissenschaftlichen Zeitschrift *Frontiers in Plant Science*. Unter der Leitung von CITA erschienen zwei weitere wissenschaftliche Manuskripte bei denen durch PLS-Regression ermittelte agroklimatische Bedürfnisse mit zukünftigen Projektionen verglichen wurden. Analysiert wurden sieben Süßkirschsorten in Aragón (Fadón et al., 2023c) und 21 jap. Pflaumensorten in Extremadura und Aragón (Guerrero et al., 2024). Die Manuskripte erschienen in den wissenschaftlichen Zeitschriften *Frontiers in Plant Science* und *European Journal of Agronomy*.

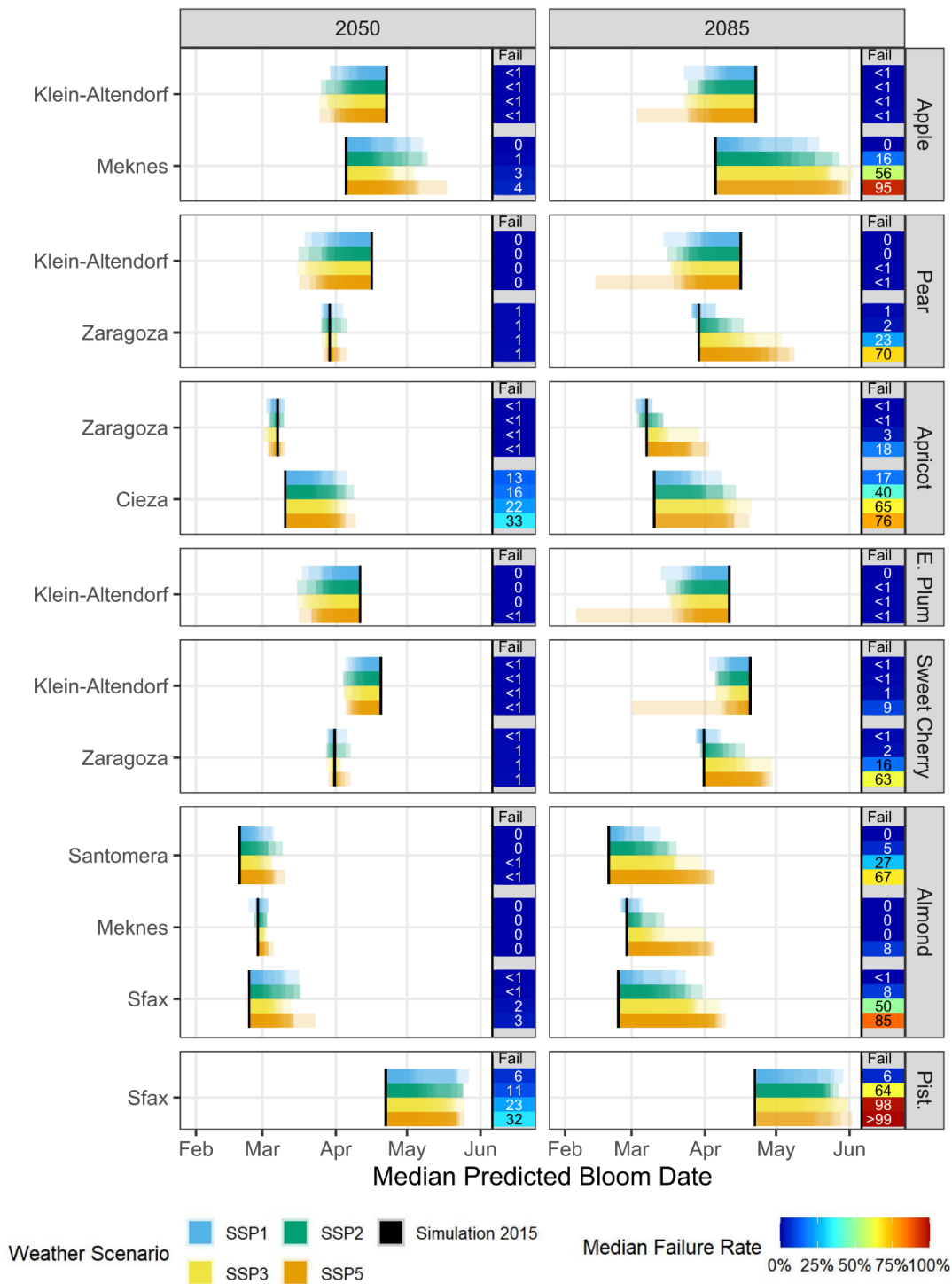


Abbildung 7. Veränderungen der medianen Blühtermine im Vergleich zu den simulierten Bedingungen von 2015 (schwarze vertikale Linien) zu den projizierten zukünftigen Bedingungen für vier verschiedene gemeinsame sozioökonomische Pfade SSP1 (blauer horizontaler Streifen), SSP2 (grün), SSP3 (gelb), SSP5 (orange) im Jahr 2050 (links) und 2085 (rechts) mit der medianen Rate der nicht erfüllten thermischen Anforderungen (Heatmap). Die Verschiebungen wurden für jedes General Circulation Model (GCM) berechnet, eine satte Füllung der farbigen Streifen zeigt die Übereinstimmung zwischen den GCMs an, während zunehmend transparente Streifen eine geringe Übereinstimmung zwischen den GCMs anzeigen (Caspersen et al., in submission).

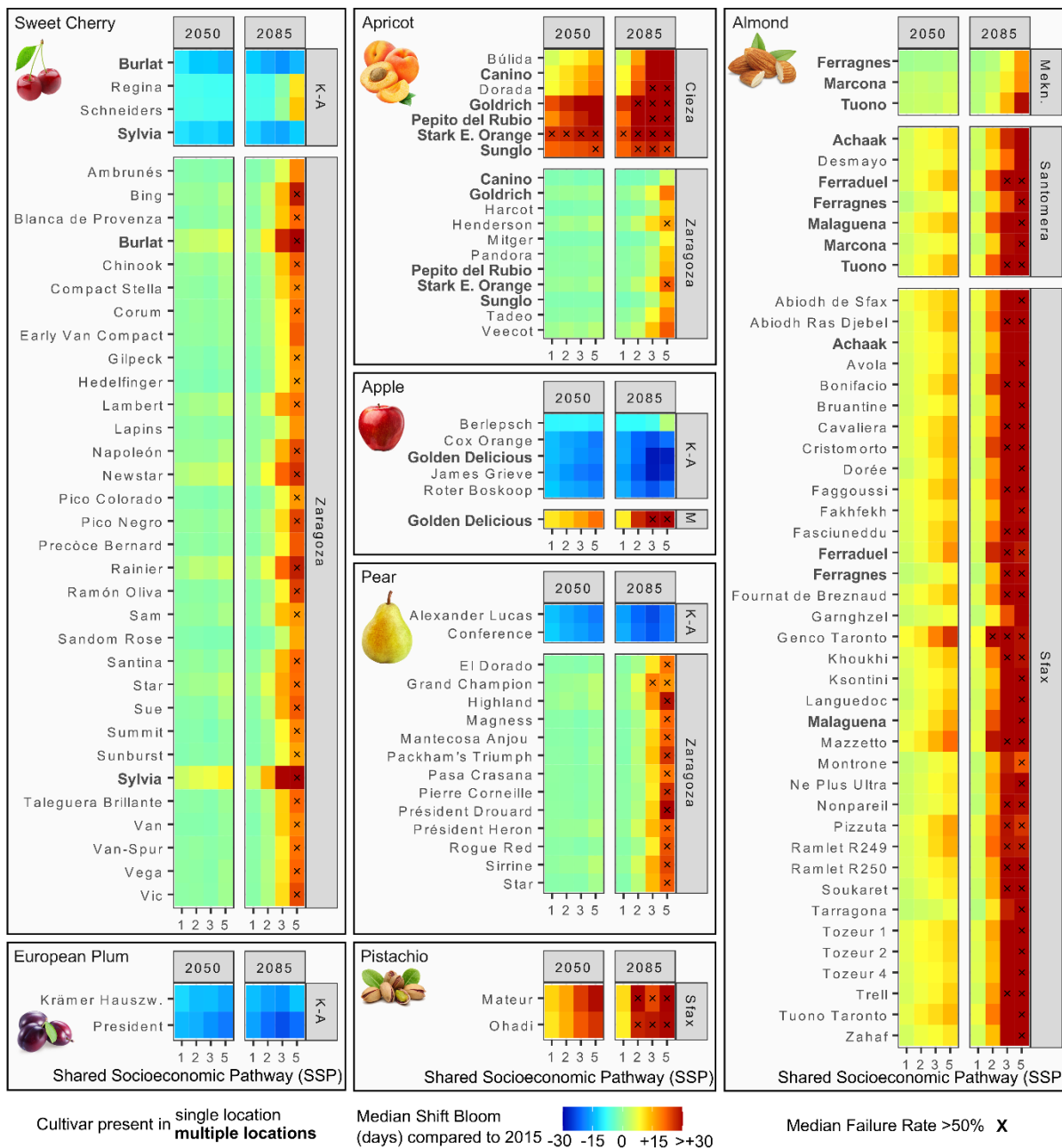


Abbildung 8. Heatmap mit den Verschiebungen des mittleren Blühdatum (Tage) für vier verschiedene gemeinsame sozioökonomische Szenarien (SSP1, SSP2, SSP3, SSP5), zusammengefasst auf Sortenniveau. Sorten mit Beobachtungen von mehreren Standorten sind fett markiert. Der modellierte Standort Klein-Altendorf wird mit „K-A“ abgekürzt und Meknes mit „Mekn.“ und „M“ (Caspersen et al., in submission).

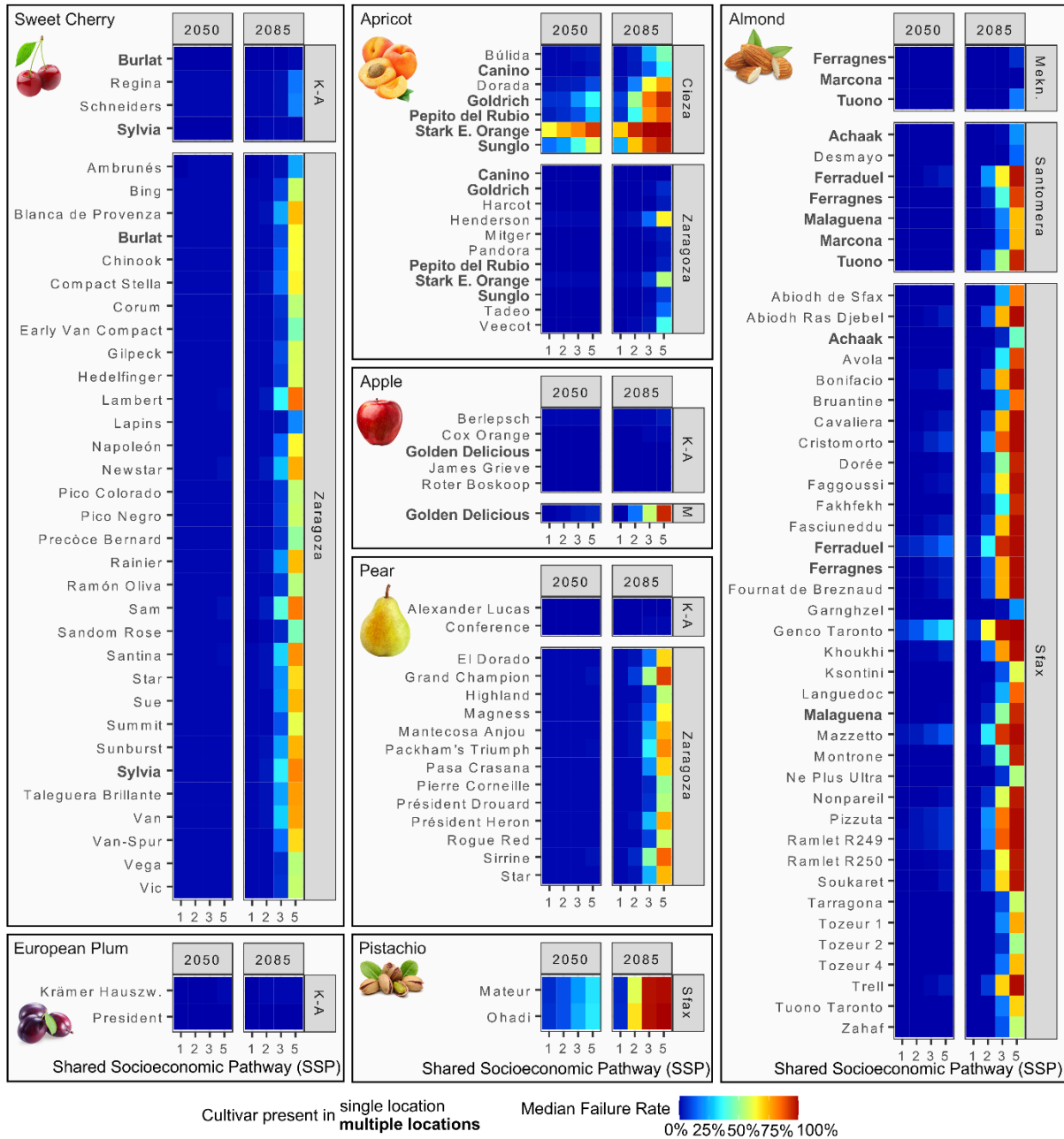


Abbildung 9. Heatmap mit den Raten der nicht erfüllten agroklimatischen Bedürfnissen (%) für vier verschiedene gemeinsame sozioökonomische Szenarien (SSP1, SSP2, SSP3, SSP5), zusammengefasst auf Sortenniveau. Sorten mit Beobachtungen von mehreren Standorten sind fett markiert. Der modellierte Standort Klein-Altendorf wird mit „K-A“ abgekürzt und Meknes mit „Mekn.“ und „M“ (Caspersen et al., in submission).

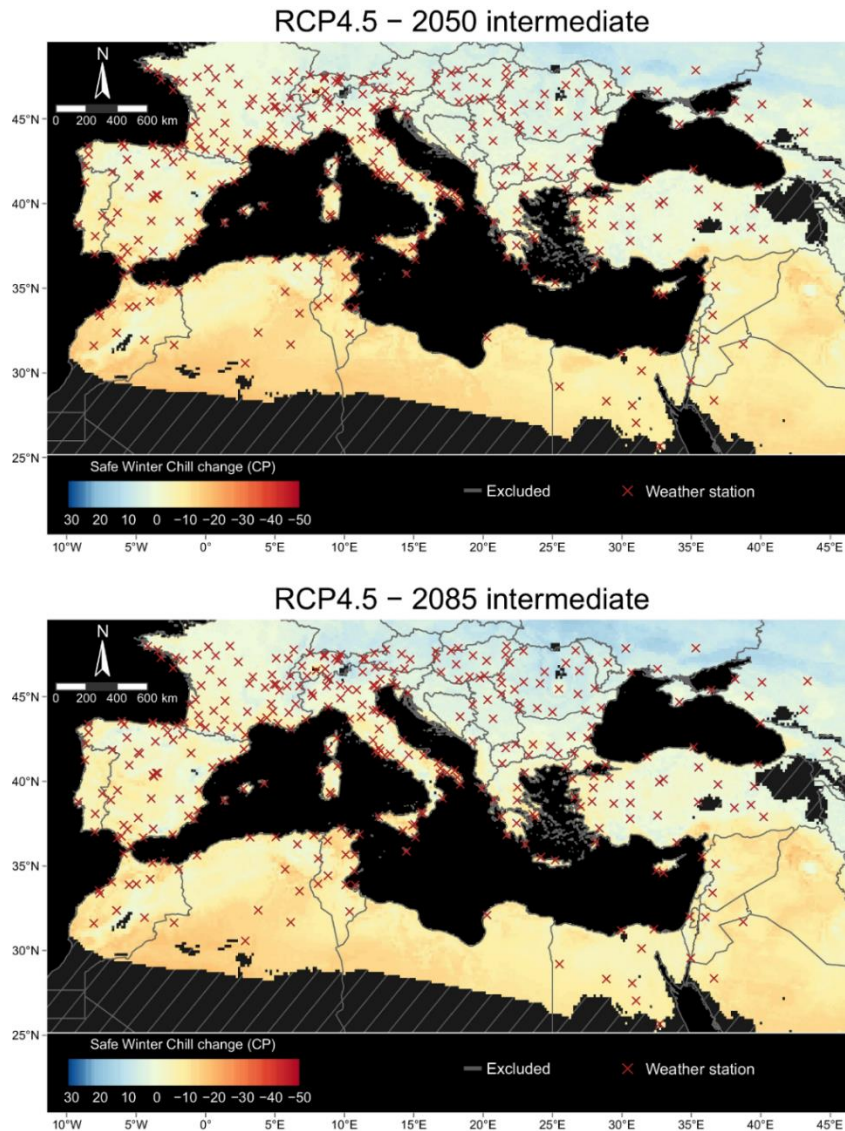


Abbildung 10. Schätzung der Veränderung der sicheren Winterkälte für den Mittelmeerraum unter dem RCP4.5-Szenario für zwei Zeithorizonte (2050 und 2085) im Vergleich zu historischen simulierten Szenarien. In beiden Panels zeigen wir den Unterschied in der SWC zwischen der jeweiligen Kombination aus Zukunftsszenario und Jahr und dem Median der historischen simulierten Szenarien zwischen 1975 und 2019. Für die Zukunftsszenarien haben wir die Ergebnisse der „mittleren“ Klimamodellklasse verwendet (mittlerer SWC-Wert unter 15 allgemeinen Zirkulationsmodellen). Die grau schraffierten Bereiche in den Karten stellen Regionen dar, die aus dem 3D-Korrekturmodell ausgeschlossen wurden. Die roten Kreuze stellen die Standorte der in der Analyse verwendeten Wetterstationen dar (Fernandez et al., 2023).

WP 5 – Beratung (IO)

Berichte zu den Workshops (D.5.1): Es wurde eine Reihe an Workshops in Tunesien (unter der Leitung von IO, INAT und AgMed) und Marokko (unter der Leitung von USMS) durchgeführt. So gab es Infotage, Trainings und wissenschaftliche Foren. Im Vordergrund standen die Themen wie physiologische Störungen von Obstbäumen durch mangelhaften Kältereiz und die Folgen für Fruchtqualität und Ertrag, voraussichtliche Trends von agroklimatischen Variablen wie Kälte- und Wärmereiz in Reaktion auf den Klimawandel und Anpassungsmöglichkeiten. Die Veranstaltungen richteten sich vor allem an Anbauer und Berater. Außerdem wurde in einer Umfrage die Perspektive der Anbauer auf den

Klimawandel erfasst. Auch in Marokko wurden Veranstaltungen organisiert. So gab es zum Beispiel eine dreitägige Veranstaltung mit Anbauern zu den Themen Klimawandelfolgen auf Blühzeitpunkt und -erfolg, mögliche Anpassungsmaßnahmen und Auswahl an angepassten Sorten. Solche Veranstaltungen fanden für verschiedene Kulturen wie Mandel oder Apfel statt. Auch die spanischen Partner von CEBAS-CSIC und CITA hatten einen engen Draht zu den Anbauern geknüpft. So ist CEBAS-CSIC Mitglied eines Konsortiums von verschiedenen Anbaugemeinschaften und -kooperativen verteilt über den Osten und Süden von Spanien. Auch das CITA-Team unterhält ein Netzwerk an Stakeholdern, vor allem in der Region Aragón im Norden Spaniens. Die Akteure von dem AdaMedOr haben die Netzwerke genutzt um die hier gesammelten Erkenntnisse zu verbreiten.

Portfolios von klimawandelangepassten Obstbaumarten und -sorten (D.5.2, M.5.1, M.5.2): Während des Projekts erwarteten wir, Methoden zur Quantifizierung des Risikos von agroklimatischen Engpässen zu entwickeln und diese mit anderen relevanten Entscheidungskriterien der Landwirte zu kombinieren. Die Grundidee war, dass die Wahrnehmung der Landwirte bezüglich der Sicherheit einer bestimmten Sorte von Kulturpflanzen im agroklimatischen Sinne wahrscheinlich mit anderen relevanten Aspekten wie erwarteten Erträgen, Preisen oder Wasserbedarf verknüpft ist. Die aktuellen Karten der kumulierten Kälteeinheiten oder Prognosen zu Veränderungen in der Blütenphänologie berücksichtigen solche Aspekte nicht. Je nach Risikobereitschaft der Landwirte können unterschiedliche Sorten von Kulturpflanzen optimal sein, was wir als Obstbaum-Portfolios bezeichneten. Obwohl wir mehrere Schritte in Richtung des Ziels, Obstbaum-Portfolios zu entwickeln, unternommen haben, konnten wir das versprochene Endprodukt nicht liefern. Wir haben die meisten notwendigen Zutaten wie die Quantifizierung der agroklimatischen Anforderungen und die Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels zusammengestellt. Auch die Outreach-Aktivitäten und Feldbefragungen sammelten die Perspektiven der Landwirte zum Klimawandel. Trotzdem gelang es uns nicht, die Zutaten zu einem Endprodukt zu kombinieren. Die Zusammenstellung der Daten dauerte länger als erwartet, was die Modellierungsaktivitäten behinderte. Auch die Kalibrierung des Modells war langsamer und herausfordernder als erwartet, und die Datensätze, mit denen PhenoFlex zuerst getestet wurde, waren viel länger als die zusammengetragenen phänologischen Aufzeichnungen der meisten Sorten. Personalwechsel an der Universität Bonn verlangsamten den Fortschritt der entsprechenden Projektaktivitäten. Darüber hinaus erschwerten Reisebeschränkungen aufgrund der Pandemiesituation die Zusammenarbeit zwischen den Partnern des Konsortiums und machten die Durchführung partizipativer Workshops schwierig. Dennoch sind wir überzeugt, dass die insgesamt während des AdaMedOr-Projekts erzielten Erfolge den nicht erreichten Liefergegenstand des Obstbaum-Portfolios kompensieren.

WP 6 – R Paket (Uni Bonn)

R-Funktionen und Vignette für die Modellierung der Phänologie von Bäumen (D.6.1): Im Verlauf des AdaMedOr-Projekts haben wir die Möglichkeiten des bereits bestehenden R-Pakets chillR (Luedeling et al., 2023) erweitert. Wir integrierten das PhenoFlex-Framework (Luedeling et al., 2021), das neu entwickelte Phänologiemodell für Obstbäume, und fügten 17 neue Funktionen in Bezug auf dieses Framework hinzu. Die Funktionen ermöglichen es den Benutzern, das Modell zu benutzen, zu parametrisieren und auszuwerten. Wir haben den Arbeitsablauf zur Parametrisierung und Auswertung des PhenoFlex-Frameworks in einer Vignette (Urbach et al., 2021) dokumentiert, die eine ausführliche Dokumentation des Pakets darstellt. Das Modell wurde in mehreren Artikeln in Fachzeitschriften verwendet und dokumentiert, wie unter WP2 erwähnt. Wir haben auch Möglichkeiten zur Verbesserung des Anpassungsprozesses erforscht, indem wir dem von Egea et al. (2021) beschriebenen Ansatz folgten. Wir haben auch Ansätze entwickelt, um die vorhergesagten Blühtermine als innerhalb oder außerhalb der für die Blüte geeigneten Bedingungen liegend zu klassifizieren. Sowohl die zweite Version der Modellkalibrierung als auch der Blühklassifizierungsansatz müssen noch in das Paket integriert werden.

R-Funktionen und Vignette für die Projektion der Auswirkungen des Klimawandels auf die Phänologie der Bäume (D.6.2): Das chillR-Paket ist im Rahmen des Master-Universitätskurses „Tree phenology analysis with R“ gut dokumentiert. Wir haben ein kursbegleitendes und öffentlich zugängliches E-Book entwickelt (Luedeling, 2024). Dieses E-Book veranschaulicht die wichtigsten Konzepte der Winterruhe bei Laubbäumen, der Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels und der phänologischen Analyse. Die Arbeitsabläufe für die Analyse werden im E-Book dokumentiert und erläutert, so dass die Leser die Analyse an ihrem Standort nachvollziehen können. Der Kurs richtet sich vor allem an Masterstudenten der Studiengänge „Nutzpflanzenwissenschaften“ und „Agrarwissenschaften und Ressourcenmanagement in den Tropen und Subtropen“ an der Universität Bonn, war aber auch für Nicht-Studenten offen. In den letzten Jahren nahmen auch Doktoranden und Forscher aus dem AdaMedOr-Konsortium teil. Von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit AdaMedOr-Workflows sind Kapitel 4 („Klimawandel und Auswirkungsprojektion“), in dem wir die allgemeinen Konzepte der Klimawandelanalyse erläutern, und Kapitel 5 („Winterchill-Projektionen“), das Fallstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Winterchill enthält. Die Kapitel 15 („Zukünftige Temperaturszenarien“), 16 („Erstellung von CMIP6-Szenarien“) und 18 („Darstellung von Zukunftsszenarien“) zeigen dann, wie eine moderne Analyse der Auswirkungen des Klimawandels durchgeführt werden kann. Diese Kapitel stützen sich auf weitere Funktionen, die während des AdaMedOr-Projekts hinzugefügt wurden und die es dem Benutzer ermöglichen, auf die neueste Generation von Klimawandelprojektionen zuzugreifen, die vom Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) bereitgestellt werden (Eyring et al., 2016). Wir haben vier Funktionen hinzugefügt, die es den Nutzern ermöglichen, die CMIP6-Daten herunterzuladen und zu entpacken und sie zu Temperaturszenarien zu verarbeiten. Diese Temperaturszenarien können in Kombination mit Wettergeneratoren verwendet werden, um robuste Projektionen der Auswirkungen des Klimawandels zu erstellen.

R-Funktionen und Vignette für die Generierung von Baumkultursortenportfolios (D.6.3): Wie wir bereits in WP5 erklärt haben, ist es uns nicht gelungen, die Obstbaumportfolios bis zum Ende des Projekts zu entwickeln. Folglich verfügen wir auch nicht über fertige R-Funktionen und Vignetten für die Portfolio-Generierung.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Personalkosten: 251,065.40 €

Im Projekt wurden zwei Doktoranden beschäftigt auf jeweils 65% Basis. Zwischen November 2021 und März 2022 war eine der beiden Stellen vakant aufgrund eines Personalwechsels.

Dienstreisen: 8,102.24 €

Hauptpunkte sind eine Reise nach Meknes, Marokko für ein AdaMedOr Projekttreffen (~ 1,100€), sowie Konferenzbesuche in Bavendorf, Angers (Frankreich) und Davis (USA) (alle drei zusammen ~3600€). Hinzu kommen Reisekosten für die Teilnahme an dem zweiten Projekttreffen von AdaMedOr in Bonn von Dr. Eduardo Fernandez (~1,000), ehemaliger Mitarbeiter an der AG Gartenbau und nun Assistenzprofessor an der Uni Valparaiso in Chile.

Sonstiges: 13,372.81 €

Ein Teil der Kosten geht auf die Bewirtung des zweiten Projekttreffens in Bonn (~1,500€), desweiteren wurden Chemikalien und Ausrüstung für Dormanzversuche (siehe WP3) gebraucht

(~1,600€). Hinzu kommen noch weitere Ausgaben für DNS-Sequenzierungen von Kirschknospen in verschiedenen Stadien der Dormanzphase (~10,000€).

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Projekt hat viele Erfolge zu verbuchen. Insgesamt wurden mehr als 20 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften erzielt, dabei 11 unter Beteiligung des Teams der Uni Bonn. Obwohl nicht alle Ziele erreicht werden konnten, vor allem die Manuskripte zu der Nischenmodellierung und der Obstbaumportfolios, sind wir optimistisch, dass die Erfolge der anderen Work Packages dies kompensieren können.

Voraussichtlicher Nutzen, Verwendbarkeit der Ergebnisse, Planungen für die nähere Zukunft

Das publizierte Phänologiemodell PhenoFlex erfreut sich der Aufmerksamkeit der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Das dazugehörige Paper wurde bereits häufig zitiert, außerdem haben bereits mehrere Studien ohne direkte Beteiligung des Bonner Team das Modell verwendet und die Ergebnisse in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert. So wurde das Modell für die Phänologie von Äpfeln (Wyver et al., 2024) und Oliven verwendet (Didevarasl et al., 2023), sowie für aerobiologischen Beobachtungen von Oliven (Picornell et al., 2023) und *Platanus spec* (Picornell et al., 2024). Das Interesse an dem Modell scheint groß zu sein, so hatten wir während des Projektverlaufs Gastaufenthalte von Wissenschaftlern aus Spanien und Rumänien, die in der Zeit in Bonn die Verwendung des Modells und die Durchführung der Klimawandelfolgenprojektionen erlernten. Außerdem haben wir in einem Projekt zusammen mit der Pink Lady Growing Association Vorhersagen für mehrere Standorte in Spanien, Frankreich und Italien durchgeführt, was auch das Interesse der Anbauer und der Privatwirtschaft an dem Modell und den hiergewonnenen Erkenntnissen widerspiegelt.

Die erfolgreiche Kollaboration zwischen den Partnern motiviert uns weiterhin zusammenzuarbeiten. Es wurde ein Projektantrag zwischen Uni Bonn, CEBAS-CSIC und CITA für einen DFG-Ausschreibung zum Thema „Climate Science“ geschrieben. Der Antrag war jedoch nicht erfolgreich, da sich die Ausschreibung eher an grundlegende Klimasystemforschung richtete und nicht an Klimawandelauswirkungen wie in diesem Projekt. Auch an weiteren nachfolgenden Projekten wird gearbeitet, so etwa mit der Uni Stellenbosch in Südafrika oder der Universität Valparaiso in Chile.

Fortschritte anderer auf dem Gebiet des Vorhabens während des Projekts

Während des Projekts wurden zwei Studien publiziert, die andere Phänologiemodelle vorstellen. In Chmielewski et al (2023) wird ein Phänologiemodell vorgestellt, bei dem die Erkenntnisse aus traditionellen chill-forcing Experimenten (wie in WP1), Pflanzenhormonmessungen und übliche Kältereiz- und Wärmereizmodelle miteinander verwoben werden. Während der Anspruch eines mehr pflanzenphysiologisch-orientierten Modells attraktiv ist, erfordert dieses Modell noch mehr langwierige Messungen, bevor es eingesetzt werden kann. Auch das vorgestellte Modell von Orozco et al. (2024) hat den Anspruch, die messbare Pflanzenphysiologie während der Dormanz besser widerzuspiegeln. Dieses Modell beruht nicht auf den sonst üblichen Kälte- und Wärmereizmodellen. Stattdessen beruht es auf den gemessenen Haushalt von nicht-strukturellen Kohlenstoffen wie Stärke und wasserlöslichen Zuckern (C-T Modell) (Sperling et al., 2019; Sperling and Zwieniecki, 2021). Während Blühzeitpunktvorhersagen für Mandeln in Reaktion auf den Klimawandel von Orozco et al. (2024) sich stetig verfrühende Blühzeitpunkte voraussagen, deuten PhenoFlex Modelle für Mandeln in Kalifornien (Caspersen et al. 2023) und vergleichbaren Regionen wie dem Mittelmeerraum (Caspersen et al. In submission) eher auf stagnierende bis sich verspätende Blühzeitpunkte hin.

Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Siehe Annex I und Annex II, zudem Beiträge auf Konferenzen in Annex III und Beiträge in nichtwissenschaftlichen Medien in Annex IV

Bibliographie

- Abou-Saaid, O., El Yaacoubi, A., Moukhli, A., El Bakkali, A., Oulbi, S., Delalande, M., Farrera, I., Kelner, J.-J., Lochon-Menseau, S., El Modafar, C., 2022. Statistical approach to assess chill and heat requirements of olive tree based on flowering date and temperatures data: Towards selection of adapted cultivars to global warming. *Agronomy* 12, 2975.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12122975>
- Anderson, J.L., Richardson, E.A., Kesner, C.D., 1986. Validation of chill unit and flower bud phenology models for “Montmorency” sour cherry. *Acta Horticulturae* 184, 71–78.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1986.184.7>
- Borgini, N., Benmoussa, H., Ghrab, M., Mimoun, M.B., 2024. Key insights for improved climate change adaptation strategies: Assessing chilling and heat requirements of *Prunus* cultivars (*Prunus* sp.) in warm climate regions. *Scientia Horticulturae* 325, 112683.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112683>
- Caspersen, L., Jarvis-Shean, K., Luedeling, E., 2023. Projecting almond bloom dates in California with the PhenoFlex framework.
- Caspersen, L., Schiffers, K., Picornell, A., Egea, J.A., Delgado, A., El Yaacoubi, A., Benmoussa, H., Rodrigo, J., Fadón, E., Ben Mimoun, M., Ghrab, M., Kodad, O., Ruiz, D., Luedeling, E., In submission. Contrasting responses to climate change – predicting bloom of major temperate fruit tree species in the Mediterranean region and Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Chmielewski, F.-M., Götz, K.-P., 2023. Towards a Physiological Modeling of Sweet Cherry Blossom. *Horticulturae* 9, 1207. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111207>
- Delgado, A., Egea, J.A., Fernandez, E., Campoy, J.A., Egea, J., Dicenta, F., Ruiz, D., 2024a. Discrepancies in methodologies to determine chill requirements in temperate fruit trees constrain guidelines for future plantings in a global warming context. *Agricultural and Forest Meteorology* 349, 109970.
- Delgado, A., Ruiz, D., Luedeling, E., Rodrigo, J., Guerrero, B.I., 2024b. Determinación multi-localidad de las necesidades agroclimáticas de frutales de hueso en las principales zonas frutícolas de España.
- Delgado, A., Ruiz, D., Luedeling, V., Egea, J.A., Rodrigo, J., 2024c. Multisite determination of agroclimatic requirements of apricot and Japanese plum cultivars - Adapting Mediterranean Orchards (AdaMedOr – project).
- Didevarasl, A., Costa Saura, J.M., Spano, D., Deiana, P., Snyder, R.L., Mulas, M., Nieddu, G., Zelasco, S., Santona, M., Trabucco, A., 2023. Modeling Phenological Phases across Olive Cultivars in the Mediterranean. *Plants* 12, 3181. <https://doi.org/10.3390/plants12183181>
- Egea, J.A., Caro, M., García-Brunton, J., Gambín, J., Egea, J., Ruiz, D., 2022. Agroclimatic metrics for the main stone fruit producing areas in Spain in current and future climate change scenarios: implications from an adaptive point of view. *Frontiers in Plant Science* 13, 842628.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842628>
- Egea, J.A., Egea, J., Ruiz, D., 2021. Reducing the uncertainty on chilling requirements for endodormancy breaking of temperate fruits by data-based parameter estimation of the dynamic model: a test case in apricot. *Tree Physiology* 41, 644–656.
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa054>
- Elloumi, O., Fki, M., Benmoussa, H., Feki, M., Mimoun, M.B., Ghrab, M., 2024. Agro-climatic requirements and reproductive potentials of pistachio pollinator specimens grown in warm area in North Africa. *Scientia Horticulturae* 325, 112649.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112649>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9, 1937–1958.

- Fadón, E., Do, H., Blanke, M., Rodrigo, J., Luedeling, E., 2023a. Apparent differences in agroclimatic requirements for sweet cherry across climatic settings reveal shortcomings in common phenology models. *Agricultural and Forest Meteorology* 333, 109387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109387>
- Fadón, E., Espiau, M.T., Errea, P., Alonso Segura, J.M., Rodrigo, J., 2023b. Agroclimatic Requirements of Traditional European Pear (*Pyrus communis* L.) Cultivars from Australia, Europe, and North America. *Agronomy* 13, 518. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020518>
- Fadón, E., Fernandez, E., Luedeling, E., Rodrigo, J., 2023c. Agroclimatic requirements and adaptation potential to global warming of Spanish cultivars of sweet cherry (*Prunus avium* L.). *European Journal of Agronomy* 145, 126774. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126774>
- Fadón, E., Gheban, T.I., Herrera, S., Rodrigo, J., 2024. Exploring pollen development to detect endodormancy breaking and determine chilling requirements in apricot cultivars.
- Fadón, E., Herrera, S., Gheban, T.I., Rodrigo, J., 2023d. Chilling Requirements of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Cultivars Using Male Meiosis as a Dormancy Biomarker. *Plants* 12, 3025. <https://doi.org/10.3390/plants12173025>
- Fadón, E., Herrera, S., Gheban, T.I., Rodrigo, J., 2023e. Determinación de necesidades de frío de variedades de albaricoquero usando la meiosis del polen como biomarcador del reposo.
- Fadón, E., Herrera, S., Guerrero, B.I., Guerra, M.E., Rodrigo, J., 2020. Chilling and heat requirements of temperate stone fruit trees (*Prunus* sp.). *Agronomy* 10, 409. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030409>
- Fadón, E., Herrera, S., Herrero, M., Rodrigo, J., 2021a. Male meiosis in sweet cherry is constrained by the chilling and forcing phases of dormancy. *Tree Physiology* 41, 619–630. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa063>
- Fadón, E., Rodrigo, J., Luedeling, E., 2021b. Cultivar-specific responses of sweet cherry flowering to rising temperatures during dormancy. *Agricultural and Forest Meteorology* 307, 108486. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108486>
- Fernandez, E., Krefting, P., Kunz, A., Do, H., Fadon, E., Luedeling, E., 2021. Boosting statistical delineation of chill and heat periods in temperate fruit trees through multi-environment observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 310, 108652. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108652>
- Fernandez, E., Mojahid, H., Fadón, E., Rodrigo, J., Ruiz, D., Egea, J.A., Ben Mimoun, M., Kodad, O., El Yaacoubi, A., Ghrab, M., 2023. Climate change impacts on winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional Environmental Change* 23, 7. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02006-x>
- Fernandez, E., Schiffers, K., Urbach, C., Luedeling, E., 2022. Unusually warm winter seasons may compromise the performance of current phenology models – Predicting bloom dates in young apple trees with PhenoFlex. *Agricultural and Forest Meteorology* 322, 109020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109020>
- Fishman, S., Erez, A., Couvillon, G., 1987a. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: mathematical analysis of a two-step model involving a cooperative transition. *Journal of Theoretical Biology* 124, 473–483.
- Fishman, S., Erez, A., Couvillon, G., 1987b. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *Journal of Theoretical Biology* 126, 309–321.
- Gonzalez Noguera, C., Delgado, A., Else, M., Hadley, P., 2023. Apple (*Malus domestica* Borkh.) dormancy: a review of regulatory mechanisms and agroclimatic requirements. *Frontiers in Horticulture* 2, 1217689. <https://doi.org/10.3389/fhort.2023.1217689>
- Guerrero, B.I., Fadón, E., Guerra, M.E., Rodrigo, J., 2024. Perspectives on the Adaptation of Japanese Plum-type Cultivars to Reduced Winter Chilling in Two Regions of Spain. *Frontiers in Plant Sciences* 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1343593>

- Herrera, S., Lora, J., Fadón, E., Hedhly, A., Alonso, J.M., Hormaza, J.I., Rodrigo, J., 2022. Male meiosis as a biomarker for endo-to ecodormancy transition in apricot. *Frontiers in Plant Science* 13, 842333. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842333>
- Kurth, R., Caspersen, L., Luedeling, E., 2024. Projecting Future Bloom Dates for Cripps Pink Apples with the PhenoFlex Framework.
- Luedeling, E., 2024. Tree phenology analysis with R.
- Luedeling, E., Caspersen, L., Delgado, A., Egea, J.A., Ruiz, D., Ben Mimoun, M., Benmoussa, H., Ghrab, M., Kodad, O., El Yaacoubi, A., Fadón, E., Rodrigo, J., 2024. Long-term phenology observations for temperate fruit trees in the Mediterranean region (and Germany). <https://doi.org/10.60507/FK2/MZIELI>
- Luedeling, E., Caspersen, L., Fernandez, E., 2023. chillR: Statistical Methods for Phenology Analysis in Temperate Fruit Trees. <https://cran.r-project.org/package=chillR>
- Luedeling, E., Schiffers, K., Fohrmann, T., Urbach, C., 2021. PhenoFlex - an integrated model to predict spring phenology in temperate fruit trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 307, 108491. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108491>
- Mojahid, H., Caspersen, L., Delgado, A., Dapena, E., Luedeling, E., Fernandez, E., In preparation. Multi-cultivar phenology assessment with PhenoFlex.
- Orozco, J., Lauterman, O., Sperling, O., Paz-Kagan, T., Zwieniecki, M.A., 2024. Losing ground: projections of climate-driven bloom shifts and their implications for the future of California's almond orchards. *Scientific Reports* 14, 636. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50688-y>
- Picornell, A., Abreu, I., Ribeiro, H., 2023. Trends and future projections of Olea flowering in the western Mediterranean: The example of the Alentejo region (Portugal). *Agricultural and Forest Meteorology* 339, 109559. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109559>
- Picornell, A., Maya-Manzano, J.M., Fernández-Ramos, M., Hidalgo-Barquero, J.J., Pecero-Casimiro, R., Ruiz-Mata, R., de Gálvez-Montañez, E., del Mar Trigo, M., Recio, M., Fernández-Rodríguez, S., 2024. Effects of climate change on Platanus flowering in Western Mediterranean cities: Current trends and future projections. *Science of The Total Environment* 906, 167800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167800>
- Santolaria, N., Rodrigo, J., Fadón, E., 2023. Adaptation of sweet cherry cultivars to future climate conditions in the Ebro Valley (Spain), in: *Acta Horticulturae*. Presented at the IX International Cherry Symposium, International Society for Horticultural Science, Beijing, China.
- Sperling, O., Kamai, T., Tixier, A., Davidson, A., Jarvis-Shean, K., Raveh, E., DeJong, T.M., Zwieniecki, M.A., 2019. Predicting bloom dates by temperature mediated kinetics of carbohydrate metabolism in deciduous trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 276–277, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107643>
- Sperling, O., Zwieniecki, M.A., 2021. Winding up the bloom clock—do sugar levels at senescence determine how trees respond to winter temperature? *Tree Physiology* 41, 1906–1917. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab051>
- Urbach, C., Luedeling, E., Schiffers, K., 2021. PhenoFlex - vignette within the chillR package. chillR: Statistical Methods for Phenology Analysis in Temperate Fruit Trees. <https://cran.r-project.org/web/packages/chillR/vignettes/PhenoFlex.html>. <https://cran.r-project.org/web/packages/chillR/vignettes/PhenoFlex.html>
- Wyver, C., Potts, S.G., Pitts, R., Riley, M., Janetzko, G., Senapathi, D., 2024. New citizen science initiative enhances flowering onset predictions for fruit trees in Great Britain. *Horticulture Research* uhae122. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae122>

Annex I

Publikation in wissenschaftlichen Zeitschriften mit Peer-Review Verfahren

1. Abou-Saaid, O., El Yaacoubi, A., Moukhli, A., El Bakkali, A., Oulbi, S., Delalande, M., Farrera, I., Kelner, J.-J., Lochon-Menseau, S., El Modafar, C., 2022. Statistical approach to assess chill and heat requirements of olive tree based on flowering date and temperatures data: Towards selection of adapted cultivars to global warming. *Agronomy* 12, 2975. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122975>
2. Borgini, N., Benmoussa, H., Ghrab, M., Mimoun, M.B., 2024. Key insights for improved climate change adaptation strategies: Assessing chilling and heat requirements of *Prunus* cultivars (*Prunus* sp.) in warm climate regions. *Scientia Horticulturae* 325, 112683. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112683>
3. Delgado, A., Dapena, E., Fernandez, E., Luedeling, E., 2021a. Climatic requirements during dormancy in apple trees from northwestern Spain—Global warming may threaten the cultivation of high-chill cultivars. *European Journal of Agronomy* 130, 126374. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126374>
4. Delgado, A., Egea, J.A., Luedeling, E., Dapena, E., 2021b. Agroclimatic requirements and phenological responses to climate change of local apple cultivars in northwestern Spain. *Scientia Horticulturae* 283, 110093. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110093>
5. Delgado, A., Egea, J.A., Fernandez, E., Campoy, J.A., Egea, J., Dicenta, F., Ruiz, D., 2024. Discrepancies in methodologies to determine chill requirements in temperate fruit trees constrain guidelines for future plantings in a global warming context. *Agricultural and Forest Meteorology* 349, 109970. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109970>
6. Egea, J.A., Caro, M., García-Brunton, J., Gambín, J., Egea, J., Ruiz, D., 2022. Agroclimatic metrics for the main stone fruit producing areas in Spain in current and future climate change scenarios: implications from an adaptive point of view. *Frontiers in Plant Science* 13, 842628. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842628>
7. Elloumi, O., Fki, M., Benmoussa, H., Feki, M., Mimoun, M.B., Ghrab, M., 2024. Agroclimatic requirements and reproductive potentials of pistachio pollinator specimens grown in warm area in North Africa. *Scientia Horticulturae* 325, 112649. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112649>
8. Erami, M., Mamouni, A., Oukabli, A., El Yaacoubi, A., 2021. Evaluation of dormancy dynamic and chilling requirements of Moroccan and foreign apricot (*Prunus armeniaca* L.) cultivars. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology* 22, 404–418.
9. Fadón, E., Rodrigo, J., Luedeling, E., 2021. Cultivar-specific responses of sweet cherry flowering to rising temperatures during dormancy. *Agricultural and Forest Meteorology* 307, 108486. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108486>
10. Fadón, E., Do, H., Blanke, M., Rodrigo, J., Luedeling, E., 2023a. Apparent differences in agroclimatic requirements for sweet cherry across climatic settings reveal shortcomings in common phenology models. *Agricultural and Forest Meteorology* 333, 109387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109387>

11. Fadón, E., Espiau, M.T., Errea, P., Alonso Segura, J.M., Rodrigo, J., 2023b. Agroclimatic Requirements of Traditional European Pear (*Pyrus communis* L.) Cultivars from Australia, Europe, and North America. *Agronomy* 13, 518. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020518>
12. Fadón, E., Fernandez, E., Luedeling, E., Rodrigo, J., 2023c. Agroclimatic requirements and adaptation potential to global warming of Spanish cultivars of sweet cherry (*Prunus avium* L.). *European Journal of Agronomy* 145, 126774. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126774>
13. Fadón, E., Herrera, S., Gheban, T.I., Rodrigo, J., 2023d. Chilling Requirements of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Cultivars Using Male Meiosis as a Dormancy Biomarker. *Plants* 12, 3025. <https://doi.org/10.3390/plants12173025>
14. Fernandez, E., Caspersen, L., Illert, I., Luedeling, E., 2021a. Warm winters challenge the cultivation of temperate species in South America—a spatial analysis of chill accumulation. *Climatic Change* 169, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03276-w>
15. Fernandez, E., Krefting, P., Kunz, A., Do, H., Fadon, E., Luedeling, E., 2021b. Boosting statistical delineation of chill and heat periods in temperate fruit trees through multi-environment observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 310, 108652. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108652>
16. Fernandez, E., Schiffers, K., Urbach, C., Luedeling, E., 2022. Unusually warm winter seasons may compromise the performance of current phenology models – Predicting bloom dates in young apple trees with PhenoFlex. *Agricultural and Forest Meteorology* 322, 109020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109020>
17. Fernandez, E., Mojahid, H., Fadón, E., Rodrigo, J., Ruiz, D., Egea, J.A., Ben Mimoun, M., Kodad, O., El Yaacoubi, A., Ghrab, M., 2023. Climate change impacts on winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional Environmental Change* 23, 7. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02006-x>
18. Ghrab, M., Elloumi, O., Benmoussa, H., Trabelsi, L., Borgini, N., Mimoun, M.B., 2022. Climate change and viability of fruit tree orchards in arid area. *Journal of Oasis Agriculture and Sustainable Development* 4, 1–5. <https://doi.org/10.56027/JOASD.spiss012022>
19. Gonzalez Noguera, C., Delgado, A., Else, M., Hadley, P., 2023. Apple (*Malus domestica* Borkh.) dormancy review of regulatory mechanisms and agroclimatic requirements. *Frontiers in Horticulture* 2, 1217689. <https://doi.org/10.3389/fhort.2023.1217689>
20. Guerrero, B.I., Fadón, E., Guerra, M.E., Rodrigo, J., 2024. Perspectives on the Adaptation of Japanese Plum-type Cultivars to Reduced Winter Chilling in Two Regions of Spain. *Frontiers in Plant Sciences* 15, 1343593. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1343593>
21. Herrera, S., Lora, J., Fadón, E., Hedhly, A., Alonso, J.M., Hormaza, J.I., Rodrigo, J., 2022. Male meiosis as a biomarker for endo-to ecodormancy transition in apricot. *Frontiers in Plant Science* 13, 842333. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842333>
22. Luedeling, E., Schiffers, K., Fohrmann, T., Urbach, C., 2021. PhenoFlex - an integrated model to predict spring phenology in temperate fruit trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 307, 108491. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108491>

Annex II

Wissenschaftliche Manuskripte in Submission

Caspersen, L., Schiffers, K., Picornell, A., Egea, J.A., Delgado, A., El Yaacoubi, A., Benmoussa, H., Rodrigo, J., Fadón, E., Ben Mimoun, M., Ghrab, M., Kodad, O., Ruiz, D., Luedeling, E., In submission. Contrasting responses to climate change – predicting bloom of major temperate fruit tree species in the Mediterranean region and Central Europe. Submitted to: Agricultural and Forest Meteorology

Wissenschaftliche Manuskripte in Arbeit

Mojahid, H., Caspersen, L., Delgado, A., Dapena, E., Luedeling, E., Fernandez, E., In preparation. Multi-cultivar phenology assessment with PhenoFlex.

Annex III

Beiträge auf nationalen und internationalen Konferenzen, sowie Beiträgen in den daraus folgenden Tagungsbänden

1. Ben Mimoun, M., Benmoussa, H., 2023. Viticulture facing climate change: scenarios, impact, and resilience. International Conference on Sustainable Viticulture in the Era of Globalization: Opportunities, Climate Challenges, and Global Market Implications. Tunis, Tunisia. 13 October 2023 (Oral presentation)
2. Benmoussa, H., Ghrab, M., Borjini, N., Ben Mimoun M., 2021. Chill accumulation in Tunisia and the effect of climate change on the fruit species adaptation. National Forum of Climate Change Adaptation Actors "FNAACC". Tunis, Tunisia. 11 December 2021 (Poster)
3. Benmoussa, H., Ben Mimoun M., 2023. Viticulture facing the impacts of climate change and its adaptation. International Workshop of Viticulture face to environmental change in the Mediterranean area. Tunis, Tunisia. 9 May 2023 (Oral presentation)
4. Caspersen, L., Jarvis-Shean, K., Luedeling, E., 2023. Projecting almond bloom dates in California with the PhenoFlex framework. VIII International Symposium on Almonds and Pistachios. Davies, California, USA. 7 – 11 May 2023 (Oral presentation)
5. Caspersen, L., Jarvis-Shean, K., Luedeling, E., In press. Projecting almond bloom dates in California with the PhenoFlex framework, in: VIII International Symposium on Almonds and Pistachios. International Society for Horticultural Science, Davis, California, USA.
6. Delgado, A., Ruiz, D., Luedeling, E., Rodrigo, J., Guerrero, B.I., 2024a. Determinación multi-localidad de las necesidades agroclimáticas de frutales de hueso en las principales zonas frutícolas de España. XII Jornadas Nacionales del Grupo de Fruticultura. Tenerife, Spain. June 2024 (Oral presentation)
7. Delgado, A., Ruiz, D., Luedeling, V., Egea, J.A., Rodrigo, J., 2024b. Multisite determination of agroclimatic requirements of apricot and Japanese plum cultivars - Adapting Mediterranean Orchards (AdaMedOr – project). I International Symposium on Apricot and Plum. Avignon, France. 22 – 26 April 2024 (Poster)

8. El Bakkali, S., Ainane, A., Gharby, S., El Yaacoubi, A., Ainane, T., Sakar, 2021. On the reproductive phenology of olive (*Olea europaea* L.) Grown under contrasting environments in northern Morocco. 1ères Assises Régionales : « Innovation & Recherche dans l'Agriculture ». Khénifra, Morocco. 28 - 29 April 2021 (Oral presentation)
9. El Yaacoubi, A., Erami, M., Kodad, O., Houssam-Eddine, B., Oukabli, A., Mamouni, A., El Bakkali, A., Ainane, T., Outghouliast, H., El Hasssan, A., Cherroud, S., 2021. Determination of chilling requirements of Moroccan and foreign apricot cultivars. International Scopus Congress on Environment and Natural Resources: Challenges and Solutions (ENRSC2021). Khénifra, Morocco. 24 - 25 November 2021 (Oral presentation)
10. Erami, M., Houssam-Eddine, B., Kodad, O., Ainane, T., Outghouliast, H., El Yaacoubi, A., 2021a. Détermination des besoins thermiques pour la levée de la dormance et la date de pleine floraison chez différentes variétés du pêcher cultivées sous les conditions climatiques de la vallée du Sais. 1st International Congress Sustainable Agriculture : Tools and Innovations « AgriNov2021 ». Béni Mellal, Morocco. 27 - 30 October 2021 (Oral presentation)
11. Erami, M., Houssam-Eddine, B., Kodad, O., Ainane, T., Outghouliast, H., El Yaacoubi, A., 2021b. Mise en évidence des différentes périodes de floraison et de dormance chez les variétés de pêcher cultivées dans la région de Meknès. 8ème édition Ecole Internationale de Recherche sur le thème : Biodiversité, Biotechnologies, Durabilité & Innovation. Agadir, Morocco. 20 - 22 December 2021 (Oral presentation)
12. Erami, M., Kodad, O., Ainane, T., Outghouliast, H., El Yaacoubi, A., 2021c. Evaluation de la cinétique de dormance chez l'amandier et le pêcher dans la région de Meknès. 1ères Assises Régionales : « Innovation & Recherche dans l'Agriculture ». Khénifra, Morocco. 28 - 29 April 2021 (Oral presentation)
13. Erami, M., Kodad, O., El Yaacoubi, A., 2023. Agroclimatic requirements and phenological responses of apricot cultivars to climate change. International Congress on "Agroecology, a new approach for sustainable and resilient food systems" (ANASRFS2023). Khénifra, Morocco. 21 - 22 December 2023 (Oral presentation)
14. Erami, M., Kodad, O., Houssam-Eddine, B., Abba, E.L., A., Ainane, T., Cherroud, S., El Yaacoubi, A., 2021d. Responses of Peach and Nectarine cultivars to temperature variation and determination of their chill and heat requirements in Sefrou, Morocco. International Scopus Congress on "Environment and Natural Resources: Challenges and Solutions (ENRSC2021). Khénifra, Morocco. 24 - 25 November 2021 (Oral presentation)
15. Fadón, E., Gheban, T.I., Herrera, S., Rodrigo, J., 2024. Exploring pollen development to detect endodormancy breaking and determine chilling requirements in apricot cultivars. I International Symposium on Apricot and Plum. Avignon, France. 22 – 26 April 2024 (Poster)
16. Fadón, E., Herrera, S., Gheban, T.I., Rodrigo, J., 2023. Determinación de necesidades de frío de variedades de albaricoquero usando la meiosis del polen como biomarcador del reposo. IX Congreso Ibérico y XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Mérida, Spain. June 2023 (Oral presentation)

17. Fadón, E., Herrera, S., Gheban, T.I., Rodrigo, J., In press. Determinación de necesidades de frío de variedades de albaricoquero usando la meiosis del polen como biomarcador del reposo, in: Actas de Horticultura. Presented at the IX Congreso Ibérico y XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas, Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Mérida, Spain.
18. Fadón, E., Rodrigo, J., Luedeling, E., 2021. Temperature requirements for blooming in 12 sweet cherry cultivars. 1st International symposium on reproductive Biology of Fruit Tree Species. Montpellier, France. November 2021 (Poster)
19. Fadón, E., Rodrigo, J., Luedeling, E., In press. Temperature requirements for blooming in 12 sweet cherry cultivars. 1st International symposium on reproductive Biology of Fruit Tree Species, in: Acta Horticulturae. Presented at the 1st International symposium on reproductive Biology of Fruit Tree Species, International Society for Horticultural Science, Montpellier, France.
20. Guerrero, B.I., Guerra, M.E., Rodrigo, J., 2022. Chilling requirements of Japanese plum-type cultivars growing at different locations in Spain, in: Acta Horticulturae. Presented at the 1st International symposium on reproductive Biology of Fruit Tree Species, International Society for Horticultural Science, Montpellier, France, pp. 95–102.
21. Guerrero, B.I., Guerra, M.E., Rodrigo, J., 2022. Chilling requirements of Japanese plum-type cultivars growing at different locations in Spain. 1st International symposium on reproductive Biology of Fruit Tree Species. Montpellier, France. November 2021 (Poster)
22. Houssam-Eddine, B., El Yaacoubi, A., Kodad, O., Erami, M., Hajjioui, H., El Bakkali, A., Ainane, T., El Hasssan, A., Cherroud, S., 2023. Variations phénologiques de l'olivier au Maroc. International Congress on "Agroecology, a new approach for sustainable and resilient food systems" (ANASRFS2023). Khénifra, Morocco. 21 - 22 December 2023 (Oral presentation)
23. Houssam-Eddine, B., Kodad, O., Erami, M., El Bakkali, A., Ainane, T., El Hasssan, A., Cherroud, S., El Yaacoubi, A., 2021. Evaluation des besoins thermiques de l'olivier au Maroc. International Scopus Congress on Environment and Natural Resources: Challenges and Solutions (ENRSC2021). Khénifra, Morocco. 24 - 25 November 2021 (Oral presentation)
24. Irisarri, P., Fadón, E., Alonso, J.M., Rodrigo, J., 2023. Necesidades agroclimáticas de las variedades de almendro con mayor superficie de plantación en España. IX Congreso Ibérico y XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Mérida, Spain. June 2023 (Poster)
25. Irisarri, P., Fadón, E., Alonso, J.M., Rodrigo, J., In press. Necesidades agroclimáticas de las variedades de almendro con mayor superficie de plantación en España, in: Actas de Horticultura. Presented at the IX Congreso Ibérico y XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas, Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Mérida, Spain.
26. Luedeling, E., Fernandez, E., 2022. Forecasting tree phenology in a climate change context. 31st International Horticultural Congress. Angers, France. 14 – 20 August 2022 (Oral presentation)

27. Luedeling, E., Schiffers, K., Caspersen, L., Fernandez, E., Urbach, C., 2023. Modeling tree dormancy with the PhenoFlex framework, in: 7th International Plant Dormancy Symposium. Perth, Australia. 12 September 2023 (Oral presentation)
28. Santolaria, N., Castel, L., Rodrigo, J., Fadón, E., 2023a. Necesidades agroclimáticas de las principales variedades de cerezo cultivadas en España. Presented at the IX Congreso Ibérico y XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Mérida, Spain. June 2023 (Oral presentation)
29. Santolaria, N., Castel, L., Rodrigo, J., Fadón, E., In press. Necesidades agroclimáticas de las principales variedades de cerezo cultivadas en España, in: Actas de Horticultura. Presented at the IX Congreso Ibérico y XVII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas, Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Mérida, Spain.
30. Santolaria, N., Rodrigo, J., Fadón, E., 2023b. Adaptation of sweet cherry cultivars to future climate conditions in the Ebro Valley (Spain), in: Acta Horticulturae. Presented at the IX International Cherry Symposium, International Society for Horticultural Science, Beijing, China.
31. Santolaria, N., Rodrigo, J., Fadón, E., 2023c. Adaptation of sweet cherry cultivars to future climate conditions in the Ebro Valley (Spain). IX International Cherry Symposium. Beijing, China. May 2023 (Oral presentation)

Annex IV

Nichtwissenschaftliche Beiträge

1. Fadón, E., Espiau, M.T., Errea, P., Alonso, J.M., Rodrigo, J., 2023. Necesidades de frío e impacto del cambio climático en el cultivo del peral. Agricultura 46–50.
2. Fadón, E., Rodrigo, J., 2023. Reposo y desarrollo floral en frutales de clima templado. Innovagri: Innovando En El Medio Rural. <https://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-innovacion/reposo-y-desarrollo-floral-en-frutales-de-clima-templado.html>
3. Fadón, E., Rodríguez, 2023. Reposo y desarrollo floral en frutales de clima templado. Vida Rural 50–53.
4. Rodrigo, J., 2022. Efectos del cambio climático en frutales de hueso. Agricultura 64–68.