

Effekte ausgewählter Faktoren auf die Biodiversität in Schweizer Agrarlandschaften

Chantal Herzog¹, Eliane Seraina Meier¹, Jérôme Schneuwly¹, Simon Birrer², Tobias Roth³ und Eva Knop¹

¹Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Schweizerische Vogelwarte Sempach, 6204 Sempach, Schweiz

³Hintermann & Weber AG, 4153 Reinach, Schweiz

Auskünfte: Eva Knop, E-Mail: eva.knop@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs15-128> Publikationsdatum: 18. April 2024



Eine Agrarlandschaft besteht aus unterschiedlich genutzten Flächen, die durch verschiedene Faktoren wie Nutzungsart, Bewirtschaftungsintensität und abiotische Bedingungen beeinflusst werden.

Eine wirksame und grossräumige Förderung der Biodiversität, z.B. durch agrarpolitische Massnahmen, erfordert deshalb ein umfassendes Verständnis der direkten und indirekten Faktoren mit Einfluss auf die Biodiversität über die Feldskala hinaus auf der Ebene ganzer Landschaften. (Foto: Jonas Winizki, Agroscope)

Zusammenfassung

Der Schweizer Agrarraum beherbergt eine grosse Vielfalt an Arten und Lebensräumen, von denen jedoch ein bedeutender Teil durch die intensive landwirtschaftliche Nutzung unter Druck steht. Um Arten und Lebensräume in der Agrarlandschaft erfolgreich zu

fördern, müssen wir die verschiedenen einwirkenden Faktoren nicht nur lokal, sondern auch auf grösseren räumlichen Skalen verstehen. Im Rahmen des Monitoringprogramms «Arten und Lebensräume Landwirtschaft – Espèces et Milieux Agricoles» – ALL-EMA von Agroscope wird die Biodiversität in der Schweizer Agrarlandschaft in 170 1 km² grossen Untersuchungsquadraten, verteilt auf die verschiedenen biogeografischen Regionen und Höhenstufen der Schweiz gemessen. In dieser Studie wurden die Biodiversitätsdaten mit weiteren Datensätzen verknüpft, um direkte und indirekte Faktoren mit Einfluss auf die Diversität von Lebensräumen, Pflanzen, Tagfaltern und Brutvögeln in der Agrarlandschaft auf Landschaftsebene zu identifizieren. Die umfassende Auswertung zeigte, dass ein hoher Anteil an Biodiversitätsförderflächen auch auf Landschaftsebene in einer höheren Biodiversität resultierte. Im Gegensatz dazu gab es einen negativen Zusammenhang zwischen hoher Bewirtschaftungsintensität und der Artenvielfalt auf Landschaftsebene. Wichtige abiotische Faktoren wie z.B. die Temperatur beeinflussten die Biodiversität jedoch nicht nur auf direkte, sondern auch auf indirekte Weise. So bestimmen abiotischen Bedingungen auch die Art der Landnutzung sowie die Nutzungsintensität einer Landschaft mit, die wiederum die Biodiversität beeinflussen. Eine umfassende Beurteilung von Zustand und Entwicklung der Biodiversität und darauf aufbauend eine gezielte und effiziente Ausrichtung von Fördermassnahmen erfordert daher ganzheitliche Ansätze, die möglichst alle relevanten Faktoren einbeziehen.

Key words: direct and indirect biodiversity drivers, ecological focus areas, farmland biodiversity, farmland intensity, landscape scale.

Einleitung

Die Biodiversität nimmt weltweit ab, wobei zum einen der Verlust naturnaher Lebensräume zugunsten von Siedlungsentwicklung (McKinney, 2002) und landwirtschaftlicher Nutzung (Tilman *et al.*, 2017) und zum anderen die Intensivierung der landwirtschaftlichen Praxis (z.B. Matson *et al.*, 1997) als Hauptursachen für diesen Rückgang angesehen werden. Aber auch die Nutzungsaufgabe von marginalen Flächen kann zu einem Rückgang der Biodiversität führen, insbesondere bei Pflanzen (Elliott *et al.*, 2023). In der Schweiz sind Beiträge für Biodiversitätsförderflächen (BFF) seit 1993 Teil des Direktzahlungssystems (Bundesrat, 2013). Sie bezwecken die Förderung und Erhaltung der Arten und Lebensräume in der Schweizer Landwirtschaft und sind eine zentrale Massnahme zur Erreichung der Umweltziele im Bereich Biodiversität (BAFU und BLW, 2008). Obwohl die Fördermassnahmen teilweise Wirkung zeigen und einige Artengruppen wie Pflanzen, Vögel oder Tagfalter davon profitieren (Aviron *et al.*, 2009; BAFU und BLW, 2016; Zingg *et al.*, 2019), besteht heute insbesondere im Agrarland des Schweizer Flachlands, welches im Vergleich zu den Bergregionen deutlich intensiver landwirtschaftlich genutzt wird, ein Defizit an Biodiversität (Meier *et al.*, 2021). Eine Auswertung von historischen Vegetationsdaten offenbarte, dass im Vergleich dazu um 1900 noch keine Unterschiede in der Artenvielfalt entlang einem Höhengradienten zu beobachten waren (Riedel *et al.*, 2023). Welche Faktoren genau dieses Defizit direkt oder indirekt beeinflussen, ist noch nicht abschliessend geklärt. Ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Faktoren wie Standortbedingungen, Bewirtschaftungsintensität, Fördermassnahmen und schliesslich der Biodiversität in der Schweizer Agrarlandschaft ist daher dringend erforderlich.

Da sich bisherige Studien vor allem auf die lokale Skala (z.B. einzelne Felder oder Betriebe) und auf direkte Faktoren konzentriert haben, fehlt es auch an vertieften Kenntnissen solcher Zusammenhänge im Kontext ganzer Landschaften, bestehend aus mehreren Landschaftselementen über grössere Flächen (z.B. 1 km²). Ein solches Verständnis wäre besonders wichtig, da viele relevante Prozesse über die lokale Skala hinausgehen. Beispielsweise sind vielfältig gestaltete und gut vernetzte Landschaften wichtig, um die nötigen Habitate und Ressourcen für verschiedene Lebensstadien von Organismen zu schaffen und um die Ausbreitung von Arten über grössere räumliche Skalen zu ermöglichen (Baguette *et al.*, 2013; Poiani *et al.*, 2000). Zudem können bestimmte

grossräumig wirkende Faktoren lokal wirksame Effekte überlagern oder sogar umkehren (z.B. Batáry *et al.*, 2011; Landis, 2017; Tscharnke *et al.*, 2021). Insbesondere Landschaften mit günstigen abiotischen Bedingungen bieten meist sehr gute Voraussetzungen sowohl für die Artenvielfalt wie auch für eine intensive landwirtschaftliche Nutzung, was sich letztlich insgesamt negativ auf die Artenvielfalt auswirken kann (Meier *et al.*, 2022).

Wir haben uns dem gleichen Ansatz wie der Studie von Meier *et al.* (2022) bedient und Biodiversitätsindikatoren aus den nationalen Monitoringprogrammen ALL-EMA, Biodiversitätsmonitoring Schweiz (BDM) und Monitoring Häufige Brutvögel (MHB) zusammen mit Variablen zu verschiedenen Faktoren in einem gemeinsamen Modell ausgewertet, um ihren Einfluss auf die Biodiversität in der Schweizer Agrarlandschaft auf der Landschafts-Skala zu bewerten. Im Modell von Meier *et al.* (2022) wurden für ein besseres mechanistisches Verständnis Variablen ausgewählt, die räumliche Muster wie die Lebensraumvielfalt von Landschaften, und diese wiederum die Vielfalt von Arten mit spezifischen Ausbreitungs-, Nahrungs- und Überwinterungseigenschaften beeinflussen. In der vorliegenden Auswertung standen dagegen Faktoren der Bewirtschaftung und ihr Einfluss auf die Diversität von Lebensraumtypen, Pflanzen, Tagfalter und Brutvögel auf Landschaftsebene im Fokus. Dies mit dem Ziel, eine möglichst anwendungsorientierte Auswertung zu ermöglichen. Dabei standen die folgenden Kernfragen im Vordergrund: Welche direkten und indirekten Pfade lassen sich zwischen abiotischen Bedingungen und Biodiversitätsindikatoren im Landschaftskontext (hier Agrarlandschaft innerhalb von 1 km² grossen Untersuchungsquadraten) identifizieren? Und welche Rolle spielen dabei Bewirtschaftungsintensität und der Anteil an Biodiversitätsförderflächen in der Landschaft?

Material und Methode

Biodiversitätsdaten aus drei Monitoringprogrammen

Die landwirtschaftliche Biodiversität in der Schweiz wurde anhand von vier Biodiversitätsindikatoren beurteilt, der Vielfalt von (1) Lebensraumtypen, (2) Pflanzenarten, (3) Tagfalterarten und (4) Brutvogelarten. Die Erhebungen wurden in insgesamt 170 Untersuchungsquadraten von je 1 km², verteilt über die landwirtschaftlichen Zonen (Talzone bis zum Sömmerungsgebiet) und die Hauptregionen der Umweltziele Landwirtschaft, im Zeitraum 2015 bis 2019 durchgeführt (d.h. jährliche Be-

probung von 1/5 aller Quadrate) um den Zustand der Biodiversität in der Schweizer Agrarlandschaft zu erfassen (Meier *et al.*, 2021).

ALL-EMA: Daten zu Lebensräumen und Pflanzen

Die Daten zu den Gefässpflanzen stammen aus dem Monitoringprogramm ALL-EMA von Agroscope (www.allema.ch), welches seit 2015 die offene Agrarlandschaft beprobt. In jedes Untersuchungsquadrat à 1 km² wurde ein regelmässiges Raster von 50m × 50m gelegt. Alle Rasterpunkte innerhalb der offenen Agrarlandschaft wurden beprobt. Unter Berücksichtigung einer Kreisfläche von 10m² wurde an den einzelnen Rasterpunkten der Lebensraumtyp bestimmt. Auf ca. 10 % dieser Rasterpunkte erfolgte ebenfalls eine detaillierte Vegetationsaufnahme zur Erfassung aller Pflanzenarten. Für mehr Details zum Stichprobedesign, siehe Meier *et al.* (2021).

Biodiversitätsmonitoring Schweiz: Tagfalterdaten

Die Tagfalterdaten stammen aus dem Biodiversitätsmonitoring Schweiz (BDM; www.biodiversitymonitoring.ch). Jedes Untersuchungsquadrat wurde entlang eines Transekts von 2,5km Länge und 10m Breite an sieben Terminen (jedoch weniger Aufnahmen in höher gelegenen Gebieten, siehe Biodiversitätsmonitoring Schweiz (2021)) im Untersuchungsjahr begangen und bei jeder Erhebung jeder gesichtete Falter auf Artniveau bestimmt. Für die vorliegenden Auswertungen wurden die Beobachtungen innerhalb der offenen Agrarlandschaft berücksichtigt.

Monitoring Häufige Brutvögel: Brutvogelraten

Die Daten der Brutvögel stammen aus dem Monitoring Häufige Brutvögel der Schweizerischen Vogelwarte Sempach (MHB, www.vogelwarte.ch/de/projekte/monitoring/monitoring-haeufige-brutvoegel). Jedes Untersuchungsquadrat wurde im jeweiligen Untersuchungsjahr an drei Morgen zur Brutzeit aufgesucht. Anhand der Einzelbeobachtungen wurden Brutvogelreviere abgegrenzt (Schmid *et al.*, 2004). Für die Auswertungen wurden alle Reviere berücksichtigt, deren Schwerpunkte innerhalb der Agrarlandschaft lagen.

Faktoren mit Einfluss auf die Biodiversität

Wir haben über 30 verschiedene Datensätze zu Faktoren berücksichtigt (Tab. 1), die gemäss der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur einen Einfluss auf die Biodiversität in der Agrarlandschaft haben. Für alle Datensätze wurde geprüft, ob sie in georeferenzierter Form vorliegen und die 170 Untersuchungsquadrate abdecken, um

sie sinnvoll mit den Biodiversitätsdaten in Verbindung bringen zu können. Anhand der Datensätze wurden Variablen berechnet und ihre Eignung, auch in Bezug auf die räumliche und zeitliche Auflösung, getestet. Für die Auswertungen haben wir die Faktoren in vier thematische Kategorien eingeteilt: 1) abiotische Bedingungen, z.B. mittlere Temperatur, jährliche Niederschlagssumme; 2) Art der Landnutzung, z.B. Anteil Ackerfläche, Länge von Hecken und Feldgehölzen; 3) Bewirtschaftungsintensität, z.B. Pflanzenschutzmittel, Ammoniak (NH₃)-Emissionen; und 4) Agrar-Umweltmassnahmen, z.B. Anteil Biodiversitätsförderflächen oder Flächen unter biologischer (Bio-) Bewirtschaftung.

Leider konnten keine Bodeneigenschaften aus Feldkartierungen in die Analyse einbezogen werden, da es für den Boden bisher keine schweizweiten, georeferenzierten Daten, sondern nur modellierte Datensätze gibt. Dies ist eine wesentliche Lücke, weil die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Böden das Pflanzenwachstum und damit die Pflanzengemeinschaften stark beeinflussen. Ebenso fehlten geeignete Datensätze zu Bodenorganismen, die zentrale Prozesse ausführen und für nachhaltige Agrarökosysteme eine entscheidende Rolle spielen (Brussaard *et al.*, 2007; Creamer *et al.*, 2022). Für die Landnutzungsintensität auf Betriebsebene lieferten Agrarinformationssysteme wertvolle Strukturdaten, und auch Daten zur Zu- und Wegfuhr von organischen Düngemitteln. Schweizweite Geodatenmodelle lieferten zudem Informationen zur Nutzungsart der landwirtschaftlichen Flächen (Acker vs. Grünland, Hauptkulturen) sowie zu Flächen mit Agrar-Umwelt Massnahmen (z.B. Biodiversitätsförderflächen, Bio-Bewirtschaftung) und zu Schutzgebieten von nationaler Bedeutung. Die Bewirtschaftungsintensität konnte anhand der vorliegenden Datenbasis nur näherungsweise abgeleitet werden. So war es zum Beispiel nicht möglich, die tatsächlich auf den einzelnen Flächen ausgebrachten Mengen an organischen und mineralischen Düngemitteln sowie den effektiven Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu ermitteln. Aus diesem Grund haben wir für Pflanzenschutzmittel kulturtypische Durchschnittswerte hinsichtlich Anzahl Interventionen für die Schweiz verwendet. Als Näherungswert für die Düngungsintensität wurde auf berechnete Ammoniakemissionen auf Betriebsebene zurückgegriffen (beide Variablen stammen aus der Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren; www.agrarmonitoring.ch). Die verwendeten Variablen zur Bewirtschaftungsintensität stellen daher Näherungswerte und keine effektiven Messgrössen dar und sind entsprechend zu interpretieren.

Tabelle 1 | Untersuchte Faktoren die gemäss heutigem Wissensstand die Biodiversität in der Agrarlandschaft beeinflussen und zu denen in der Schweiz Datensätze vorliegen: 1) Abiotische Bedingungen; 2) Art der Landnutzung; 3) Bewirtschaftungsintensität; und 4) Agrar-Umweltmassnahmen. Für jede Kategorie von Faktoren werden geeignete, d.h. schweizweite, flächendeckend räumlich und zeitlich gut aufgelöste Datenquellen (siehe Material und Methode, Abschnitt Faktoren mit Einfluss auf die Biodiversität) aufgeführt. Die im Strukturgleichungsmodell (SGM) verwendeten ausgewählten Variablen sind in der Tabelle fett hervorgehoben.

Faktoren Hauptkategorien	Sub-Kategorien	Geprüfte Variablen (fett: in SGM verwendete Variablen)
Abiotische Bedingungen	Klima	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Jahrestemperatur (°C) • Niederschlagssumme (Jahressumme in mm) • Regen-, Trockentage/Sommer-, Kältetage (Anzahl Tage pro Jahr) • Temperatur-, Niederschlagsschwankungen (Saisonalität; Standardabweichung + 100)
	Topographie	<ul style="list-style-type: none"> • Hangneigung (°) • Höhe (m ü.M.) • Exposition (°)
	Edaphische Faktoren (modelliert)	<ul style="list-style-type: none"> • Boden Tongehalt (%) • Boden Schluffgehalt (%) • Boden Corg-Gehalt (%) • Boden pH
Art der Landnutzung	Landwirtschaftliche Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzungstypen, z.B. Acker, Weiden, Wiesen • Bewirtschaftungseinheiten • Sömmerungsgebiete
	Landwirtschaftliche Produktionszonen	<ul style="list-style-type: none"> • Talzone • Hügelzone • Bergzone I-IV • Sömmerungsgebiet
	Gewässer	<ul style="list-style-type: none"> • Strukturvielfalt und Ökomorphologie der Fliessgewässer • Länge der an Agrarlandschaft angrenzende Gewässer, Distanz zu Gewässern (m)
	Physische und wahrgenommene Landschaftsqualität	<ul style="list-style-type: none"> • Landschaftszersiedelung (Durchsiedlungseinheiten pro km² Landschaft) • Landschaftszerschneidung (km²) • Abgeschiedenheit (km²) • Lichtemissionen (Strahlkraft) • Lärm von Strasse und Bahn (Dezibel) • Luftbelastung (µg/m³) • Altlasten (z.B. belastete Standorte in % Flächenanteil)
	Gehölze	<ul style="list-style-type: none"> • Waldrandlängen (m) • Hecken- und Feldgehölz-Längen (m) • Aufgelöster Wald (Buschwald; m²) • Anzahl Einzelbäume
	Unproduktive Flächen und Siedlung	<ul style="list-style-type: none"> • Siedlung (% Flächenanteil) • Vegetationslose Flächen, z.B. Fels, Lockergestein, Gletscher Siedlung (m²)
Bewirtschaftungsintensität	Nutzungstypen (Acker, Wiesen, Weiden, etc.), Hauptkulturen	<ul style="list-style-type: none"> • Hauptkulturen • Anteil versch. Nutzungstypen in der Landschaft (z.B. Acker, Wiesen, Weiden, etc.; %)
	Betriebs-, Struktur- und Beitragsdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsgrösse (ha) • Tieranzahl • Bewirtschaftete Flächen (inkl. BFF) • Bio/nicht-Bio • Extensio-Beitrag
	Vegetationsindex	Änderung der Produktivität im Verlaufe eines Jahres
	N-Zeigerpflanzen	Mass für nährstoffreiche Böden
	Pflanzenschutzmittel (PSM)	Für die Schweiz kulturtypischer Einsatz von Herbiziden, Insektiziden, Fungiziden, Molluskiziden (Anzahl Interventionen pro Kulturgruppe)
	Ammoniakemissionen (NH ₃)	Geschätzte Ammoniakemissionen auf Betriebsebene (kg N/ha)
	Hof- und Recyclingdünger	Lieferungen von Hof- und Recyclingdüngern auf Betriebsebene
	N-Deposition	Eintrag reaktiver N-Verbindungen (z.B. Ammoniak und Stickoxide) über die Luft in Gewässer und Böden (kg N/ha)
Mineraldünger	Kulturtypischer Mineraldüngereinsatz (kg N/ha)	
Agrar-Umweltmassnahmen	Bio-Bewirtschaftung	Beitragsdaten <ul style="list-style-type: none"> • Bio/nicht-Bio • Extensio-Beitrag
	Biodiversitätsförderflächen	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenanteil BFF (%) • Distanz zu BFF (m) • Grösse (m²) oder Alter (Jahre) von BFF
	Schutzgebiete	Flächenanteil Natur- und Heimatschutz: Moore, Auen, Amphibienlaichgebiete, Trockenwiesen- und Weiden (%)
	Strukturen	<ul style="list-style-type: none"> • Asthaufen (m²) • Kleine Gewässer und Pfützen (m²) • Fels/Stein/Schutt/Geröll (m²) • Lesesteinhaufen (m²) • Trockenmauern/Ruinen (Anzahl)

Entflechtung von Faktoren auf Landschaftsebene

Die für die Auswertungen als geeignet eingestuft Faktoren wurden mit den Biodiversitätsindikatoren verknüpft und mit Hilfe von Strukturgleichungsmodellen (SGM) analysiert. Diese Methode ermöglichte es, die Faktoren nicht isoliert voneinander, sondern in einer möglichst realitätsnahen logischen Abfolge zu bewerten und die direkten und indirekten Wirkungen der einzelnen Faktoren abzubilden. Um die Effekte der verschiedenen Faktoren bewerten zu können, wurde aus allen für die statistische Modellierung geeigneten Variablen ein Set von Variablen ausgewählt, die möglichst einfach ökologisch interpretierbar, aber innerhalb der Kategorie

unabhängig voneinander sind (Korrelationswert nach Pearson $<0,6$). Zusätzlich wurde die Multikollinearität anhand des Varianzinflationsfaktors (<5) überprüft und die Auswahl der Variablen weiter eingeschränkt.

Die statistische Modellierung wurde mit der Strukturgleichungsmodellierung und nach den gleichen statistischen Kriterien wie in Meier *et al.* (2022) durchgeführt, um ein Modell mit einer möglichst guten Modellpassung zu entwickeln. Das resultierende SGM (Abb. 1) zeigt also die Pfade zwischen den Variablen, die während des Modellierungsprozesses beibehalten wurden und durch die ausgewählten Variablen möglichst gut erklärt werden können. Es sind sowohl die indirekten Effekte (schwarze

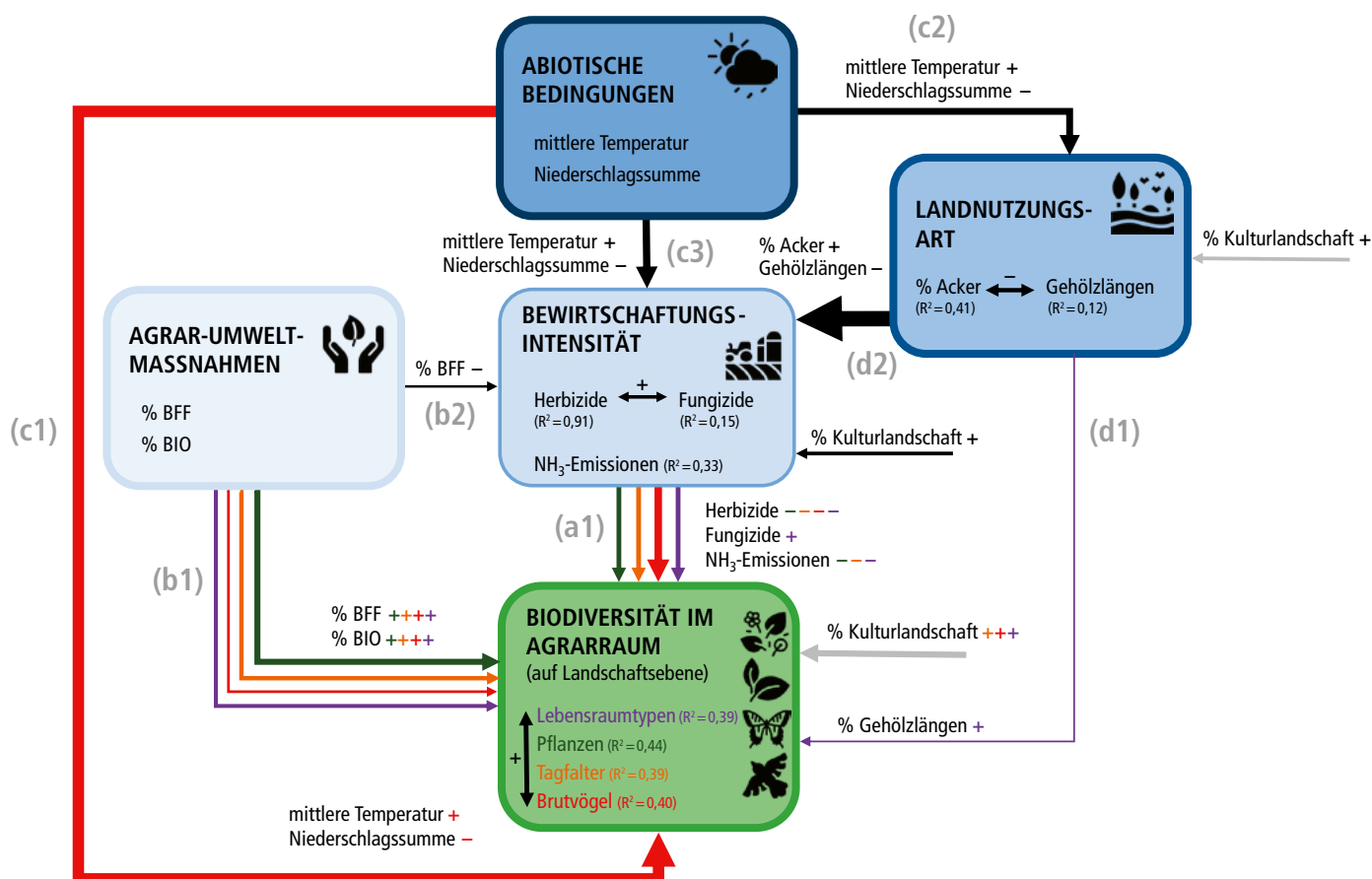


Abbildung 1 | Strukturgleichungsmodell (SGM), welches die direkten (farbige Pfeile) und indirekten Auswirkungen (schwarze Pfeile) der Faktoren-Kategorien (blaue Boxen) auf die Arten- und Lebensraumvielfalt der landwirtschaftlich genutzten Flächen darstellen (d.h. Pflanzen, Tagfalter, Brutvögel und Lebensraumtypen; grüne Box). Der Flächenanteil (%) der offenen Kulturlandschaft (graue Pfeile) wurde als Faktor in der Modellierung berücksichtigt, da er zwischen den Quadraten variierte. Abkürzungen: BFF = Biodiversitätsförderflächen; BIO = Biologische-Bewirtschaftung; NH₃-Amissionen = Ammoniak-Emissionen. Die Liniendicke der Pfade ist proportional zu den Werten der standardisierten Koeffizienten (für Variablengruppen: maximaler Wert pro Kategorie). Die Richtung der standardisierten Koeffizienten ist mit einem «+» oder «-» angegeben. Doppelpfeile zeigen Kovarianzen zwischen zwei Variablen an. Für die vier Biodiversitätsindikatoren ist der Einfachheit halber nur ein Doppelpfeil dargestellt, obwohl Kovarianzen zwischen allen vier Variablen auftreten. R² = Bestimmtheitsmass, dieses zeigt wie gut sich die unabhängigen Variablen eignen, um die Varianz der abhängigen Variablen zu erklären. Die einzelnen Pfade (a1–d2) sind im Abschnitt Resultate beschrieben und die genauen Werte der standardisierten Koeffizienten, standardisierten Fehler und Signifikanzwerte sind in Tab. 2 angegeben. © verwendete Icons: <https://icons8.com>

Pfeile) dieser Faktoren (2–3 pro Kategorie; blaue Kästen) mit Einfluss auf die Biodiversität (grüner Kasten) als auch die direkten Pfade zwischen den Faktoren und den Biodiversitätsindikatoren (farbige Pfeile) dargestellt. Die Dicke der Pfeile zwischen den verschiedenen Grössen ist proportional zu den Korrelationskoeffizienten. Der Flächenanteil (%) der offenen Kulturlandschaft (graue Pfeile) wurde als Faktor in der Modellierung berücksichtigt, da er zwischen den Quadraten variierte. Die Werte der standardisierten Koeffizienten, standardisierten Fehler und Signifikanzwerte sind in Tabelle 2 zu finden.

Resultate – direkte und indirekte Faktoren

Bewirtschaftungsintensität

Von den untersuchten Indikatoren zur Bewirtschaftungsintensität korrelierten vor allem Herbizide und Ammoniakemissionen negativ mit der Artenvielfalt (Abb. 1, Pfad a1). Lediglich für Fungizide stellten wir einen positiven Zusammenhang mit der Vielfalt der Lebensraumtypen fest, vermutlich weil sie mit einem Faktor der Landnutzungsart korrelieren, der die Vielfalt der Lebensraumtypen fördert. Innerhalb der Bewirtschaftungsintensität zeigte die Kovarianz (Doppelpfeil) zwischen Herbiziden und Fungiziden, dass diese Variablen tendenziell positiv miteinander assoziiert sind. Zudem deutete das hohe Bestimmtheitsmass (R^2) des Indikators Herbizide darauf hin, dass dieser Faktor besonders gut durch die verschiedenen untersuchten Faktoren (abiotisch, Landnutzungsart und Agrar-Umweltmassnahmen) erklärt wurde.

Biodiversitätsförderflächen und Bio-Bewirtschaftung

Für die BFF-Anteile sowie die Bio-Bewirtschaftung zeigte das Modell einen direkten positiven Einfluss auf alle vier untersuchten Biodiversitätsindikatoren (Abb. 1, Pfad b1). Darüber hinaus wurde ersichtlich, dass die BFF die Biodiversität auch indirekt über die Bewirtschaftungsintensität beeinflussen konnten, indem sie der Bewirtschaftungsintensität einer Landschaft entgegenwirkten und damit indirekt die Biodiversität förderten (Abb. 1, Pfad b2). In der Auswertung konnte hingegen kein indirekter Pfad von der Bio-Bewirtschaftung über die Bewirtschaftungsintensität zur Biodiversität nachgewiesen werden. Letzteres könnte zumindest teilweise damit zusammenhängen, dass bei der Berechnung des mittleren kulturtypischen Pflanzenschutzmitteleinsatzes nicht zwischen biologischer und konventioneller Bewirtschaftung unterschieden werden konnte.

Abiotische Bedingungen

Die abiotischen Bedingungen, in erster Linie die mittlere Temperatur (Tab. 2), hatten einen direkten Einfluss auf die Brutvogeldiversität, standen aber in keinem direkten Zusammenhang mit den drei anderen Biodiversitätsindikatoren (Abb. 1, Pfad c1). So schien die Brutvogeldiversität in tieferen Lagen mit höheren Temperaturen grösser zu sein.

Günstige abiotische Bedingungen (z.B. warmes, aber nicht zu niederschlagsreiches Klima) wirkten sich offenbar vor allem indirekt auf die Artenvielfalt aus. Einerseits hingen sie mit der Art der Landnutzung zusammen (Abb. 1, Pfad c2), andererseits beeinflussten sie die Nutzungsintensität pro landwirtschaftlich genutzte Fläche (Abb. 1, Pfad c3). Insbesondere hohe Ackerflächenanteile schienen also u.a. das Ergebnis günstiger abiotischer Bedingungen zu sein. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass in Landschaften mit günstigen Umweltbedingungen nicht nur mehr Fläche landwirtschaftlich genutzt wurde (z.B. hier Flächenanteile an Acker in den Untersuchungsgebieten), sondern gleichzeitig auch die Nutzungsintensität höher war.

Landnutzungsart

Als direkten Pfad zwischen Landnutzungsart und Biodiversitätsindikatoren konnten wir einzig eine positive Korrelation zwischen Gehölzrandlängen und der Vielfalt der Lebensraumtypen beobachten (Abb. 1, Pfad d1). Die Biodiversitätsindikatoren wurden vor allem indirekt durch die Art der Landnutzung beeinflusst, indem insbesondere der Anteil des Ackerlandes an der Agrarlandschaft einen deutlichen Einfluss auf die Bewirtschaftungsintensität der landwirtschaftlich genutzten Flächen zeigte. Dies äusserte sich im Modell dadurch, dass die Nutzungsintensität einer Landschaft, hier repräsentiert durch Pflanzenschutzmitteleinsatz (Herbizide, Fungizide) und Ammoniakemissionen (sie stehen für die Dichte an landwirtschaftlichen Nutztieren), durch einen hohen Ackerflächenanteil stark zunahm (Abb. 1, Pfad d2). Bei der Kategorie Landnutzungsart zeigte das Modell eine negative Kovarianz zwischen Ackerflächenanteilen und Gehölzlängen.

Diskussion

Nutzungsintensität reduziert Biodiversität direkt

Dass ein intensiver Einsatz von Agrochemikalien eine Reihe unerwünschter Auswirkungen auf die Umwelt haben kann, wurde schon früh beobachtet (z.B. McLaughlin & Mineau, 1995) und ein intensiverer Einsatz von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln gelten als eine der Haupt-

ursachen für den Rückgang der Artenvielfalt in der Landwirtschaft (Andrade *et al.*, 2021). Unsere Ergebnisse auf der nationalen Ebene der Schweiz bestätigen den direkten negativen Einfluss intensiver Bewirtschaftung auf die Diversität der Lebensräume und drei Organismengruppen auf Landschaftsebene. Gerade die Herbizide liessen sich durch die verschiedenen Faktoren gut erklären und stellten somit einen besonders aussagekräftigen Indikator zur Abbildung der Landnutzungsintensität dar. Die Ergebnisse zeigen also, dass Herbizide nicht nur die lokale Artenvielfalt von Pflanzen beeinflussen können, sondern auch auf der Landschaftsebene über trophische Interaktionskaskaden die Vielfalt anderer Organismengruppen verringern können (Brühl & Zaller, 2021). Für Fungizide stellten wir jedoch einen positiven Zusammenhang mit der Vielfalt der Lebensraumtypen fest, vermutlich weil sie mit einem Faktor korrelieren, der die Vielfalt der Lebensraumtypen fördert. Dieses Muster könnte darauf hindeuten, dass in Landschaften mit höherer Habitatvielfalt vermehrt Kulturen angebaut werden, die tendenziell mit einem höheren Fungizideinsatz verbunden sind (z.B. Dauerkulturen wie Obst- oder Weinbau). Allgemein ist zu beachten, dass die SGM zwar Korrelationen aufzeigen können, zur Überprüfung von Kausalitäten jedoch spezifische Experimente erforderlich wären. Leider stehen heute für Forschungszwecke keine Daten zum Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmittel sowie Informationen zur Humus- und Nährstoffbilanz für die Bewertung vom Einfluss von Bewirtschaftung auf Ebene der einzelnen Felder zur Verfügung. Solche Daten wären in den Feldkalendern vorhanden und sollten digitalisiert und für die Forschung zugänglich gemacht werden. Für die Anwendung von Pflanzenschutzmittel gilt ab 2025 eine digitale Mitteilungspflicht in der Webanwendung digiFlux (<https://digiflux.info>), wobei die Daten dann auch in anonymisierter und aufbereiteter Form für die Forschung zur Verfügung stehen sollten. Für Nährstoffe bzw. Düngemittel wird jedoch nur der Handel mitteilungsspflichtig sein.

Hohe Flächenanteile an BFF fördern die Artenvielfalt

Von Studien, die sich auf Auswertungen auf lokaler Ebene konzentriert haben, sind positive Effekte von Biodiversitätsförderflächen bekannt (z.B. Aviron *et al.*, 2009; Batáry *et al.*, 2015; Kleijn & Sutherland, 2003; Knop *et al.*, 2006). Im Einklang mit Ritschard *et al.* (2019) und Zingg *et al.* (2019) unterstreicht unsere Auswertung die Bedeutung hoher Flächenanteile von BFF in einer Landschaft und zeigt, dass sie sowohl direkt wie auch indirekt zu einer höheren Biodiversität von Agrarlandschaften beitragen können, indem sie negativen Folgen einer

Tabelle 2 | Ergebnisse des Strukturgleichungsmodells (SGM). Standardisierte Koeffizienten (Schätzungswerte (Estimates)), standardisierte Fehler («Std. Fehler»), Signifikanzwerte («P-Wert») für alle erklärenden Variablen sowie Kovarianzen. Die abhängigen Variablen (in hellblau) werden durch eine oder mehrere unabhängige Variablen erklärt.

Variable	Schätzungswert	Std. Fehler	P-Wert
% Acker			
% Kulturlandschaft	0,161	0,060	0,007
mittlere Temperatur	0,397	0,062	<0,001
Niederschlagssumme	-0,386	0,058	<0,001
Gehölzlängen			
% Kulturlandschaft	0,218	0,072	0,003
mittlere Temperatur	0,286	0,072	<0,001
Herbizide			
mittlere Temperatur	0,114	0,027	<0,001
% Acker	0,890	0,027	<0,001
Fungizide			
mittlere Temperatur	0,226	0,081	0,005
Niederschlagssumme	-0,104	0,057	0,066
% Acker	0,157	0,084	0,064
NH₃-Emissionen			
% Kulturlandschaft	0,221	0,065	0,001
mittlere Temperatur	0,422	0,074	<0,001
Niederschlagssumme	-0,181	0,066	0,006
Gehölzlängen	-0,165	0,067	0,013
% BFF	-0,141	0,070	0,044
Lebensraumtypen			
% Agrarlandschaft	0,280	0,053	<0,001
Gehölzlängen	0,081	0,051	0,117
% BFF	0,212	0,063	0,001
% BIO	0,233	0,058	<0,001
Herbizide	-0,270	0,071	<0,001
Fungizide	0,107	0,059	0,070
NH ₃ -Emissionen	-0,260	0,064	<0,001
Pflanzen			
% BFF	0,347	0,061	<0,001
% BIO	0,201	0,057	<0,001
Herbizide	-0,224	0,062	<0,001
NH ₃ -Emissionen	-0,273	0,061	<0,001
Tagfalter			
% Agrarlandschaft	0,187	0,055	0,001
% BFF	0,246	0,063	<0,001
% BIO	0,170	0,059	0,004
Herbizide	-0,269	0,064	<0,001
NH ₃ -Emissionen	-0,277	0,064	<0,001
Brutvögel			
% Agrarlandschaft	0,354	0,057	<0,001
mittlere Temperatur	0,663	0,072	<0,001
Niederschlagssumme	-0,176	0,063	0,005
% BFF	0,159	0,065	0,015
% BIO	0,160	0,059	0,007
Herbizide	-0,434	0,076	<0,001
Kovarianzen			
% Acker			
Gehölzlängen	-0,247	0,059	<0,001
Herbizide			
Fungizide	0,202	0,026	<0,001
Pflanzen			
Tagfalter	0,220	0,046	<0,001
Brutvögel	0,175	0,045	<0,001
Lebensraumtypen	0,275	0,047	<0,001
Tagfalter			
Brutvögel	0,159	0,046	0,001
Lebensraumtypen	0,174	0,046	<0,001
Brutvögel			
Lebensraumtypen	0,117	0,045	0,009

intensiven Bewirtschaftung entgegenwirken. Damit schaffen sie wichtige Nahrungs-, Rückzugs-, Nist- und Überwinterungsmöglichkeiten, die in intensiv genutzten Landschaften sonst nicht ausreichend zur Verfügung stehen. Damit tragen BFF auf einer grösseren räumlichen Skala zur Erhöhung der Landschaftsheterogenität, d.h. der Vielfalt der Anzahl und Anordnung verschiedener Landnutzungstypen bei, die für die Förderung der Biodiversität von entscheidender Bedeutung ist (Benton *et al.*, 2003; Meier *et al.*, 2022). Diese Studie zielte darauf ab, die Bedeutung des Flächenanteils von BFF in einer Agrarlandschaft im Zusammenhang mit weiteren Variablen der Landnutzung und abiotischen Faktoren zu untersuchen, deshalb wurde allgemein der Flächenanteil aller BFF-Typen zusammen betrachtet. In anderen Studien von ALL-EMA wurden bereits detailliertere Auswertungen zu einzelnen BFF-Typen gemacht (Meier *et al.* 2022; Meier *et al.* 2024).

Interessanterweise konnte kein indirekter Pfad der Bio-Bewirtschaftung über die Landnutzungsintensität auf die Artenvielfalt beobachtet werden, was jedoch möglicherweise auf ein methodisches Problem bei der Ableitung dieses Indikators zurückzuführen ist (siehe Resultate, Abschnitt Biodiversitätsförderflächen und Bio-Bewirtschaftung). Im Gegensatz dazu zeigte das Modell einen direkten positiven Zusammenhang zwischen Bio-Bewirtschaftung und Biodiversität auf Landschaftsebene. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass eine angepasste Bewirtschaftung nicht nur lokal positive Auswirkungen haben kann, sondern die Biodiversität ganzer Landschaften erhöhen kann. Somit wird deutlich, dass die Wirkung von Bewirtschaftungsstrategien auf die Biodiversität kontext-abhängig ist (Winqvist *et al.*, 2012) und verschiedene Faktoren auf grösseren räumlichen Skalen berücksichtigt werden sollten, um Massnahmen evaluieren und zielgerichtet umsetzen zu können.

Abiotische Bedingungen wirken direkt und gleichzeitig indirekt

Unsere Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung des indirekten Einflusses abiotischer Bedingungen auf den Zustand der Biodiversität in der Agrarlandschaft, so dass in Landschaften mit günstigen Umweltbedingungen (in unserem Fall warme Temperaturen im Jahresmittel) die Nutzungsintensität von landwirtschaftlichen Flächen zunimmt. Hingegen wirkten sich in unserer Auswertung abiotische Faktoren auf Landschaftsebene nur bei den Brutvögeln über den direkten Pfad aus, welche von warmem aber nicht zu niederschlagsreichen Klima profitieren, welches allgemein jenem des Tieflandes entspricht. Diese Beobachtung erscheint unerwartet im Vergleich

zu einer ersten Auswertung des Zustands der Biodiversität im Rahmen von ALL-EMA, die ein Defizit der Brutvogeldiversität in der Talzone zeigte (Meier *et al.*, 2021). Gleichzeitig zeigten Meier *et al.* (2021) aber auch eine vergleichsweise geringe Anzahl an Brutvogelarten in den Sömmerungsgebieten. Zusammen mit den hier gefundenen Resultaten deutet dies darauf hin, dass die Brutvogeldiversität in den tieferen Lagen zwar vom vorherrschenden Klima profitiert, letztlich aber vom negativen Einfluss der intensiven Landnutzung überlagert wird. Im Sömmerungsgebiet hingegen, scheint der negative Einfluss des kalten Klimas die Artenzahl der Brutvögel stärker zu beeinflussen, als der dort vorherrschende positive Einfluss einer weniger intensiven Bewirtschaftung. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass die hier gezeigten Resultate bzw. das Modell anders aussehen könnte, wenn andere Variablen verwendet würden, z.B. die Diversität von Organismenuntergruppen mit bestimmten Merkmalen statt die allgemeine Artenzahl bezogen auf die Agrarlandschaft in den Untersuchungsquadraten. Beispielsweise wurde im Modell von Meier *et al.* (2022) wie in unserer Auswertung ein direkt positiver Effekt von warmen Temperaturen auf Brutvögel mit begrenztem Zugverhalten beobachtet, jedoch kein negativer Einfluss des dort verwendeten Index der Landnutzungsintensität. Auch wurden in unserem Modell klimatische Faktoren als Indikatoren für den Einfluss abiotischer Bedingungen verwendet, wobei zu betonen ist, dass diese im Allgemeinen gut mit anderen abiotischen Bedingungen, wie z.B. topographischen Eigenschaften, korrelieren und meist gemeinsam die landwirtschaftliche Nutzung beeinflussen (z.B. Meier *et al.*, 2022; Yamaura *et al.*, 2011). Solche indirekten Zusammenhänge zwischen abiotischen Bedingungen und Landnutzung auf Landschaftsebene wurden in bisherigen Forschungsarbeiten kaum berücksichtigt. Unsere Ergebnisse verdeutlichen jedoch einen starken indirekten Zusammenhang zwischen abiotischen Bedingungen und Biodiversität und sollten daher bei der Gestaltung biodiversitätsfreundlicher Landschaften unbedingt stärker berücksichtigt werden, z.B. durch standortangepasste Bewirtschaftung. Unsere Resultate zeigen auch, dass biodiversitätsfördernde Massnahmen insbesondere in Landschaften mit abiotisch förderlichen Anbaubedingungen besonders wichtig sind, da dort der Druck auf die Biodiversität durch die intensivere Bewirtschaftung hoch ist. Im Berggebiet hingegen, in dem die Bewirtschaftungsintensität naturgemäss geringer ist, helfen die biodiversitätsfördernden Massnahmen die traditionelle Bewirtschaftung und die damit verbundene Biodiversität aufrecht zu erhalten (Kampmann *et al.*, 2012).

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie mit Biodiversitätsdaten (d.h. Pflanzen, Tagfalter, Brutvögel und Lebensraumtypen) aus drei nationalen Monitoringprogrammen verdeutlichen, dass auf der Landschaftsebene neben direkten Faktoren wie Landnutzungsart, Bewirtschaftungsintensität und Biodiversitätsförderflächen wichtige abiotische Faktoren wie die mittlere Temperatur die Biodiversität nicht nur direkt, sondern auch indirekt beeinflussen. Zum Beispiel geschieht dies, indem sie die Art und Intensität der Landnutzung mitbestimmen. Es ist deshalb notwendig für agrarpolitische Massnahmen, beispielsweise Vernetzungsprojekte, zur Förderung der grossräumigen Biodiversität auch indirekte Zusammenhänge auf Landschaftsebene möglichst umfassend zu berücksichtigen. Der hier präsentierte Ansatz beschränkt sich auf eine Auswahl verschiedener verfügbarer Faktoren, zeigt aber die Bedeutung der vielfältigen Beziehun-

gen zwischen den, die Biodiversität beeinflussenden, Faktoren auf. Um den Zustand und die Entwicklung der Biodiversität einschliesslich des Beitrags verschiedener agrarpolitischen Massnahmen möglichst umfassend beurteilen und letztere damit noch wirksamer ausrichten zu können, sind deshalb ganzheitliche Ansätze zu wählen, die möglichst verschiedene verfügbare Datengrundlagen einbeziehen. ■

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Landwirtschaft BLW für die finanzielle Förderung vom Monitoringprogramm ALL-EMA und beim BAFU für die Bereitstellung der BDM- und MHB-Daten. Zudem bedanken wir uns bei allen Spezialistinnen und Spezialisten der Monitoringprogramme für die Erhebung der Daten. Ein weiterer Dank geht an alle Projektpartnerinnen und -partner die die Programme unterstützt haben, wie z.B. Programmierung der Feld-App, Luftbildinterpretation sowie alle Personen, die uns bei der Sammlung von Datensätzen zu verschiedenen Faktoren unterstützt sowie Datensätze bereitgestellt haben.

Literatur

- Andrade, C., Villers, A., Balent, G., Bar-Hen, A., Chadoeuf, J., Cylly, D., Cluzeau, D., Fried, G., Guillocheau, S., Pillon, O., Porcher, E., Tressou, J., Yamada, O., Lenne, N., Jullien, J., & Monestiez, P. (2021). A real-world implementation of a nationwide, long-term monitoring program to assess the impact of agrochemicals and agricultural practices on biodiversity. *Ecology and Evolution*, *11*(9), 3771–3793. <https://doi.org/10.1002/ECE3.6459>
- Aviron, S., Nitsch, H., Jeanneret, P., Buholzer, S., Luka, H., Pfiffner, L., Pozzi, S., Schüpbach, B., Walter, T., & Herzog, F. (2009). Ecological cross compliance promotes farmland biodiversity in Switzerland. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *7*(5), 247–252. <https://doi.org/10.1890/070197>
- BAFU und BLW (2008). Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. *Umwelt-Wissen* Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221 S.
- BAFU und BLW (2016). Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. *Umwelt-Wissen* Nr. 1633: 114 S.
- Baguette, M., Blanchet, S., Legrand, D., Stevens, V. M., & Turlure, C. (2013). Individual dispersal, landscape connectivity and ecological networks. *Biological Reviews*, *88*(2), 310–326. <https://doi.org/10.1111/brv.12000>
- Batáry, P., Báldi, A., Kleijn, D., & Tschamtker, T. (2011). Landscape-moderated biodiversity effects of agri-environmental management: a meta-analysis. *Proceedings. Biological Sciences*, *278*(1713), 1894–1902. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2010.1923>
- Batáry, P., Dicks, L. V., Kleijn, D., & Sutherland, W. J. (2015). The role of agri-environment schemes in conservation and environmental management. *Conservation Biology*, *29*(4), 1006–1016. <https://doi.org/10.1111/cobi.12536>
- Benton, T. G., Vickery, J. A., & Wilson, J. D. (2003). Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution*, *18*(4), 182–188. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00011-9)
- Biodiversitätsmonitoring Schweiz. (2021). Anleitung für die Feldarbeit zum Indikator «Z7-Tagfalter». Bern, Bundesamt für Umwelt.
- Brühl, C. A., & Zaller, J. G. (2021). Indirect herbicide effects on biodiversity, ecosystem functions, and interactions with global changes. *Herbicides*, *231*–272. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823674-1.00005-5>
- Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *121*(3), 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>
- Bundesrat (2013). Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV; SR 910.13). 23. Oktober 2013, Bern.
- Creamer, R. E., Barel, J. M., Bongiorno, G., & Zwetsloot, M. J. (2022). The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, *166*, 108561. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2022.108561>
- Elliott, T., Thompson, A., Klein, A. M., Albert, C., Eisenhauer, N., Jansen, F., Schneider, A., Sommer, M., Straka, T., Settle, J., Sporbert, M., Tanneberger, F., & Mupepele, A. C. (2023). Abandoning grassland management negatively influences plant but not bird or insect biodiversity in Europe. *Conservation Science and Practice*. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/csp.213008>
- Kampmann, D., Lüscher, A., Konold, W., & Herzog, F. (2012). Agri-environment scheme protects diversity of mountain grassland species. *Land Use Policy*, *29*(3), 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.09.010>
- Kleijn, D., & Sutherland, W. J. (2003). How effective are European schemes in and promoting conserving biodiversity? *Journal of Applied Ecology*, *40*(6), 947–969. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2003.00868.x>
- Knop, E., Kleijn, D., Herzog, F., & Schmid, B. (2006). Effectiveness of the Swiss agri-environment scheme in promoting biodiversity. *Journal of Applied Ecology*, *43*(1), 120–127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01113.x>
- Landis, D. A. (2017). Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. *Basic and Applied Ecology*, *18*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.BAAE.2016.07.005>
- Matson, P. A. a, Parton, W. J. J., Power, A. G. G., & Swift, M. J. J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, *277*(5325), 504–509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- McKinney, M. L. (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. *BioScience*, *52*(10), 883–890.
- McLaughlin, A., & Mineau, P. (1995). The impact of agricultural practices on biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *55*(3), 201–212. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)00609-V](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)00609-V)

- Meier, E., Lüscher, G., Buholzer, S., Herzog, F., Indermaur, A., Riedel, S., Winizki, J., Hofer, G., & Knop, E. (2021). Zustand der Biodiversität in der Schweizer Agrarlandschaft. *Agroscope Science | Nr.* **111**, 2021. <https://doi.org/10.34776/as111g>
- Meier, E. S., Lüscher, G., Herzog, F., & Knop, E. (2024). Collaborative approaches at the landscape scale increase the benefits of agri-environmental measures for farmland biodiversity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **367**. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108948>
- Meier, E. S., Lüscher, G., & Knop, E. (2022). Disentangling direct and indirect drivers of farmland biodiversity at landscape scale. *Ecology Letters*, **25**(11), 2422–2434. <https://doi.org/10.1111/ELE.14104>
- Poiani, K. A., Richter, B. D., Anderson, M. G., & Richter, H. E. (2000). *Biodiversity Conservation at Multiple Scales: Functional Sites, Landscapes, and Networks*. <https://academic.oup.com/bioscience/article/50/2/133/321884>
- Riedel, S., Widmer, S., Babbi, M., Buholzer, S., Grünig, A., Herzog, F., Richner, N., & Dengler, J. (2023). The Historic Square Foot Dataset – Outstanding small-scale richness in Swiss grasslands around the year 1900. *Journal of Vegetation Science*, **34**(5). <https://doi.org/10.1111/jvs.13208>
- Ritschard, E., Zingg, S., Arlettaz, R., & Humbert, J.-Y. (2019). Biodiversitätsförderflächen: Vögel und Tagfalter profitieren von der Fläche und Qualität. *Agrarforschung Schweiz*, **10**(5), 206–213. <https://doi.org/10.24451/arbor.16720>
- Schmid, H., N. Zbinden & V. Keller (2004). Überwachung der Bestandsentwicklung häufiger Brutvögel in der Schweiz. Schweizerische Vogelwarte, Sempach.
- Tilman, D., Clark, M., Williams, D. R., Kimmel, K., Polasky, S., & Packer, C. (2017). Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature*, **546**(7656), 73–81. <https://doi.org/10.1038/NATURE22900>
- Tschardtke, T., Grass, I., Wanger, T. C., Westphal, C., & Batáry, P. (2021). Beyond organic farming – harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, **36**(10), 919–930. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2021.06.010>
- Winqvist, C., Ahnström, J., & Bengtsson, J. (2012). Effects of organic farming on biodiversity and ecosystem services: taking landscape complexity into account. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1249**(1), 191–203. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06413.x>
- Yamaura, Y., Amano, T., Kusumoto, Y., Nagata, H., & Okabe, K. (2011). Climate and topography drives macroscale biodiversity through land-use change in a human-dominated world. *Oikos*, **120**(3), 427–451. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0706.2010.18764.X>
- Zingg, S., Ritschard, E., Arlettaz, R., & Humbert, J. Y. (2019). Increasing the proportion and quality of land under agri-environment schemes promotes birds and butterflies at the landscape scale. *Biological Conservation*, **231**(December 2018), 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.12.022>