



Umweltwirkungen von Landwirtschaftsbetrieben mit Hilfe von Indikatoren messen und optimieren

Synthesebericht des Agroscope
Forschungsprogramms Indicate



Autorinnen und Autoren

Thomas Anken, Simon Baumgartner, Joël Bérard, Silvio Blaser, Luca Bragazza, Christoph Carlen, Frigga Dohme-Meier, Nadja El Benni, Yvonne Fabian, Christian Flury, Gina Garland, Anina Gilgen, Thomas Guillaume, Franziska Häfner, Juan Manuel Herrera, Anna-Lena Hütten, Olivier Huguenin-Elie, Pierrick Jan, Philippe Jeanneret, Margret Keck, Valentin H. Klaus, Frank Liebisch, Maud Liégeois, Stefan Mann, Lutz Merbold, Thomas Nemecek, Andreas Lüscher, Nabil Mehaba, Barbara Meija, Konrad Metzger, Manika Rödiger, Andreas Roesch, Sergei Schaub, Patrick Schlegel, Jérôme Schneuwly, Sabine Schrade, Coralie Triquet, Florian Walder

Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	Nadja.elbenni@agroscope.admin.ch
Lektorat	Erika Meili
Titelbild	Gabriela Brändle
Download	indicate.agroscope.ch
Copyright	© Agroscope 2025
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as223g

Haftungsausschluss :

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung	5
Résumé	6
Summary	7
Riassunto	8
1 Das Forschungsprogramm Indicate	10
2 Hauptkenntnisse aus den Projekten	11
2.1 Nährstoffflüsse abbilden	11
2.1.1 Einleitung	11
2.1.2 Methoden	12
2.1.3 Ergebnisse	13
2.1.4 Fazit	16
2.2 Nährstoffmanagement Hofdünger	17
2.2.1 Einleitung	17
2.2.2 Methoden	17
2.2.3 Hauptergebnisse	18
2.2.4 Fazit	20
2.3 Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen	21
2.3.1 Einleitung	21
2.3.2 Methoden	22
2.3.3 Hauptergebnisse	23
2.3.4 Fazit	25
2.4 Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung	26
2.4.1 Einleitung	26
2.4.2 Methoden	26
2.4.3 Hauptergebnisse	31
2.4.4 Fazit	35
2.5 Indikatoren Biodiversität	36
2.5.1 Einleitung	36
2.5.2 Methoden	37
2.5.3 Hauptergebnisse	38
2.5.4 Fazit	39
2.6 Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland	40
2.6.1 Einleitung	40
2.6.2 Methoden	41
2.6.3 Hauptergebnisse	42
2.6.4 Fazit	44
3 Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung	46
3.1 Mapping von Umweltindikatoren	46
3.1.1 Einleitung	46
3.1.2 Terminologie der Indikatoren	46
3.1.3 Methoden	47

3.1.4	Ergebnisse: Mapping und Clustering des Indikatorensystems	50
3.1.5	Ergebnisse: Mapping der Indikatoren-Landschaft.....	52
3.1.6	Diskussion	56
3.1.7	Schlussfolgerungen	58
3.2	Mapping sozialer Indikatoren	59
3.2.1	Soziale Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebe	59
3.2.2	Soziale Nachhaltigkeit aus Sicht der Landwirtinnen und Landwirte.....	61
3.2.3	Abdeckung durch Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools	62
3.2.4	Operationalisierung und Aufwand für Datenerhebung	64
3.2.5	Fazit.....	67
3.3	Ökonomische Indikatoren.....	68
3.3.1	Verwendete Indikatoren.....	68
3.3.2	Resultate und Diskussion	68
3.3.3	Fazit.....	70
3.4	Nutzen von Indikatoren zur Nachhaltigkeitsbewertung	70
3.4.1	Einleitung.....	70
3.4.2	Zum geographisch-organisatorischen Bezugsrahmen.....	70
3.4.3	Einordnung im DPSIR-System	70
3.4.4	Nutzen für verschiedene Zielgruppen	71
3.4.5	Zu Risiken und Nebenwirkungen	71
4	Datenflüsse und Farm Management Informations-Systeme.....	72
4.1	Eignung für das betriebliche Management.....	73
4.1.1	Aktueller Stand des Datenmanagements auf Betrieben	73
4.1.2	Vision eines integralen Datensystems für Management und Nachweispflichten.....	73
4.1.4	Standardisierung der Daten	74
4.1.5	Verzahnung der vielen Insellösungen	75
4.1.6	Fallbeispiel «Datenfluss zwischen Tierhaltung und Pflanzenbau»	75
4.1.7	Wie lässt sich Mehrwert für die Praxis generieren?	76
4.2	Eignung für das Agrar-Umwelt-Monitoring	77
4.2.1	Das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz	77
4.2.2	Potenzial von Daten aus FMIS für das Monitoring Agrarumweltsystem Schweiz (MAUS).....	78
4.2.3	Herausforderungen bei der Nutzung von FMIS-Daten für MAUS	79
4.2.4	Konzept der Einbindung von FMIS-Daten ins MAUS.....	79
4.2.5	Pilotprojekt mit barto.....	81
5	Zusammenfassung: Beantwortung der Forschungsfragen	86
6	Fazit.....	90
7	Literaturverzeichnis	91
8	Abbildungsverzeichnis	103
8.1	Übersetzung der englischen Grafikbeschriftungen	104
8.2	Projektabkürzungen in den Grafiken	107
9	Tabellenverzeichnis	108
10	Anhänge	109

Zusammenfassung

Das Ziel des Agroscope Forschungsprogramms Indicate war die Entwicklung von Indikatoren zur Erfassung der Zielerreichung in den Bereichen Nährstoffflüsse, Boden, Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen im Grasland und auf dem Ackerland. Die Indikatoren sollen das Betriebsmanagement unterstützen und die Nachweispflichten in Zusammenhang mit dem Ökologischen Leistungsnachweis vereinfachen. Es wurden neue digitale Datenerhebungs- und Verarbeitungs-Tools genutzt, und die Indikatoren wurden auf ihre praktische Anwendbarkeit hin überprüft. Dabei standen Daten aus Feld- und Stallversuchen, Modellen, bestehenden Datenbanken und der Literatur zur Verfügung. Ergänzend wurden Indikatoren zur ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit aus der Literatur recherchiert, um die Möglichkeit für eine möglichst umfassende Nachhaltigkeitsbewertung in der Schweiz abzuschätzen.

Im Bereich Nährstoffflüsse wurde die geltende, standortangepasste Düngungsempfehlung validiert und die betriebs-spezifische Schätzung von Hofdüngermengen als auch deren Nährstoffgehalten überprüft und Verbesserungsvorschläge gemacht. Ausserdem wurde gezeigt, wie aus der Suisse-Bilanz, dem Vollzugsinstrument für die Beurteilung eines ausgeglichenen, betrieblichen Nährstoffhaushalts, ein Indikator für ein nachhaltiges Stickstoffmanagement generiert werden kann. Zur Unterstützung einer nachhaltigen Bodennutzung wurden Referenzwerte für organische, physikalische und chemische Bodeneigenschaften und eine Best-Practice-Methode zur Messung von Bodenspektren auf dem Feld entwickelt. Die Kombination von Vis-NIR-Bodenspektroskopie mit chemometrischen Modellen erwies sich als eine schnelle und kostengünstige Methode zur Erfassung von Bodenqualitätsindikatoren, die sich zur Analyse der Bodenqualität anbietet. Im Bereich Biodiversität und Ökosystemleistungen wurden Indikatoren entwickelt und getestet, welche für die Planung von Biodiversitätsförderflächen und bei Landnutzungsentscheiden auf dem Betrieb sowie für die Festlegung von Zielwerten für Ökosystemleistungen genutzt werden können.

Im Gegensatz zu ökonomischen Indikatoren, die dem Einkommensmonitoring dienen, werden Indikatoren zur Resilienz landwirtschaftlicher Betriebe, das heisst zu deren Robustheit, Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit gegenüber externen Veränderungen sowie soziale Indikatoren noch nicht systematisch erhoben. Indicate suchte mittels einer Literaturanalyse nach hierfür möglichen Indikatoren. Es zeigte sich, dass eine Erweiterung von Farm Management Informationssystemen (FMIS) mit ökonomischen Indikatoren wie z. B. Kosten die Produktionsentscheidungen auf Betriebszweig- oder Feldebene massgeblich unterstützen könnten.

Trotz Identifizierung einzelner, vielversprechender Indikatoren, insbesondere zur Bewertung spezifischer Umweltbereiche, hat Indicate aber auch aufgezeigt, dass die Entwicklung eines universell nutzbaren Indikatorensets zur Nachhaltigkeitsbewertung der gesamten Schweizer Landwirtschaft – von der Betriebsebene über die Wertschöpfungskette bis hin zu Agrarpolitik – nicht möglich ist. Die Ziele ändern sich abhängig von der Ebene, auf welcher ein Indikator eingesetzt wird. So nennen Schreefel *et al.* (2024) beispielsweise als Indikatoren auf Betriebsebene die Bodenbedeckung über das Jahr (resultatebasierter Indikator), das Vorhandensein eines CO₂-Managementplans (massnahmenbasierter Indikator) oder die Veränderung im Bodenkohlenstoff (Impactindikator). Auf der Ebene der Wertschöpfungskette könnten Indikatoren wie die Bodenbedeckung in der Angebotsregion (resultatebasiert), das Vorhandensein einer Netto-Null-Strategie (massnahmenbasiert) oder die Veränderung des CO₂-Fussabdrucks der Produkte im Sortiment (impactbasiert) herangezogen werden. Für die Agrarpolitik wären etwa die Veränderung der Bodenbedeckung auf nationaler Ebene (resultatebasiert), der Beitrag zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens (massnahmenbasiert) oder die Veränderung der nationalen Treibhausgasemissionen (impactbasiert) denkbare Indikatoren. Zur Bewertung können je nach Indikator Daten aus bestehenden Datenbanken, aus der Fernerkundung, aus Befragungen oder Feldversuchen sowie modellbasierte Daten wie zum Beispiel aus einer Nährstoffbilanz genutzt werden. Zudem haben wir etliche Zielkonflikte festgestellt, z. B. zwischen verständlicher Kommunikation, praxistauglicher Datenerhebung sowie Kontrollierbarkeit, respektive Vollzugstauglichkeit. Wirkungsindikatoren liefern zwar zuverlässigere Aussagen zum Zustand respektive zur Nachhaltigkeit, sind jedoch in der Regel aufwendiger zu erheben als massnahmenbasierte Indikatoren. Trotz wissenschaftlicher Fortschritte bleibt auch die Skalierung einzelner Indikatoren von der Parzellen- auf die Betriebs- oder gar nationale Ebene herausfordernd.

Agroscope empfiehlt eine ziel- und kontextspezifische Entwicklung von Indikatoren unter Einbezug aller relevanten Stakeholder – aus Forschung, Praxis, Beratung, Verwaltung und Industrie. Ein umsetzbares, wirkungsorientiertes

Indikatorenset sollte verschiedene Indikatortypen umfassen, darunter Wirkungs-, Zustands-, Treiber- und Druckindikatoren.

FMIS haben ein grosses Potenzial, die weitere Nutzung von Indikatoren in der Nachhaltigkeitsbewertung der Schweizer Landwirtschaft zu ermöglichen und weiterzuentwickeln. Noch ist das Potenzial nicht ausgeschöpft, insbesondere bedarf es eines Ausbaus der Software. Auf Ebene des Betriebsmanagements zum Beispiel muss der Datenfluss zwischen verschiedenen Anwendungen (Software-Tools) automatisiert und vollständig sein (z. B. um die Nährstoffflüsse von der Fütterung über den anfallenden Hofdünger bis hin zur parzellenscharfen Nährstoffausbringung abbilden zu können).

Résumé

L'objectif du programme de recherche Indicate d'Agroscope était de développer des indicateurs permettant de mesurer la réalisation des objectifs dans les domaines des flux d'éléments nutritifs, des sols, de la biodiversité et des services écosystémiques dans les herbages et les terres assolées. Ces indicateurs sont destinés à soutenir la gestion des exploitations et à simplifier le devoir de preuve lié aux prestations écologiques requises. De nouveaux outils numériques de collecte et de traitement des données ont été utilisés et l'adéquation à la pratique des indicateurs a été vérifiée. Les chercheurs disposaient pour ce faire de données provenant d'essais sur le terrain et en étable, de modèles, de bases de données existantes ainsi que de la littérature. Ils ont également recherché des indicateurs de durabilité économique et sociale dans la littérature, afin de déterminer dans quelle mesure une évaluation aussi complète que possible de la durabilité en Suisse était envisageable.

Dans le domaine des flux d'éléments nutritifs, les recommandations en vigueur pour un épandage adapté au site ont été validées. L'estimation à l'échelle de l'exploitation des quantités d'engrais de ferme et de leur teneur en éléments nutritifs a également été vérifiée et des propositions d'amélioration ont été formulées. Le programme de recherche a par ailleurs montré comment générer un indicateur de gestion durable de l'azote à partir du Suisse-Bilanz, instrument d'exécution dont la fonction est d'établir si le bilan des éléments nutritifs à l'échelle de l'exploitation est équilibré. Afin de promouvoir une utilisation durable des sols, des valeurs de référence pour les propriétés organiques, physiques et chimiques des sols ainsi qu'une méthode de référence pour la mesure des spectres de sols sur le terrain ont été développées. La combinaison de la spectroscopie vis-NIR des sols et de modèles chimiométriques convient à l'analyse de la qualité des sols et s'est avérée une méthode rapide et peu coûteuse pour relever les indicateurs de qualité des sols. Dans le domaine de la biodiversité et des services écosystémiques, des indicateurs ont été développés et testés: ils peuvent être utilisés pour la planification de surfaces de promotion de la biodiversité, pour des décisions relatives à l'utilisation du sol dans l'exploitation, ainsi que pour la définition de valeurs cibles en matière de services écosystémiques.

Contrairement aux indicateurs économiques qui servent au monitoring des revenus, les indicateurs sur la résilience des exploitations agricoles – autrement dit leur robustesse, leur résistance et leur capacité d'adaptation aux changements externes – de même que les indicateurs sociaux ne sont pas encore systématiquement relevés. C'est pourquoi Indicate a recherché dans la littérature des indicateurs qui conviendraient à cet effet. Ainsi, développer les systèmes d'information de gestion agricole (FMIS) en y intégrant des **indicateurs économiques** tels que les **coûts** pourrait apporter un soutien décisif aux **décisions de production au niveau des branches d'exploitation ou du terrain**.

Malgré l'identification d'indicateurs individuels prometteurs, en particulier pour l'évaluation de domaines environnementaux spécifiques, Indicate a démontré qu'il n'était pas possible de développer un jeu d'indicateurs universels pour évaluer la durabilité de l'agriculture suisse dans son ensemble – de l'échelon de l'exploitation à celui de la politique agricole, en passant par la chaîne de création de valeur. Les objectifs varient en fonction de l'échelon auquel un indicateur est utilisé. Schreefel *et al.* (2024) citent comme exemple d'indicateurs à l'échelon de l'exploitation la couverture du sol au cours de l'année (basé sur les résultats), l'existence d'un plan de gestion du CO₂ (basé sur les mesures) ou la modification du carbone du sol (indicateur d'impact). À l'échelon de la chaîne de création de valeur, on pourrait utiliser des indicateurs tels que la couverture du sol dans la région de création de valeur (basé sur les résultats), l'existence d'une stratégie zéro émission nette (basé sur les mesures) ou la

modification de l'empreinte CO₂ des produits de la gamme (basé sur l'impact). Au niveau de la politique agricole, des indicateurs envisageables seraient par exemple la modification de la couverture du sol à l'échelon national (basé sur les résultats), la contribution à la mise en œuvre de l'Accord de Paris sur le climat (basé sur les mesures) ou la modification des émissions de gaz à effet de serre à l'échelon national (basé sur l'impact). Selon l'indicateur, l'évaluation peut se fonder sur des données issues de bases de données existantes, de la télédétection, d'enquêtes ou d'essais sur le terrain, ainsi que sur des données modélisées, provenant par exemple d'un bilan de fumure. Nous avons également identifié quelques conflits d'objectifs, par exemple entre une communication compréhensible, une collecte de données pratique ainsi qu'une contrôlabilité ou faisabilité de l'exécution. Les indicateurs basés sur l'impact fournissent certes des informations plus fiables sur l'état ou la durabilité, mais ils sont généralement plus difficiles à relever que les indicateurs basés sur les mesures. Malgré les progrès scientifiques, transposer à l'échelle de l'exploitation – voire à l'échelle du pays – des indicateurs relatifs à la parcelle, demeure un défi.

Agroscope recommande de développer des indicateurs spécifiques à un objectif et à un contexte donné, en impliquant toutes les parties prenantes, qu'elles appartiennent à la recherche, à la pratique, à la vulgarisation, à l'administration ou encore à l'industrie. Un jeu d'indicateurs applicable et axé sur les résultats devrait comprendre différents types d'indicateurs, notamment des indicateurs d'impact, d'état, d'orientation et de pression.

Les FMIS offrent un grand potentiel pour permettre et développer l'utilisation d'indicateurs dans l'évaluation de la durabilité de l'agriculture suisse. Ce potentiel n'est pas encore pleinement exploité et il est notamment nécessaire de perfectionner les logiciels. Au niveau de la gestion des exploitations par exemple, le flux de données entre les différentes applications (outils logiciels) doit être automatisé et complet (afin de pouvoir représenter – entre autres – les flux d'éléments nutritifs, de l'alimentation animale à l'épandage des fertilisants sur les parcelles, en passant par les engrais de ferme générés).

Summary

The aim of the Agroscope Research Programme *Indicate* was to develop indicators for recording the achievement of targets for nutrient flows, soil, biodiversity and ecosystem services in grassland and on farmland. The indicators are meant to support farm management and simplify the reporting requirement in connection with the Proof of Ecological Performance. New digital data collection and processing tools were used and the indicators were examined for practicality. Data from field and stable trials, models, existing databases and the literature were available for this purpose. In addition, economic and social sustainability indicators from the literature were researched to assess the possibility of maximising the comprehensiveness of a sustainability assessment in Switzerland.

In terms of nutrient flows, the current site-adapted fertilisation recommendation was validated, and the farm-specific estimate of farm-manure volumes and nutrient content was reviewed and suggestions for improvement made. In addition, it was shown how Suisse-Bilanz – the enforcement tool for evaluating a balanced farm nutrient budget – could be used to generate an indicator for sustainable nitrogen management. Reference values for organic, physical and chemical soil properties and a best-practice method for measuring soil spectra on the field were developed to support sustainable soil use. The combination of vis-NIR soil spectroscopy and chemometric models proved to be a quick, cost-effective and suitable method for recording and analysing soil quality indicators. For biodiversity and ecosystem services, indicators that can be used in the planning of ecological focus areas, in land-use decisions on the farm, and to set target values for ecosystem services were developed and tested.

In contrast to economic indicators that serve to monitor income, to date there has been no systematic collection either of indicators for the resilience of farms – i.e. their robustness, resistance and adaptability vis-à-vis external changes – or of social indicators. *Indicate* searched for potential indicators in this context by means of a literature analysis. It was shown that supplementing Farm Management Information Systems (FMIS's) with **economic indicators such as costs could significantly support production decisions at production branch or field level.**

Despite the identification of promising individual indicators, more particularly for the evaluation of specific environmental sectors, *Indicate* has also shown the impossibility of developing a universally applicable indicator set for evaluating the sustainability of the entire Swiss agricultural sector from farm level to agricultural policy by way of

the value chain. Targets vary depending on the level on which an indicator is employed. Thus, for example, Schreefel *et al.* (2024) cite soil cover throughout the year (results-based), the presence of a CO₂ management plan (measures-based) or the change in soil carbon (impact indicator) as farm-level indicators. At value-chain level, indicators such as soil cover in the supply region (results-based), the presence of a Net Zero strategy (measures-based) or change in CO₂ footprint of the products in the range (impact-based) could be used. For agricultural policy, change in soil cover at national level (results-based), the contribution for the implementation of the Paris Climate Agreement (measures-based) or change in national greenhouse gas emissions (impact-based) could be conceivable indicators. Depending on the indicator, data from existing databases, remote sensing, surveys or field trials as well as model-based data such as e.g. a nutrient balance could be used for assessment. In addition, we identified a number of trade-offs, e.g. between clear communication, practical data collection and controllability or enforceability. Although impact indicators provide reliable statements on status or sustainability, they are generally more burdensome to collect than measures-based indicators. Despite scientific advances, the scaling of individual indicators from plot level to farm- or even national level also remains a challenge.

Agroscope recommends target- and context-specific development of indicators with the inclusion of all relevant stakeholders – from research, practice, extension, administration and industry. A readily implemented, impact-oriented indicator set should encompass different indicator types, including impact, state, driver and pressure indicators.

FMIS's have great potential for enabling and developing the further use of indicators in the sustainability assessment of Swiss agriculture. The potential is not yet exhausted, and what is particularly needed is an expansion of the software. At farm-management level, for example, the data flow between different applications (software tools) must be automated and complete (e.g. to enable the representation e.g. of nutrient flows – from feed to the accrual of farm manure, to plot-specific nutrient spreading).

Riassunto

Lo scopo del programma di ricerca Indicate di Agroscope era di sviluppare indicatori per rilevare il raggiungimento degli obiettivi in vari settori: flussi di sostanze nutritive, suolo, biodiversità e servizi ecosistemici sulle superfici inerbite e campicole. Gli indicatori sono finalizzati a supportare la gestione aziendale e a semplificare gli obblighi di documentazione relativi alla prova che le esigenze ecologiche sono rispettate. L'impiego di strumenti digitali di nuova generazione ha supportato la raccolta e l'elaborazione dei dati; gli indicatori sono stati inoltre sottoposti a una verifica della loro applicabilità pratica. A tal fine sono stati utilizzati dati provenienti da esperimenti realizzati in pieno campo e nelle stalle, modelli, banche dati esistenti e contributi bibliografici. A titolo integrativo, la ricerca bibliografica ha incluso anche indicatori di sostenibilità economica e sociale, con l'intento di esplorare le possibilità di una valutazione della sostenibilità più esaustiva a livello svizzero.

Per quanto concerne i flussi di sostanze nutritive, è stata convalidata la raccomandazione valida in materia di concimazione adeguata alle condizioni locali e sono state verificate le stime specifiche per azienda dei quantitativi di concimi aziendali nonché il loro contenuto di sostanze nutritive, con la formulazione di proposte di miglioramento. È stata inoltre dimostrata la possibilità di generare un indicatore per una gestione sostenibile dell'azoto a partire dallo Suisse-Bilanz, lo strumento di esecuzione per valutare un bilancio equilibrato delle sostanze nutritive aziendali. A sostegno di un utilizzo sostenibile del suolo sono stati sviluppati valori di riferimento per le proprietà organiche, fisiche e chimiche del suolo nonché un metodo di best practice per misurare gli spettri del suolo sul campo. La combinazione della spettroscopia Vis-NIR del suolo con modelli chemiometrici si è dimostrata un metodo rapido ed economico per determinare gli indicatori della qualità del suolo, utile ai fini dell'analisi complessiva della qualità del suolo. Nel campo della biodiversità e dei servizi ecosistemici, sono stati sviluppati e testati indicatori potenzialmente utili non solo per pianificare superfici per la promozione della biodiversità e decidere in merito all'impiego del suolo a livello di azienda, ma anche per definire i valori target per i servizi ecosistemici.

A differenza degli indicatori economici, che servono a monitorare il reddito, non vengono ancora rilevati in maniera sistematica quelli che riguardano la resilienza delle aziende agricole, ovvero la loro solidità, resistenza e capacità di adattarsi ai cambiamenti esterni nonché gli indicatori sociali. Tramite un'analisi bibliografica, Indicate ha cercato

pertanto alcuni possibili indicatori. È emerso che l'integrazione dei sistemi informativi per la gestione delle aziende agricole (FMIS) con indicatori economici, come per esempio i costi, potrebbe fornire un supporto determinante alle decisioni di produzione, sia a livello di settore aziendale che di campo.

Nonostante l'identificazione di singoli indicatori promettenti, in particolare per valutare settori ambientali specifici, Indicate ha inoltre dimostrato l'impossibilità di sviluppare una serie d'indicatori universalmente utilizzabili per valutare la sostenibilità dell'intera agricoltura svizzera, dal livello aziendale, passando per la catena di creazione del valore e fino ad arrivare alla politica agricola. Gli obiettivi cambiano a seconda del livello di utilizzo dell'indicatore. Per esempio, Schreefel *et al.* (2024), citano come indicatori a livello aziendale la copertura del suolo nel corso dell'anno (sulla base dei risultati), l'esistenza di un piano di gestione del CO₂ (sulla base delle misure) o la variazione del carbonio nel suolo (indicatore dell'impatto). A livello di catena di creazione del valore, potrebbero essere utilizzati indicatori quali la copertura del suolo nella regione dell'offerta (sulla base dei risultati), l'esistenza di una strategia delle emissioni nette pari a zero (sulla base delle misure) o la variazione dell'impronta di carbonio dei prodotti in assortimento (sulla base dell'impatto). Per la politica agricola, alcuni indicatori plausibili potrebbero essere la variazione della copertura del suolo a livello nazionale (sulla base dei risultati), il contributo all'attuazione dell'accordo di Parigi sul clima (sulla base delle misure) oppure la variazione delle emissioni nazionali di gas serra (sulla base dell'impatto). A seconda dell'indicatore, ai fini della valutazione si possono utilizzare dati provenienti da banche dati esistenti, dal telerilevamento, da sondaggi o da esperimenti in pieno campo nonché dati basati su modelli, come per esempio quelli provenienti da un bilancio delle sostanze nutritive. Abbiamo inoltre riscontrato numerosi obiettivi contrastanti, per esempio tra una comunicazione comprensibile, una raccolta dati praticabile e la controllabilità o la possibilità di esecuzione. Sebbene gli indicatori d'impatto forniscano informazioni più affidabili sullo stato o sulla sostenibilità, di norma sono tuttavia più difficilmente rilevabili rispetto a quelli basati sulle misure. Nonostante i progressi scientifici, anche il passaggio dei singoli indicatori dal livello di particella a quello di azienda o addirittura di nazione implica ancora una serie di difficoltà.

Agroscope raccomanda uno sviluppo mirato e specifico al contesto degli indicatori, con il coinvolgimento di tutti gli attori rilevanti, provenienti dal mondo della ricerca, dalla pratica, dalla consulenza, dall'amministrazione e dall'industria. Un insieme d'indicatori attuabile ed efficace dovrebbe comprendere vari tipi d'indicatori, tra cui quelli di effetto, di stato, di fattori determinanti e di pressione.

I FMIS offrono un notevole potenziale per consentire e perfezionare l'impiego degli indicatori al fine di valutare la sostenibilità dell'agricoltura svizzera. Tale potenziale non è stato ancora sfruttato pienamente, in particolare occorre ampliare il software. A livello di gestione aziendale, ad esempio, il flusso dei dati tra le varie applicazioni (strumenti software) deve essere automatizzato e completato (p. es. per poter rappresentare i flussi di sostanze nutritive dall'alimentazione animale, passando per il concime aziendale prodotto, fino allo spandimento di sostanze nutritive sulle singole particelle).

1 Das Forschungsprogramm Indicate

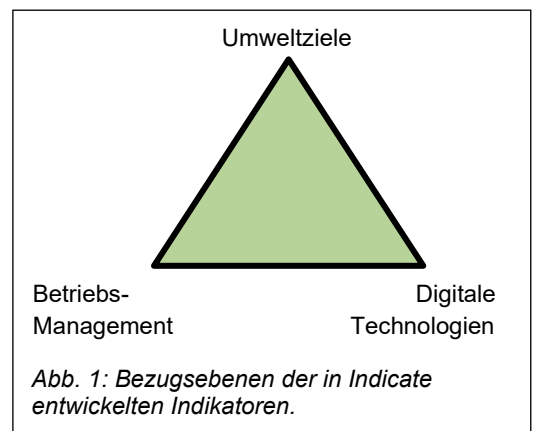
Das Ziel des Agroscope Forschungsprogramms Indicate mit einer Laufzeit von vier Jahren (2021–2024) war die Entwicklung von Indikatoren, welche die Landwirtinnen und Landwirte dabei unterstützen, die Nahrungsmittelproduktion unter Minimierung der Konflikte zu den Umweltzielen Landwirtschaft nachhaltiger zu gestalten. Dabei wurden neben den negativen Umweltwirkungen auch die positiven Umweltleistungen (Ökosystemdienstleistungen), wie die Schaffung von Lebensräumen oder die Speicherung von Kohlenstoff im Boden, berücksichtigt.

Die in Indicate entwickelten Indikatoren fokussieren auf die Erfassung der Zielerreichung in den Bereichen Nährstoffflüsse, Boden, Biodiversität und Ökosystemleistungen im Grasland und auf Ackerflächen. Die Indikatoren sollen mithilfe von bestehenden und neuen Datenerhebungs- und Verarbeitungs-Tools berechnet werden können und sowohl das Betriebsmanagement als auch die Nachweispflichten in Zusammenhang mit dem agrarpolitischen Vollzug unterstützen. Entsprechend wurden die Indikatoren hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit und Nützlichkeit sowohl für das Betriebsmanagement (zur Optimierung der Umweltwirkung der Nahrungsmittelproduktion oder auch für die Nachweispflichten gegenüber von Abnehmern) als auch zur Steuerung der Agrarpolitik beurteilt. Zur Vollständigkeit wurden basierend auf Literaturrecherchen weitere Indikatoren zusammengetragen, die für die Beurteilung der ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit genutzt werden können.

Anforderungen an Indikatoren

Die Indikatoren sollten folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Einfache Anwendung und Verständlichkeit
- Minimaler Erhebungsaufwand auf den Betrieben
- Nutzbarkeit für das Betriebsmanagement
- Hohe Aussagekraft bezüglich Erreichung von Umweltzielen



Forschungsfragen

Die in Indicate beantworteten Forschungsfragen sollen neben der landwirtschaftlichen Praxis und der Verwaltung auch weiteren Akteuren wie Label-Organisationen oder Lebensmittelverarbeitern dienen:

1. Auf Basis welcher Daten (und Methoden) lassen sich Indikatoren für die Bereiche Nährstoffflüsse, Boden und Biodiversität sowie zur Darstellung positiver Ökosystemleistungen auf Betriebsebene entwickeln, und wie können sie für das Betriebsmanagement genutzt werden?
2. Mit welchen digitalen Tools können Indikatoren heute und in Zukunft erhoben und für das Betriebsmanagement nutzbar gemacht werden?
3. Welche Daten aus FMIS können für Umweltindikatoren und das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) erhoben werden?
4. Wie lässt sich die ökonomische und soziale Nachhaltigkeit der Landwirtschaft messen?
5. Welche Arten von Indikatoren gibt es (z. B. massnahmen- oder resultatebasierte Indikatoren), und was kann daraus zum Nutzen für das Betriebsmanagement oder die Verwaltung abgeleitet werden?

Projekte

Indicate umfasste neun Projekte:

1. Nährstoffflüsse abbilden
2. Nährstoffmanagement Hofdünger
3. Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen
4. Indikatoren Bodenzustand und der Bodenbewirtschaftung
5. Indikatoren Biodiversität

6. Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland
7. Indikatoren für die ganzheitliche (ökologische, ökonomische, soziale) Nachhaltigkeitsbewertung
8. Farm-Management-Informationssysteme
9. Indikatoren für das Agrarumweltmonitoring

2 Haupterkenntnisse aus den Projekten

2.1 Nährstoffflüsse abbilden

Autoren: Frank Liebisch, Simon Baumgartner

2.1.1 Einleitung

Aktuell wird die Suisse-Bilanz als Vollzugsinstrument für die Dokumentation des Nährstoffhaushaltes landwirtschaftlicher Betriebe und als Indikator für den ökologischen Leistungsnachweis verwendet. Die ausgeglichene Düngerbilanz stellt sicher, dass die Kulturen eines Betriebs nur so viele Nährstoffe erhalten, wie sie aufnehmen können. Nachteilig ist, dass die Nährstoffflüsse oft nur geschätzt und nicht quantitativ überprüft werden, und die Düngung nicht parzellengenau und standortspezifisch zugrunde gelegt werden muss (Bosshard *et al.*, 2012), obwohl dies als gute landwirtschaftliche Praxis und als Grundlage in verschiedenen Rechtsgrundlagen ausgewiesen ist (siehe GRUD-Kapitel 7, www.grud.ch; Agridea & BLW, 2023). Als Grundlage für die Suisse-Bilanz dienen so zum Beispiel Mittelwerte für den Düngebedarf (Düngenorm) von Kulturen eines Betriebes, ohne dabei unter anderem die unterschiedliche Nährstoffversorgung zwischen verschiedenen Parzellen zu berücksichtigen. Das entspricht heutzutage nicht mehr der guten landwirtschaftlichen Praxis. Ausserdem zeigen die betrieblichen Suisse-Bilanzen mehrheitlich ausgeglichene Salden, was in starkem Kontrast zu nationalen Berechnungen steht, welche grosse Überschüsse an Nährstoffen darlegt (Spiess & Liebisch, 2020, 2022, 2023; BFS, 2023). Dies deutet darauf hin, dass die Suisse-Bilanz in ihrer jetzigen Form nicht geeignet ist, um Stickstoff(N)- und Phosphor(P)-Überschüsse in der Landwirtschaft und deren Umwelteinflüsse ausreichend abzubilden. Für ein nachhaltiges und effizientes betriebliches Nährstoffmanagement und den Nachweis dessen im Vollzug ist dies jedoch notwendig.

Ein zeitgemässes Nährstoffmanagement ist standortangepasst und erlaubt die Nutzung der Informationen im Acker- und Futterbau sowie der Tierhaltung über die Systemgrenzen hinweg. Verschiedenste Parameter wie parzellenspezifische Düngeplanung, Ertragspotenzial des Standortes und des Produktionssystems, Futtermittelimporte, Düngieranfall und -zukauf, Fragen des Gewässerschutzes wie auch Vollzugsbedingungen gilt es zu integrieren und können idealerweise in ein nationales Monitoring oder Reporting einfließen. Ziel ist es, ein System zu etablieren, welches den Nährstoffentzug aus dem Boden durch Acker- und Futterbaukulturen in Einklang mit den Nährstoffquellen aus der Tierhaltung, der Düngung und allenfalls der Umwelt (Deposition und Stickstoff-Fixierung) bringt. Negative Umwelteinflüsse durch Überschüsse müssen vermieden und die Bodenfruchtbarkeit erhalten werden. Hierzu können robuste und verfügbare Indikatoren auf den Ebenen Feld und Betrieb sowie allenfalls überbetrieblichen (regionalen bis nationalen) Ebenen Verwendung finden.

In den Grundlagen der Düngung (GRUD) (Sinaj *et al.*, 2017) sind Methoden für die standort- und parzellenspezifische Düngung für Acker- und Futterbau beschrieben und als Nachschlagewerk verfügbar. Die GRUD stehen hier nachfolgend für die Möglichkeit der parzellenspezifischen Düngeplanung und Düngung nach der Methode der korrigierten Norm und der N_{min} -Methode für Stickstoff und andere Nährstoffe. Die Dokumentation der Düngung auf den Parzellen (Dünge- bzw. Feldbuch) ist die Schnittstelle zur Suisse-Bilanz oder Betriebsbilanzierung. Diese erlaubt die Optimierung der Düngung unter Berücksichtigung verschiedener Agrar- und Umweltindikatoren (Bewirtschaftung, Ertragspotenzial, Humus, Bodentextur u. a.) und der zur Verfügung stehenden Nährstoffquellen (z. B. Hof- und Recyclingdünger).

Aktuell stellen Nährstoffüberschüsse die Gesellschaft und die Landwirtschaft vor grosse Herausforderungen. Im Rahmen der Agrarpolitik sollen der Stickstoffverlust, bewertet durch den Stickstoffüberschuss bis 2030 um 15 % im Vergleich zum durchschnittlichen Überschuss der Jahre 2014 bis 2016 reduziert werden. Es sollte ein Grundprinzip der Landwirtschaft sein, den Nährstoffhaushalt ausgeglichen und die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu erhalten.

Mittels der neuen digitalen Möglichkeiten der FMIS, der sensorbasierten und ortsspezifischen Datenerfassung sowie der Modellierung des standortangepassten bzw. parzellengenauen Nährstoffbedarfs, sind in diesem Bereich grosse Fortschritte bereits heute möglich und können in Zukunft ausgebaut werden. Sie erlauben es, das gesamte Betriebsmanagement nachhaltiger und effizienter zu gestalten sowie die Erfüllung der Vollzugsanforderungen und das Monitoring zu erleichtern.

Ziel des Projekts ist es, die präzise, ortsspezifische und umweltgerechte Düngung mittels digitaler Technologien durch eine parzellengenaue Planung, Ausführung und Bilanzierung zu realisieren. Die Nährstoffbilanzierung wird in den Bezugssystemen Parzelle und Betrieb sowie den Anwendungsformen der Suisse-Bilanz und Oberflächenbilanz als Indikator überprüft. Verwendungsrichtlinien und Verbesserungsvorschläge werden erarbeitet, um diese für die Düngeplanung, Betriebsbewertung sowie regionale und nationale Fragestellungen besser nutzen zu können. Dafür werden Düngepläne, Nährstoffbilanzen und verschiedene Boden- und Nährstoffindikatoren (Düngebedarf nach GRUD, N_{min} , Sensorik, Bodenanalyse) für die Verwendung im Feld und Betriebskontext getestet. Diese könnten die Ausgangsbasis bilden, um Nährstoffflüsse von Feld und Betrieb über die Region bis hin zur nationalen Bilanzierung zu aggregieren.

Die Anwendung und Erprobung aktueller Methoden und Tools innerhalb von Betrieben und Betriebsnetzen soll es ermöglichen, wichtige Erfahrungen für ein innovatives und praxisnahes Nährstoffmanagement zu sammeln. Dementsprechend sollen die hohen Anforderungen der landwirtschaftlichen Praxis und Gesellschaft in Bezug auf Produktion, Produktqualität, Markt und Umwelt erfüllt werden.

Dabei sollen die gesamtbetrieblichen Nährstoffflüsse bzw. Kreisläufe abgebildet werden. Das heisst, acker- und futterbaulich genutzte Parzellen sowie eingesetzte Hofdünger werden untersucht, parzellenscharf bilanziert und schliesslich zu einer Gesamtbilanz aller bewirtschafteten Flächen eines Betriebes aggregiert. Dies ermöglicht neben der Optimierung der bestehenden Werkzeuge (GRUD, Suisse-Bilanz) auch das Aufdecken von Verbesserungspotenzialen und Anwendungsmöglichkeiten neuer Technologien.

2.1.2 Methoden

Das Projekt war in drei Arbeitspakete unterteilt, die aufeinander aufbauen und der Logik der Datenerhebung von Parzelle zum Betrieb und der Bewertung im überbetrieblichen Kontext folgen. Im Projekt wurden Daten und Ergebnisse aus externen Projekten und Betriebsnetzen und im parzellenspezifischen Düngungskontext zusammengestellt und ausgewertet.

Verfügbarkeit und Integration von Agrarsoftware und FMIS im Kontext Nährstoffmanagement, Umweltmonitoring und Vollzug

In Zusammenarbeit mit dem Indicate-Projekt «Farm-Management-Informationssysteme» wurde eine Übersicht der aktuellen Funktionalitäten der wichtigsten FMIS auf dem Schweizer und internationalen Markt erstellt. Anhand eines Anforderungskataloges wurden relevante Daten, Parameter und abgeleitete Indikatoren definiert und so die Anwendbarkeit bestehender und potenzieller Indikatoren überprüft.

Die Anforderungen und Standards für das heutige und zukünftige Nährstoffmanagement sowie die Erfassungsmöglichkeiten der Indikatoren wurden auf den Ebenen Parzelle, Hof und Umwelt geprüft und diskutiert. In diesem Rahmen konnten Konzepte für die zukünftige Nutzung von FMIS und Schnittstellen zu Bundesbehörden entwickelt werden, um verschiedene Anforderungen der Praxis, des Vollzugs und des Umweltmonitorings zu erfüllen.

Überprüfung standortangepasster Düngebedarfsermittlung als Standard der guten landwirtschaftlichen Praxis

Hierfür wurden die parzellenspezifische Düngeplanung und betriebliche Dokumentation angewendet, die auch als Basis für eine weitgehend automatisierte Erhebung von düngungsbezogenen Nährstoffflüssen genutzt werden können. Dementsprechend wurden die Nährstoffflüsse (Importe – Exporte) parzellengenau erhoben. Dazu gehören unter anderem Erträge und deren Nährstoffentzüge, Düngeapplikationen sowie die Gehalte der verwendeten Hofdünger und gegebenenfalls auch Bodenproben. Die Integrations- oder Kombinierbarkeit von FMIS und indikatorbasierten Düngetools wurde beispielhaft getestet und umgesetzt. Dabei wurde die parzellenscharfe Düngung für Schläge und Betriebe, teilweise auch rückwirkend, dokumentiert und ausgewertet. Für eine effiziente Datenerhebung und -nutzung wurden einige dieser Parameter zusammen mit den Indicate-Projekten «Nährstoffmanagement

Hofdünger», «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» erhoben. Eine Übersicht der Nährstoffflüsse auf Parzellen- und Betriebsebene wurde jährlich ausgewertet und im Laufe des Projekts um die zeitliche Komponente ergänzt. Düngetools wurden auch auf dem Pilotbetrieb der Versuchsstation «Smarte Technologien» eingesetzt. Die Erfahrungen bezüglich der Integration in ein FMIS wurden dem Projekt «Farm-Management-Informationssysteme» zur Verfügung gestellt.

Bewertung der nachhaltigen Nährstoffnutzung im Nährstoffvollzug

Das Potenzial des indikatorbasierten Nährstoffmanagements zur Reduktion von Überschüssen und Verlusten wurde mithilfe des Feldmanagements dokumentiert und auf Betriebsübergreifender Ebene ausgewertet. Dazu wurden die Oberflächenbilanz und die Suisse-Bilanz als Indikatoren für Überschüsse auf Betriebsebene mit einem Datensatz aus der Zentralen Auswertung – Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI, > 290 Betriebe) verglichen. Beide Ansätze werden in der Schweiz verwendet und können mithilfe der Angaben für die Suisse-Bilanz berechnet werden. Die Oberflächenbilanz ist heute oft Teil von Nachhaltigkeitsbewertungen und Zertifikaten (z. B. DLG-Nachhaltigkeitszertifikat, DLG, 2024), jedoch derzeit nicht Bestandteil der im Vollzug verwendeten Ergebnisse der Suisse-Bilanz.

2.1.3 Ergebnisse

Verfügbarkeit und Integration von Agrarsoftware und FMIS im Kontext Nährstoffmanagement, Umweltmonitoring und Vollzug

In verschiedenen Projekten wurden Softwarelösungen für verschiedene Zielgruppen zusammengetragen und deren Funktionalität untersucht (Ringger *et al.*, 2020; Meyer & Liebisch, 2024). Es ist festzustellen, dass in der Schweiz sowohl die Verfügbarkeit als auch die Funktionalität von Düngungsplanungssoftware und FMIS niedriger sind als im europäischen Raum. Eine digitale Umsetzung eines Düngeplaners gemäss GRUD existiert heute nur in nicht offiziell verifizierter Form. Das heisst die Empfehlungen der GRUD werden nicht ganzheitlich angewendet, oder die Integration wurde nicht gemeinsam mit Fachexpertinnen und Fachexperten umgesetzt bzw. validiert. Dabei könnte die Anwendung und Berücksichtigung der Methoden der standort- und parzellenangepassten Düngebedarfsbemessung (korrigierte Norm und N_{min}) die Nährstoffeffizienz auf Betriebsebene stark erhöhen und sollte deshalb als zukünftiges Projekt mit dem Ziel einer digitalen Umsetzung der GRUD in Betracht gezogen werden. Dieses Bedürfnis wurde von vielen Landwirten und Beratern formuliert und zeigt sich auch durch die grosse Verfügbarkeit solcher Instrumente im Ausland. Digitale Anwendungs- und Vernetzungsmöglichkeiten der Düngeplanung liegen vor allem in den Funktionsbereichen Dokumentation, Planung, Vollzug, Umweltmonitoring, Effizienzbewertung sowie im Nachweis von Marktregularien und Labelanforderungen. Dementsprechend vielfältig sind auch die potenziellen Nutzergruppen. Weitere Informationen und Übersichten über verfügbare Tools wurden auch durch die Europäische Innovationspartnerschaft EIP-AGRI Focus Group «Digital tools for sustainable nutrient management» (EIP-AGRI Focus Group, 2022) und das Projekt Super-G – Developing SUsustainable PERmanent Grassland systems and policies (Sagoo *et al.*, 2020) erarbeitet.

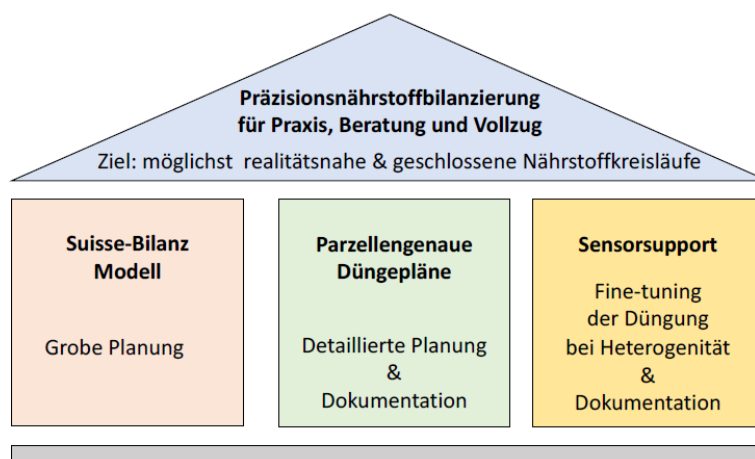


Abb. 2: Die Präzisionsnährstoffbilanzierung könnte auf dem Zusammenspiel mehrerer, sich ergänzender Tools basieren. Ein mögliches Szenario illustriert am Beispiel der Suisse-Bilanz (aus dem Bericht von Ringger *et al.*, 2020).

Überprüfung standortangepasster Düngebedarfsermittlung als Standard der guten landwirtschaftlichen Praxis

In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass die standortangepassten Düngebedarfs-Bemessungen ($N_{\min}$ und korrigierte Norm als Beispiele für N), geeignet sind, Stickstoff und Phosphor effizient zu düngen und somit im Vergleich zu nicht angepasster Düngung Überschüsse zu reduzieren (z. B. Grossrieder *et al.*, 2022; Tanner *et al.*, 2024). Im Vergleich zum europäischen Ausland sind die Methoden der GRUD adäquat und auf vergleichbarem Niveau (Jordan- Meile *et al.*, 2023; Higgins *et al.*, 2023). Nichtsdestotrotz lassen sich Verbesserungspotenziale ableiten, zum Beispiel die Kombinierbarkeit der Methoden, die auf Schätz- und Bodenproben basieren. Ausserdem stellt die fehlende Verbindlichkeit der Düngeplanung und der Düngebedarfsermittlung nach Standards der guten landwirtschaftlichen Praxis, da sie im Rahmen der Suisse-Bilanz nur empfohlen werden, einen Widerspruch zu den Ansprüchen eines ökologischen Leistungsnachweises dar. Als Folge dessen werden etablierte Standards der guten Düngepraxis nicht eingefordert. Auch konnte das Potenzial von Sensoren oder Methoden des Precision Farmings, bessere Düngungsentscheidungen und -praktiken umzusetzen, an Beispielen bestätigt werden (Lorenz *et al.*, 2023; Argento *et al.*, 2022) und könnte somit in Zukunft berücksichtigt werden.

Integration der guten Düngepraxis und Nachhaltigkeitsbewertung in den Nährstoffvollzug

Um das nachhaltige Nährstoffmanagement über die Ebenen Parzelle, Betrieb und auf übergeordneter Ebene robust darzustellen und zu bewerten ist die Nutzbarkeit der jeweiligen Daten und Informationen entscheidend. Die gute Düngepraxis und Aspekte des Nährstoffmanagements sind in Verordnungen (z. B. DZV, GschV etc.) übergeordnet geregelt und werden durch die GRUD (Sinaj *et al.*, 2017) als Nachschlagewerk und Vollzugshilfe auf parzellenebene unterstützt. Die Anwendung der empfohlenen Düngung ist allerdings in der Suisse-Bilanz auf Betriebsebene nicht konkret vorgeschrieben (Agridea & BLW, 2023) und wird selten überprüft. Eine konkretere Berücksichtigung wäre jedoch mit wenigen Anpassungen in der Berechnung der Suisse-Bilanz möglich, ohne dass sich inhaltlich etwas für die Landwirtinnen und Landwirte ändert (Ausnahme: Der Düngeplan muss erstellt werden, wenn dies bisher nicht der Fall war). Die Verwendbarkeit und das Potenzial der Düngeplanung wurden im vorherigen Arbeitspaket untersucht und bewertet.

Die Verwendung der Suisse-Bilanzergebnisse als Agrarumweltindikator wurde anhand von Betrieben aus dem Agrarumweltmonitoring (Gilgen *et al.*, 2023a) überprüft. Dafür wurden die wichtigsten Inputs und Outputs auf Betriebsebene berechnet und sowohl in Form der Oberflächenbilanz als auch der Suisse-Bilanz bilanziert. Im Vergleich zur Oberflächenbilanz, einem international anerkannten Instrument zur Nährstoffbilanzierung von Landwirtschaftsbetrieben (Löw *et al.*, 2021; Klages *et al.*, 2020), ist die Suisse-Bilanz für Umweltauswirkungen durch Stickstoff nicht robust bzw. vollumfänglich aussagekräftig (Abb. 3, links). Dies liegt grösstenteils an der Struktur der Berechnung der Suisse-Bilanz und den verwendeten Verlustabzügen zur Berechnung der N-Verfügbarkeit im Anrechnungs- bzw. Bilanzierungsjahr. Dies zeigt sich durch die starke Beziehung zwischen der Oberflächenbilanz und der Summe aus dem Suisse-Bilanzsaldo und den abgezogenen Verlusten (Abb. 3, rechts). Für eine realitätsnahe Berechnung der Suisse-Bilanz sollte diese aktualisiert werden. Dies umfasst insbesondere die Aktualisierung von Korrekturfaktoren und die Verwendung eines Stoffflussmodells, das die Abbildung von realen Nährstoffflüssen und Verlustreduktionsmassnahmen auf Betriebsebene erlaubt. Ein in der Schweiz validiertes und erprobtes Modell ist Agrammon (agrammon.ch). Eine unmittelbar umsetzbare und weitgehend kostenfreie Ergänzung wäre die parallele Berechnung der Oberflächenbilanz aus den Daten für die Suisse-Bilanz. Hierfür braucht es keine Umstellung des Modells und keine zusätzlichen Dateneingaben.

Für Phosphor ist die Beziehung zwischen Oberflächenbilanz und Suisse-Bilanz gut, so dass die Nutzbarkeit als Indikator im Kontext eines ökologischen Leistungsnachweises gegeben ist. Die Frage ist jedoch, wie zukünftig Bodenanalysen, wie sie im Rahmen des ÖLN gefordert sind, und die das tatsächliche Umweltisiko aufgrund der Eigenschaften des Phosphors besser darstellen, in den Bilanzierungsansatz integriert werden können. Ein Beispiel für die Verknüpfung von Bilanz und Boden-P-Statusinformationen liefert der [DLG-Standard «Nachhaltige Landwirtschaft»](#) (DLG, 2024) der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft (DLG).

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist der Umgang mit der Grössenordnung des Bilanzsaldos als Nährstoffindikator. Einerseits ist ersichtlich, dass eine prozentuale Darstellung des Bilanzsaldos, wie sie derzeit in der Suisse-Bilanz erfolgt, nicht den Standards für einen verlässlichen Indikator für die Betriebsplanung, den landwirtschaftlichen Vollzug oder das Umweltmonitoring entspricht. Hierfür sind quantitative Mengenangaben mit Flächenbezug erforderlich.

Angaben in kg N/ha düngbare Fläche würden diesem Kriterium zum Beispiel entsprechen. Andererseits müssen die Interpretation des quantitativen Saldos und die daraus resultierenden Empfehlungen geklärt werden. Da die Stickstoffnutzung einem offenen Kreislauf entspricht und die Effizienz der verwendeten Nährstoffe kaum 100 % betragen kann, ist klar, dass die anzustrebenden Werte des Bilanzsaldos über 0 liegen.

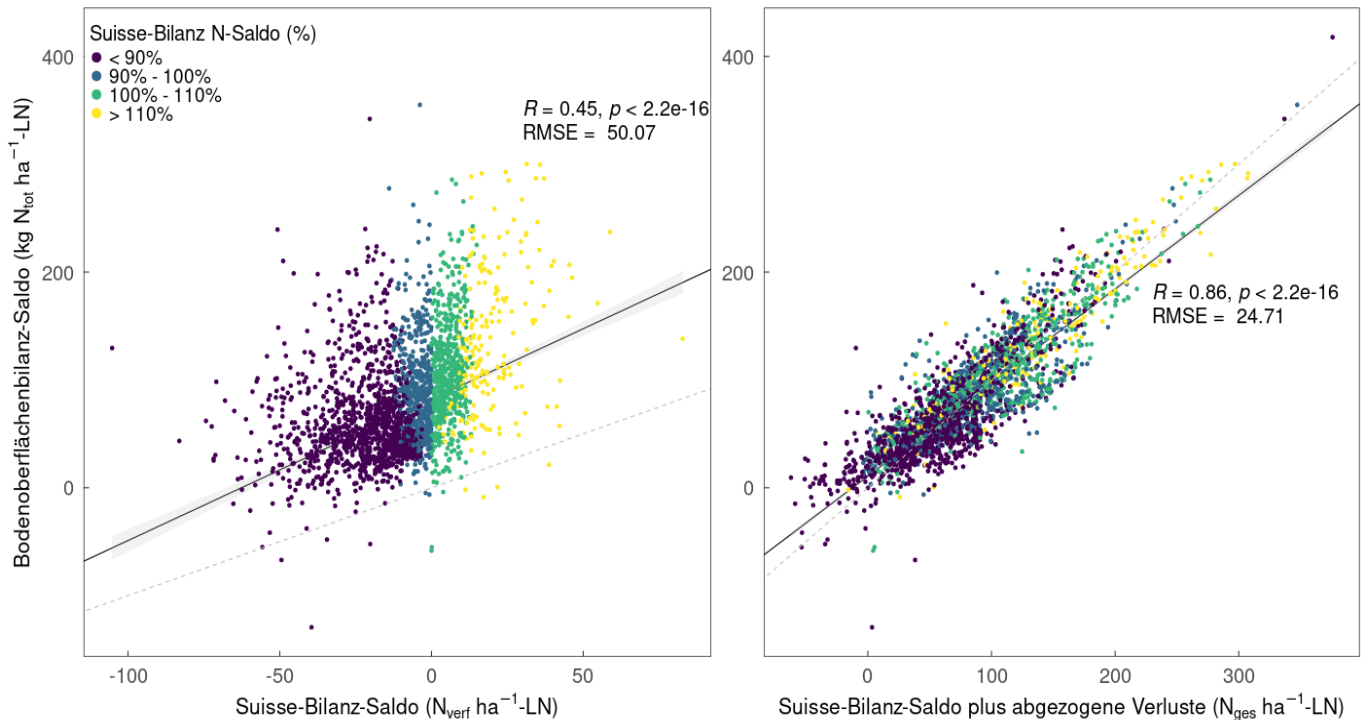


Abb. 3: Die Präzisionsnährstoffbilanzierung könnte auf dem Zusammenspiel mehrerer, sich ergänzender Tools basieren. Ein mögliches Szenario illustriert am Beispiel der Suisse-Bilanz (aus dem Bericht von Ringger et al., 2020).

So findet man im Nachhaltigkeitszertifikat der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft einen Zielwert für den Stickstoff- und Phosphor-Bilanzsaldo in Form der Stickstoffnutzungseffizienz (Output / Input) für eine nachhaltige Nutzung der Stickstoffressourcen ([DLG-Standard «Nachhaltige Landwirtschaft»](#)). Zielwerte liegen im Stickstoff-Effizienzbereich zwischen 70 und 90 %. Im Vergleich zum vormaligen Überschussziel von 50 kg/ha wird die Effizienz heute als besserer Indikator betrachtet als der Überschuss, wird aber häufig noch als quantitative Vergleichsgrösse für die Verluste genutzt. Ein Vorteil der Effizienzbetrachtung ist der Einbezug der Bodenfruchtbarkeit. So weisen Effizienzen von > 100 % auf Boden-Stickstoff zehrende Situationen hin, die langfristig zu Ertragseinbußen führen können und damit vermieden werden sollten.

Im Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten wurde ein Überschusszielwert von < 30 kg/ha für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers geschätzt ([Nitratprojekt Niederbipp-Gäu-Olten](#)). Diese Größenordnungen erscheinen im Vergleich plausibel. Für die breite Anwendung lässt sich der Überschussgrenzwert von 50 kg/ha dennoch empfehlen. Besser ist jedoch der Einbezug der Nutzungseffizienz. Wenn regionale Bedürfnisse und Sachzwänge ein niedrigeres Überschussniveau verlangen, könnte dies regional oder kantonal präzisiert werden. Schwieriger erscheint die Interpretation nach oben. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass auch sehr hohe Salden (z. B. > 100 kg N/ha) vorkommen. Hier müssen zukünftige Analysen und Projekte klären, ob klare Abhängigkeiten mit bestimmten Produktions- und Umwelteigenschaften vorliegen, und Empfehlungen zur Verbesserung erarbeitet werden. Denkbar sind eine erhöhte Verbindlichkeit und Kontrolle im Zusammenhang mit erhöhten Salden sowie der zugrunde liegenden Faktoren. Beispiele dafür sind der Dünge- und Fütterungsplan sowie die quantitative Bilanzierung von Nährstoffflüssen, die für Betriebe mit hohen Tierzahlen pro Fläche eingefordert werden. In einigen Ländern der EU ist der Düngeplan für Betriebe mit mehr als 2 GVE/ha bereits heute vorgeschrieben. Im Umkehrschluss könnte man zum Beispiel bei Einhaltung der Nachhaltigkeitsgrenzwerte auf vertiefte Überprüfungen und bestimmte Planungsgrundlagen verzichten, um den Administrationsaufwand für Betriebe so gering wie möglich zu halten.

2.1.4 Fazit

Mit den Methoden der Düngebedarfsbestimmung nach korrigierter Norm und $N_{\min}$ verfügt die Schweiz über aktuelle parzellenspezifische Verfahren, die dem neuesten Wissensstand grundsätzlich entsprechen. An der Verbesserung der Düngebedarfsbemessung und der Entwicklung von Unterstützungsinstrumenten wird in verschiedenen Projekten gearbeitet. Derzeit gibt es in der Schweiz noch kein benutzerfreundliches Tool, das die Düngeplanung für Landwirtinnen und Landwirte oder die Integration in ein Farm Management Informationssystem (FMIS) nach GRUD komplett und kostenfrei umsetzt. Der Einsatz von Agrarsoftware oder FMIS würde es grundsätzlich ermöglichen, die parzellen- und standortspezifische Düngungsplanung, die Ausführung der Düngung (Feldbuch) und die Bilanzierung nach der Ernte halbautomatisch zu unterstützen und auf Betriebsebene zu aggregieren. Voraussetzung ist, dass die Landwirtinnen und Landwirte die Planungsgrundlagen erstellen und ein entsprechendes Feldbuch führen. Dies kann bereits heute teilweise automatisiert erfolgen. Verschiedene nationale oder internationale Instrumente (Meyer & Liebisch, 2024) zeigen, dass neben der landwirtschaftlichen Planung und Bilanzierung die halbautomatische Anbindung an eine überbetriebliche Datennutzung, z. B. für den Vollzug oder das nationale Umweltmonitoring, und damit eine effizientere Administration heute bereits möglich und oft schon Realität sind. Fernerkundungsindikatoren und Ertragskarten bieten neue Möglichkeiten der ortsspezifischen Düngung und können in Zukunft ebenso einbezogen werden. Die Integration von Methoden der sensorbasierten, automatischen und ortsspezifischen Erfassung von Düngeparametern in die GRUD sollte ebenfalls erfolgen, um Empfehlungen mit modernen Instrumenten zu unterstützen.

Die Verbesserung der Nährstoffbilanzierung und damit der Indikatoren für Stickstoff- und Phosphor-Verluste auf den Ebenen Betrieb, Methodik und Anwendung hat sich als notwendig erwiesen und konnte in dieser Arbeit an realen Daten aufgezeigt werden. Es gilt, den Stoffflusshintergrund besser zu verstehen und die Nutzung verschiedener Massnahmen zur Reduzierung von Stickstoff- und Phosphor-Verlusten quantitativ abzubilden. Die Suisse-Bilanz in ihrer heutigen Ausgestaltung als Indikator für Stickstoff-Überschüsse und Umweltwirkung anzuwenden, ist nicht zu empfehlen. Sie müsste um einen Oberflächenbilanzsaldo ergänzt werden. Dadurch kann ohne zusätzlichen Mehraufwand das Konzept der Nachhaltigkeitsbewertung inklusive vorhandener Interpretationsmöglichkeiten über den Überschuss und die Nutzungseffizienz eingeführt werden, wodurch Produktionsinformationen mit der Umweltbewertung ergänzt werden. Es ist grundsätzlich notwendig, die Nährstoffbilanzierung und -bewertung zukünftig quantitativ, also in Menge pro Fläche, darzustellen und in der Nachhaltigkeitsbewertung sowie dem Vollzug zu verwenden. So können Bezugsgrössen und Grenzwerte, Betriebsvergleiche sowie robuste Empfehlungen und Vollzugsentscheidungen abgeleitet werden. Das Projekt zeigt landwirtschaftlichen Praktikern und Beratern, aber auch Personen in Vollzug, in der Politik sowie in Nichtregierungsorganisationen aktuelle Möglichkeiten und Potenziale, um die Bewertung des Nährstoffmanagements zu verbessern.

Die parzellenscharfe Düngebedarfserhebung ermöglicht Betrieben eine robuste Betriebsführung hinsichtlich der effizienten Nutzung von natürlichen Ressourcen und Betriebsmitteln, einschliesslich verschiedener Dünger, Boden- und Bewirtschaftungsmassnahmen. Ausserdem kann dadurch die Dokumentations- und Nachweispflicht, die für verschiedene Labels und im gesetzlichen Rahmen (z. B. für den ökologischen Leistungsnachweis, ÖLN) gefordert wird, nachvollziehbar erfüllt werden. Eine gut integrierte Betriebsbilanzierung erlaubt es darüber hinaus, innerbetriebliche Verbesserungspotenziale zu bewerten und sich nach aussen als nachhaltiger Betrieb zu profilieren.

Die Integration der Oberflächenbilanz ermöglicht die Nutzung der Suisse-Bilanz für die Nachhaltigkeitsbewertung nach dem Vorbild bestehender international anerkannter Bewertungsmassstäbe. Dies erfordert keinen zusätzlichen Aufwand für Betriebe und Vollzugsbehörden. Überschüsse und Verbesserungspotenziale werden klar ausgewiesen. Die Anwendung von quantitativen Zielgrössen ermöglicht zukünftig das Aggregieren von Parzellen- und Betriebsdaten auf die regionale und nationale Ebene, sowie eine bessere Verwendung in räumlichen Vergleichen.

2.2 Nährstoffmanagement Hofdünger

Autorinnen und Autoren: Patrick Schlegel, Sabine Schrade, Nabil Mehaba, Margret Keck, Frigga Dohme-Meier

2.2.1 Einleitung

Eine der vielen Herausforderungen der Schweizer Landwirtschaft ist eine nachhaltige und effiziente Bewirtschaftung von Nährstoffen, insbesondere Stickstoff (N) und Phosphor (P). Die Schweizer Landwirtschaftsbetriebe sind grösstenteils Mischbetriebe mit Tierhaltung und Pflanzenproduktion, bei denen Hofdünger mengenmässig die wichtigste Düngerquelle ist. Nur mit genauer Kenntnis der ausgebrachten Nährstoffmengen können Hofdünger gezielt im Pflanzenbau eingesetzt werden. Politisch relevant ist dies spätestens seit den 1990er Jahren mit der Inkraftsetzung der betrieblichen Nährstoffbilanzierung (Vollzugsinstrument Suisse-Bilanz) und hat 2022 mit der Nationalen Nährstoffbilanzierung (Parlamentarische Initiative Absenckpfad, Pa. Iv. 19.475) noch einmal an Bedeutung gewonnen.

Zur Düngungsplanung werden aktuell Richtwerte verwendet, die produzierte Hofdünger- und ausgeschiedene Nährstoffmengen pro Tierkategorie und Jahr oder Jahresplatz widerspiegeln und in den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) (Carlen *et al.*, 2017) publiziert sind. Beim Rindvieh sind die Richtwerte fix, mit Ausnahme der ausgeschiedenen Nährstoffmengen von Milchkühen bzw. Aufzuchtrindern, die von der Jahresmilchleistung bzw. vom Abkalbealter abhängen. Zudem basieren die Richtwerte für ausgeschiedene Nährstoffe von Milchkühen, Aufzuchtrindern und Aufzuchtälbern auf Berechnungsmodellen, in denen von einer bedarfsgerechten Fütterung (Agroscope, 2021) ausgegangen wird, was in der Praxis nicht immer der Fall ist.

In den GRUD sind die produzierten Hofdüngermengen als gemittelte Jahreswerte bzw. nach Jahresplatz abgebildet und können bei Milchvieh mit der Jahresmilchleistung linear korrigiert werden. Deren Nährstoffgehalte sind fix. Diese Werte sind in den GRUD für Gülle ohne Verdünnung angegeben. Mit den aktuellen Richtwerten in den GRUD ist somit eine Abschätzung der Hofdüngermengen und Nährstoffgehalte zum jeweiligen Ausbringzeitpunkt nicht möglich. So können beispielsweise die Effekte von Rationsänderungen auf die Hofdüngermengen und -gehalte zu den jeweiligen Ausbringzeitpunkten nicht abgebildet werden. Zudem müsste die Verdünnung der Gülle durch Niederschlag und Prozesswasser berücksichtigt werden. Sind solche betriebspezifischen Informationen bekannt, kann eine effiziente Düngungsplanung sowie eine nachhaltige Bewirtschaftung der Nährstoffe umgesetzt werden.

Die Modellierung der Mengen- und Nährstoffflüsse von der effektiven Fütterung (im Gegensatz zu den Fütterungsempfehlungen) über die Nährstoffretention des Tieres bis zu den Ausscheidungen (Kot und Harn), die Berücksichtigung von Einstreu, Prozess- und Niederschlagswasser bis zu dessen Lagerungsformen (z. B. Gülle, Mist) ist ein Lösungsansatz, um die genannten Herausforderungen anzugehen. Solche Modelle bilden die Verbindung zwischen Tier- und Pflanzenproduktion im Nährstoffkreislauf. Sie können in Planungstools umgesetzt werden und so zur Digitalisierung und Automatisierung beitragen. Ferner wären solche in Planungstools integrierte Modelle bereit für zukünftige Überarbeitungen von Ausscheidungsrichtwerte für den Vollzug und können dazu dienen, Indikatoren zur Nachhaltigkeit einer Milchviehherde zu erstellen. Diese können ebenfalls von der Beratung zur Bewertung der Nährstoffeffizienz einer Milchviehherde verwendet werden und ermöglichen den Vergleich von Betriebsherden.

2.2.2 Methoden

Zur Entwicklung eines Modells, das die Mengen und die Nährstoffgehalte von Hofdünger aus einem Milchviehstall (Milchkühe) für eine bestimmte Zeitperiode abschätzt, wurden folgende Arbeitspakete definiert:

Arbeitspaket 1 «Aktualisierung Futteraufnahme»

Überprüfung und Aktualisierung der Regressionsgleichungen zur Ermittlung der Futteraufnahme (Gesamtverzehr, unterteilt in Grundfutterverzehr und Ergänzungsfutter) einer Milchkuh.

Eine «Stallfütterung»-Datenbank wurde mittels Agroscope-Daten auf Basis Einzeltier und pro Tag erstellt. Die erstellte Datenbank zur Futteraufnahme im Stall beinhaltet 29 280 Verzehrswerte (Tagesbasis) von 273 laktierenden Milchkühen und 413 Teil-Laktationen von der Milchviehherde in Posieux. In ihr waren die Futteraufnahme der Grundfutter und Ergänzungsfutter, deren Nährwerte und Nährstoffgehalte, die Milchleistung und -zusammensetzung und weitere Tierparameter (Laktationstag, Laktationsnummer, Gewicht etc.) erfasst. Die theoretische individuelle

Futteraufnahme wurde für jeden Tag mit den aktuellen Regressionsgleichungen von Agroscope und von weiteren Institutionen (GfE, 2023; INRA, 2018; NRC, 2001; NASEM, 2021; CSIRO, 2007) berechnet, um:

- die effektive Futteraufnahme mit der berechneten Aufnahme zu vergleichen
- die Agroscope-Regressionsgleichungen zu aktualisieren
- eine neue Regressionsgleichung für spezifische Situationen wie Vollweide und Galtphase zu erstellen.

Eine «Validierung»-Datenbank zur Stallfütterung von laktierenden Kühen wurde mittels Daten der ETH Zürich (77 Verzehrswerte, Wochenbasis) und der INRAE (340 Verzehrswerte, Wochenbasis) erstellt.

Eine «Vollweide»-Datenbank wurde mittels Agroscope-Daten erstellt. Die erstellte Datenbank zur Futteraufnahme beinhaltet 408 Werte von der Milchviehherde in Sorens und Posieux.

Eine «Galtfütterung»-Datenbank wurde mittels Agroscope-Daten erstellt. Diese beinhaltet 458 Werte von 75 Galtkühen.

Arbeitspaket 2 «Aktualisierung Ausscheidungsmengen»

Aus Agroscope-Bilanzversuchen und Literatur wurde eine Datenbank erstellt. Diese dient dazu, die Ausscheidungsmengen von Harn und Kot separat zu modellieren.

Arbeitspaket 3 «Tool SIMHofdünger»

Basierend auf den Arbeitspaketen 1 und 2 erfolgt die schrittweise Programmierung der Modelle zur Futter- und Nährstoffaufnahme, der Nährstoffretention und Ausscheidung und der Ausscheidungsmengen von Kot und Harn mittels Excel oder R-Studio (v4.1.2; R-Core-Team, 2023).

Arbeitspaket 4 «Validierung»

Die Parameter Futteraufnahme, Milchmenge, Einstreumassen, Niederschlag-, Tränke- und Prozesswassermenge sowie Güllevolumina wurde von zwei Stallabteilen mit laktierenden Milchkühen im Emissionsversuchsstall (EVS) von Agroscope in Tänikon erhoben. Zusätzlich wurden regelmässig Proben genommen und analysiert. Die daraus resultierende Datenbank dient als Basis für die Validierung des Tools SIMHofdünger.

2.2.3 Hauptergebnisse

Der Vergleich zwischen den Modellen aus der Schweiz (Agroscope, 2021), welche die Regressionsgleichungen aus 1994 beinhalten, sowie Deutschland (GfE, 2023), Frankreich (INRA, 2018), USA (NRC, 2001; NASEM, 2021) und Australien (CSIRO, 2007) zeigte für die Schätzung des täglichen Gesamtverzehr, dass der Schätzfehler für den Gesamtverzehr je nach Modell zwischen 13 und 24 % lag, wobei das Modell von Agroscope den tiefsten Schätzfehler aufzeigte (Tab. 1). Die mittlere Futteraufnahme zwischen den gemessenen und modellierten Werten war nahezu identisch basierend auf der Regressionsgleichungen von Agroscope für Erstlaktierende und Mehrlaktierende, die im Jahr 1994 entwickelt wurden (Mehaba *et al.*, 2022; 2025).

Die neu entwickelte Regressionsgleichung (Abb. 4) für den Gesamtverzehr von laktierenden Milchkühen ergab einen Schätzfehler von < 10 %. Ein Schätzfehler von < 10 % kann als gut, von 10 %–20 % als akzeptabel und > 20 % als unbefriedigend beurteilt werden (Mehaba *et al.*, 2024a; 2024b). Mittels Daten der ETH Zürich und INRAE war der Schätzfehler der neu entwickelte Regressionsgleichung für den Gesamtverzehr ebenfalls < 10 %.

Die neu entwickelte Regressionsgleichung für den Grundfuttermittelverzehr von laktierenden Milchkühen ergab höhere Werte (+ 13 % bis + 16 %, je nach Milchleistung) im Vergleich zur Agroscope-Regressionsgleichung von 1994 (Mehaba *et al.*, 2024b). Mittels Daten der ETH Zürich und INRAE war der Schätzfehler der neu entwickelten Regressionsgleichung für den Grundfuttermittelverzehr unbefriedigend (jeweils 27 % und 28 %).

Tab. 1: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Trockensubstanz(TS)-Verzehr von laktierenden Milchkühen nach verschiedenen Verzehrsmodellen.

Modelle	TS-Verzehr (kg TM/Tag)		RMSE ^a	
	Gemessen	Modelliert	kg TS/Tag	%
<i>Erstlaktierend</i>				
Agroscope, 2021	18.45	18.44	2.50	13.5
NRC, 2001	18.45	20.61	3.78	20.5
CSIRO, 2007	18.45	20.43	4.14	22.5
INRA, 2018	18.45	14.60	4.37	23.7
NASEM, 2021	18.45	20.42	3.19	17.3
GfE, 2023	18.45	16.87	2.87	15.6
<i>Mehrlaktierend</i>				
Agroscope, 2021	22.53	22.56	3.02	13.4
NRC, 2001	22.53	24.56	4.23	18.8
CSIRO, 2007	22.53	20.16	4.65	20.6
INRA, 2018	22.53	19.84	3.23	14.3
NASEM, 2021	22.53	23.40	3.17	14.1
GfE, 2023	22.53	18.90	4.98	22.1

^aRMSE : root of mean square prediction error in kg TS/Tag; Anzahl Werte: 10 912 und 18 368 für Erst- und Mehrlaktierende Kühe.

Die neu entwickelte Regressionsgleichung für den Gesamtverzehr von Galkühen ergibt rund 25 % höhere Werte als jene von Agroscope von 1994. Die neu entwickelte Regressionsgleichung für den Grundfutterverzehr von laktierenden Milchkühen bei Vollweide ergibt 18 % tiefere Werte (bei gleicher Milchleistung) als bei einer 100 %igen Stallfütterung.

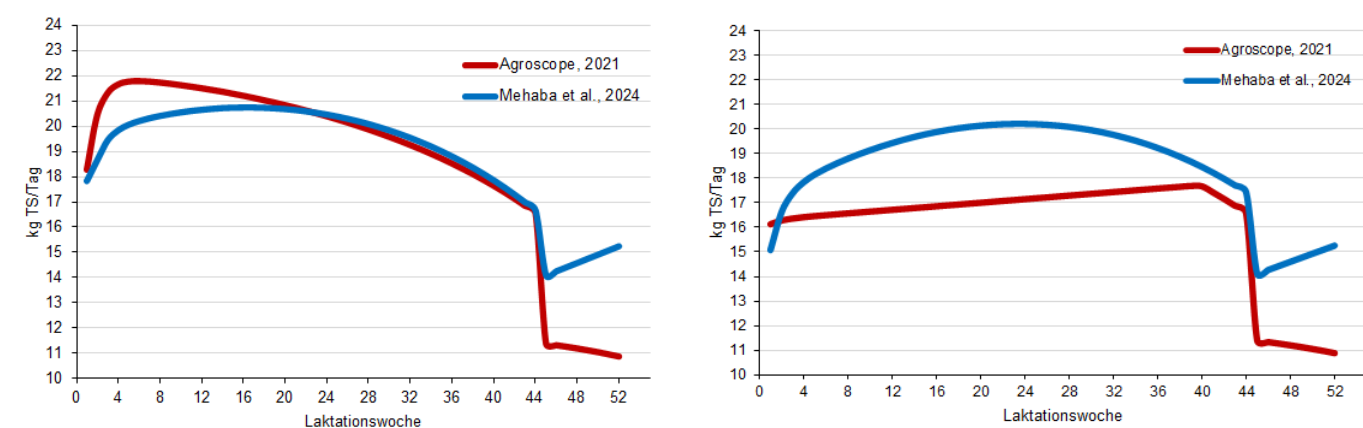


Abb. 4: Gesamtverzehr (links) und Grundfutterverzehr (rechts) einer mehrlaktierenden Kuh (8500 kg Jahresmilchleistung) über Laktation und Galtphase. Jeweils nach der bisher genutzten (Agroscope, 2021) und der neu entwickelten Regressionsgleichung (Mehaba et al., 2024)

Die Erarbeitung der Regressionsgleichungen zur Nährstoffretention für den Körperzuwachs (Kühe in 1. Laktation), für das jährlich geborene Kalb, für die produzierte Milch und die Regressionsgleichungen für die produzierten Mengen an Harn und Kot separat («Aktualisierung Ausscheidungsmengen») sind noch in Erarbeitung.

Die Datenbank für die Validierung des Tools SIMHofdünger stammt aus zwei Erhebungsperioden (April 2022 – November 2022; April 2023 – November 2023) im Emissionsversuchsstall, wobei die Parameter von jeweils zwei Stallabteilen getrennt erfasst wurden. Mit Fokus auf die Gülleverdünnung wurde eine dritte Erhebungsperiode (April 2024 – September 2024) angefügt. Der Trockensubstanzgehalt der Gülle variierte im zeitlichen Verlauf um den Faktor zwei. Diese grosse Variation ist einerseits durch den Eintrag an Prozesswasser und die Niederschlagsmengen von den unbedachten Stallflächen bedingt, andererseits auf einen zeitweise unterschiedlichen Weidezeitanteil der beiden Stallabteile zurückzuführen (Abb. 5).

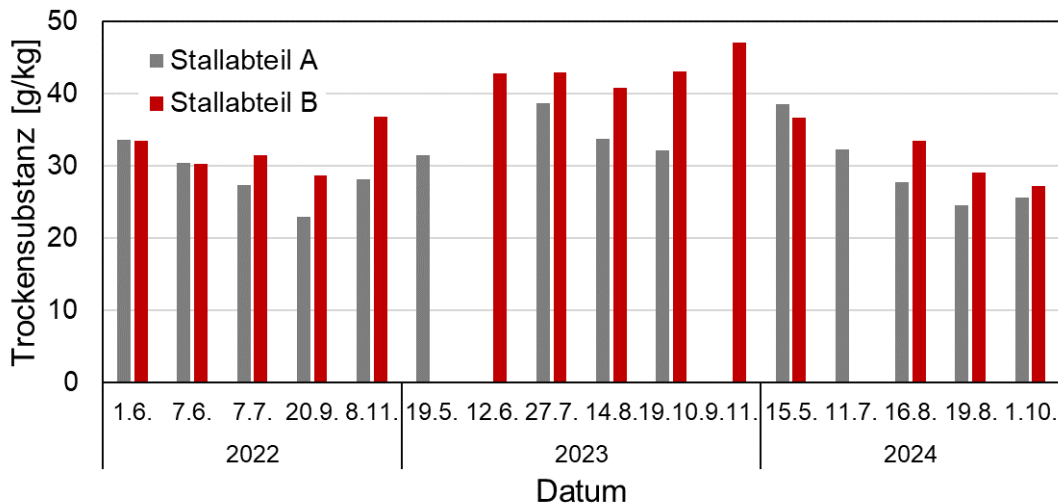


Abb. 5: Trockensubstanzgehalte (g/kg) der Gülleanalysen zu den einzelnen Ausbringzeitpunkten von den beiden Stallabteilen A und B des Emissionsversuchsstalls, entnommen aus den getrennten Güllelagern nach Homogenisieren, im Verlauf der drei Erhebungszeiträume.

2.2.4 Fazit

Die erarbeiteten Grundlagen für «Nährstoffmanagement Hofdünger» zeigen auf, dass die aktuell verfügbaren Regressionsgleichungen von 1994 (Agroscope, 2021) zur Schätzung des Gesamtverzehr (Grundfutterverzehr + Ergänzungsfutterverzehr) von laktierenden Milchkühen nach wie vor sehr solide sind und den Gesamtverzehr besser abbilden als jene von anderen Institutionen. Der Grundfutterverzehr wird mit der Regressionsgleichung von 1994 (Agroscope, 2021) jedoch klar unterschätzt. Die verfütterte Menge an Ergänzungsfutter war damals für ein definiertes Laktationsstadium und eine definierte Milchleistung höher als heute. Eine Erklärung könnte sein, dass sich seit den 1980er Jahren die Qualität des konservierten Wiesenfutters verbesserte und somit die nötige Ergänzungsfütterung vermindert wurde, was zu einer entsprechenden Erhöhung der Grundfuturaufnahme führte. Die Qualität der Schätzung des Grundfutterverzehr hängt stark von der Ergänzungsfütterung ab, wie mit der Validierung mittels ETHZ- und INRAE-Daten ersichtlich wurde. Die neu entwickelten Regressionsgleichungen deuten darauf hin, dass bei der Fütterungsplanung das bisherige Vorgehen der Ermittlung des Grundfutterverzehr und deren Nährstoffaufnahme in einem ersten Schritt und in einem zweiten Schritt die Berechnung der fehlenden Nährstoffe gemessen am Bedarf, welche über Ergänzungsfutter verabreicht werden, nicht optimal ist. Diese Vorgehensweise hat allerdings den Vorteil, dass sich die Ration einfach manuell berechnen lässt. Ein Paradigmenwechsel, indem die Nährstoffkonzentration der Gesamtration die Ausgangslage bildet, die dann auf den maximalen Anteil an Grundfutter in der Ration optimiert wird, könnte die aktuellen Schwächen beheben. In diesem Fall wäre der Grundfutterverzehr nicht mehr eine Planungsgrösse, sondern ein Resultat der jeweiligen Herde.

Der Grundfutterverzehr ist eine wesentliche Grösse im Vollzugsinstrument Suisse-Bilanz, um den betrieblichen Ertrag der Grundfutterproduktion zu definieren. Eine Aktualisierung der GRUD-Normen hinsichtlich Grundfuturaufnahme und Nährstoffausscheidung ist somit nötig, indem die effektiv verfütterte Menge an Ergänzungsfutter ein Einflussfaktor sein sollte (Grundfutterverzehr = Gesamtverzehr – Ergänzungsfutterverzehr).

Im Laufe des Projektes kristallisierte sich heraus, dass die Entwicklung einer Anwendung zu SIMHofdünger unbedingt gemäss dem Prinzip «once only» (jeder Datensatz wird nur einmal erfasst und steht dann für alle weiteren Nutzungen zur Verfügung) in ein vorhandenes System integriert werden muss, sodass es einfach umsetzbar ist und dann auch Einzug in die Praxis findet. Weiter muss eine solche Software auch über die Entwicklung hinaus betreut werden. Deshalb wurde die Entwicklung eines Agroscope-eigenen Software-Tools zugunsten von anderer Projektarbeiten zurückgestellt. Um die erarbeiteten Grundlagen für die landwirtschaftliche Praxis und Beratung breit verfügbar zu machen, könnte in einem Folgeprojekt eine Software entwickelt werden, die mit existierenden Softwares zur betrieblichen Fütterungs- und Düngungsplanung direkt verknüpft ist und darauf basierend die produzierten Hofdüngermengen und daraus resultierenden Nährstoffmengen automatisch mit Betriebsdaten berechnet. Diese Verknüpfung mittels Digitalisierung würde einen wesentlichen Beitrag zur betrieblich optimierten Düngungsplanung leisten und einen umweltschonenden Umgang hinsichtlich der Nutzung von Stickstoff und Phosphor im landwirtschaftlichen Nährstoffkreislauf erlauben. Das Modell SIMHofdünger könnte weiterentwickelt werden, um zusätzliche Merkmale zu integrieren, wie beispielsweise die Harn-Stickstoff-Produktion bzw. den Milchwahnharnstoffgehalt mit Blick auf das Ammoniakbildungspotenzial («begin of pipe» z. B. für Agrammon) sowie die Bruttoenergieaufnahme im Hinblick auf das Methanbildungspotenzial (Treibhausgasinventar). Weiter könnte mit Hilfe der Menge der Kupfer- und Zink- Ausscheidungen deren Bodenakkumulation (Gubler *et al.*, 2015; Gross *et al.*, 2022) abgeschätzt werden. Diese könnten als zusätzliche Umweltindikatoren verwendet werden.

2.3 Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen

Autorinnen und Autoren: Konrad Metzger, Frank Liebisch, Juan M Herrera, Thomas Guillaume, Florian Walder, Luca Bragazza

2.3.1 Einleitung

Die chemische und physikalische Charakterisierung landwirtschaftlicher Böden ist die Grundlage jeder Entscheidung zur Bewirtschaftung mit dem Ziel einer optimalen Pflanzenproduktion bei einer gleichzeitig nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen. Dazu sind zuverlässige Informationen über die Bodenqualität landwirtschaftlicher Flächen von entscheidender Bedeutung. Diese Informationen ermöglichen einerseits eine Bewertung der positiven Auswirkungen von nachhaltigen landwirtschaftlichen Praktiken und andererseits eine präzisere Bewirtschaftung. Die Bodenqualität kann anhand einer Reihe von Indikatoren (= Bodenparameter) bewertet werden. Derzeit ist dazu die Entnahme von Bodenproben und die anschliessende Analyse in einem Labor mit nasschemischen Methoden erforderlich. Dieser Ansatz ist zwar präzise und zuverlässig, aufgrund der hohen Analysekosten ist aber die Erhebung räumlich und zeitlich hochauflösender Daten nicht möglich. Dies ist der Hauptgrund für das wachsende Interesse an der Entwicklung neuer Methoden, mit denen die Bodenqualität mit höherer Auflösung bei vergleichbarer Zuverlässigkeit charakterisiert werden kann. Ein vielversprechender Ansatz sind dabei Naherkundungsmethoden (Proximal Sensing). Naherkundungsmethoden sind Messverfahren mit Sensoren in unmittelbarer Nähe der Probe (typischerweise weniger als 2 m), im Gegensatz zur Fernerkundung (d. h. Drohnen, Flugzeuge, Satelliten), bei welcher der Abstand zur Probe grösser ist (Piccini *et al.*, 2024). Im Projekt «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» wird hauptsächlich die Methodik für eine schnelle Messung von Bodenindikatoren mittels Bodenspektroskopie beschrieben, während im Projekt «Indikatoren Boden Zustand und Bodenbewirtschaftung» geeignete Indikatoren für die Bewertung der Bodenqualität ausgewählt werden.

Im Allgemeinen detektieren die Sensoren spezifische Wechselwirkungen elektromagnetischer Strahlung (Gammastrahlen, Röntgenstrahlen, sichtbares Licht, Infrarotlicht, Radiowellen) mit dem zu untersuchenden Substrat. Mit Hilfe von Kalibrierungsmodellen werden dann die Messwerte in verständliche Informationen umgewandelt, indem die Proben sowohl mit der etablierten Methode als auch mit der neuen Methode gemessen und anschliessend in Beziehung gesetzt werden. Sobald die Modelle kalibriert sind, müssen nur noch wenige ausgewählte Proben im Labor analysiert werden, um das Modell zu aktualisieren. Dadurch sind kostengünstige, schnelle und hochauflösende Messungen möglich. Im Fall des Projekts «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» nutzten wir die Spektroskopie im sichtbaren und Nahinfrarotspektrum (Vis-NIR) für Vorhersage von einer Reihe von Indikatoren für die Bodenfruchtbarkeit. Die Vis-NIR-Spektroskopie wurde in den letzten Jahrzehnten erfolgreich zur Vorhersage von Bodenparametern wie Tongehalt, organischem Kohlenstoff im Boden (soil organic carbon, SOC) und Gesamtstickstoff (N_{tot}) eingesetzt, hauptsächlich aber unter Laborbedingungen, d. h. unter Verwendung von Bodenproben,

die vor der Aufnahme der Vis-NIR-Spektren getrocknet und gesiebt (< 2 mm, manchmal aber auch fein gemahlen) wurden (Stenberg *et al.*, 2010; Barra *et al.*, 2021; Piccini *et al.*, 2024). Durch die Entwicklung von tragbaren Spektrometern kann die Vis-NIR-Spektroskopie direkt vor Ort (*in situ*) eingesetzt werden, wodurch zeitaufwändige Vorbereitungsschritte wie Transport, Trocknen und Sieben entfallen. Der *In-situ*-Einsatz der Vis-NIR-Spektroskopie zur Charakterisierung der Bodenfruchtbarkeit ist jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden, die wir im Rahmen des Projekts «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» untersucht haben.

Unsere Hauptziele waren dabei:

- Die Quantifizierung der Genauigkeit der *In-situ*-Vorhersagen von insgesamt 20 wichtigen Bodenfruchtbarkeitsindikatoren
- Das Erstellen eines Leitfadens für die Erfassung von Vis-NIR-Spektren direkt im Feld
- Die Bewertung des Einflusses der Bodenfeuchtigkeit auf die Vorhersagegenauigkeit
- Die Bewertung der Modellergebnisse für zwei verschiedene tragbare Spektrometer, d. h. ein hochauflösendes, aber teures Forschungsspektrometer und ein neu entwickeltes, kostengünstigeres Kompaktspektrometer

2.3.2 Methoden

Grundsätzlich werden bei der Vis-NIR-Spektroskopie Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren und nahen Infrarotbereich des Lichtspektrums (350–2500 nm) mit Bodenbestandteilen gemessen. Das Licht wird in Form von Schwingungen chemischer Bindungen (vor allem Kohlenstoffverbindungen) absorbiert und es entsteht ein Spektrum. Da Böden aus einer komplexen Mischung spektral aktiver Verbindungen bestehen (z. B. organischer Kohlenstoff, Ton und Eisenminerale, Bodenwasser), werden die Spektren durch die Überlagerung der Absorptionspeaks und Oberton- und Kombinationsschwingungen sehr komplex. Um die in diesen Spektren enthaltenen Informationen mit den Labormessungen in Beziehung zu setzen, sind deshalb chemometrische Modelle erforderlich.

Auf neun Feldern mit Agroscope-Versuchen wurden 134 Bodenproben für die Analyse der Bodeneigenschaften im Labor entnommen und parallel dazu auch die Vis-NIR-Spektren dieser Proben gemessen. Während der Probenahme wurden die Spektren im Feld (*in situ*) in verschiedenen Konfigurationen mit jeweils fünf Wiederholungen aufgenommen:

- entlang der flach abgeschnittenen Seite eines 20 cm langen Erdbohrers
- auf der unveränderten Bodenoberfläche (nur grobe Pflanzenreste wurden entfernt)
- auf der geglätteten Bodenoberfläche

Zusätzlich wurden von denselben Bodenproben auch Vis-NIR-Spektren unter Laborbedingungen aufgenommen:

- nach Trocknen und Sieben < 2 mm
- nach Trocknen, Sieben und feinem Mahlen

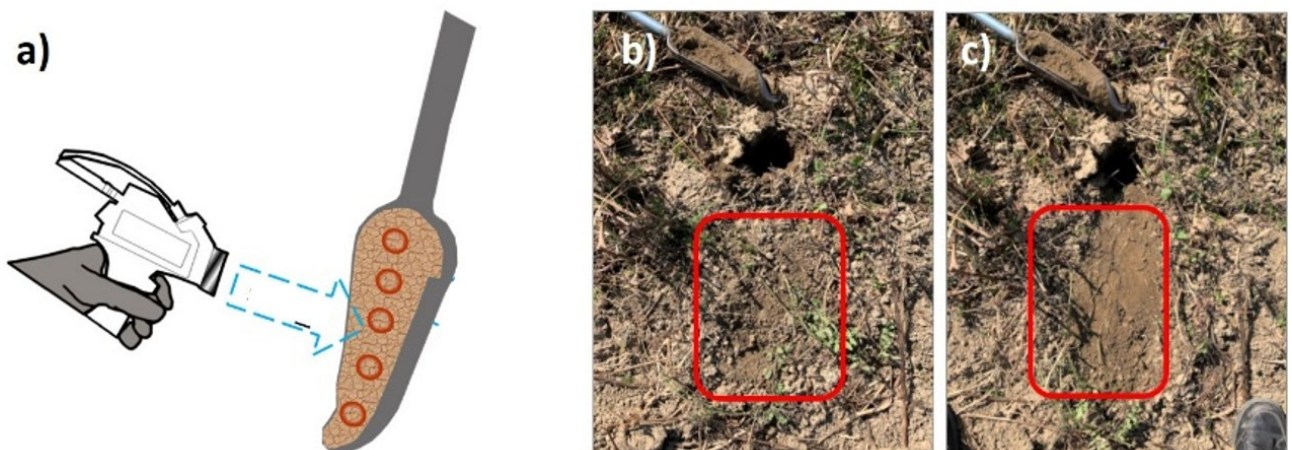


Abb. 6: Schematik der *In-situ* Scankonfigurationen an der Seite des Erdbohrers (a), auf der unveränderten Bodenoberfläche (b) und der geglätteten Bodenoberfläche (c).

Für jede Scanning-Konfiguration (*In-situ*-Spektren und Laborspektren) wurden PLSR-Modelle (Partial Least Square Regression) kalibriert und validiert. Die Leistung der Modelle wurde anhand des Determinationskoeffizienten des Modells (R^2), des Root Mean Square Errors der Kalibrierung oder Validierung (RMSEC/RMSEP) und des Verhältnisses des Fehlers zum Interquartilsabstand (RPIQ = Interquartilsabstand/RMSEP) für jeden untersuchten Parameter zur Bodenfruchtbarkeit bewertet.

Für die Aufnahme der Vis-NIR-Spektren wurden zwei verschiedene tragbare Spektrometer verwendet: ein teures tragbares Forschungsspektrometer (PSR+3500, Spectral Evolution, Haverhill, MA, USA) mit hoher spektraler Auflösung und breitem Spektralbereich (2,8–8 nm, 350–2500 nm) sowie ein preiswerteres tragbares MEMS-Spektrometer (NeoSpectra Scanner, SiWare, Kairo, Ägypten) mit geringerer spektraler Auflösung und schmalerem Spektralbereich (16 nm, 1350–2500 nm).

2.3.3 Hauptergebnisse

Ein erstes Ziel des Projekts «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» bestand darin, die Position für das *In-situ*-Scanning zu ermitteln, welche die zuverlässigsten Vorhersagen ermöglicht. Die Indikatoren zur Modellleistung (PLSR mit «repeated double cross validation» und 100 Wiederholungen) zeigen, dass sieben von anfänglich 15 Bodenparametern erfolgreich vorhergesagt werden konnten (Metzger *et al.*, 2024a). Die beste Vorhersage wurde für Kationenaustauschkapazität (CEC), Textur, pH-Wert, organischen Kohlenstoff (SOC) und Gesamtstickstoff (N_{tot}) erzielt. In der nachfolgenden Tabelle 2 werden die erfolgreich vorhergesagten Bodenparameter mit den entsprechenden Werten der Modellleistungsindikatoren dargestellt. Vereinfacht gesagt kann ein RPIQ-Wert > 1,9 als Indikator für eine zuverlässige Vorhersage eines Parameters gelten (Ludwig *et al.*, 2019), obwohl dieser RPIQ-Schwellenwert im Zusammenhang mit den anderen Modellleistungsindikatoren und natürlich den Bedürfnissen der Anwenderinnen und Anwendern hinsichtlich der gewünschten Modellgenauigkeit bewertet werden muss. Bodenparameter, die nicht erfolgreich vorausgesagt werden konnten, waren z. B. die Gesamtgehalte an Magnesium, Kalium und Phosphor und Karbonaten.

Tab. 2: Übersicht über die Modellleistungsindikatoren zu den erfolgreich vorhergesagten Bodenparametern für den Scanner PSR+3500 und den Scanner NeoSpectra mit dem Determinationskoeffizient (R^2), der Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers der Vorhersage (RMSEP) und dem Verhältnis der Leistung zum Interquartilsabstand (RPIQ).

	PSR+3500 (Forschungsinstrument)			NeoSpectra (tragbares Instrument)		
	R^2	RMSEP	RPIQ	R^2	RMSEP	RPIQ
CEC (meq/kg)	0.91	19.65	6.26	0.9	19.84	5.55
Exch. Mg (g/kg)	0.89	0.08	4.40	0.78	0.11	2.95
Ton (%)	0.91	3.84	3.69	0.95	2.94	4.73
pH	0.74	0.39	3.34	0.42	0.58	2.16
SOC (%)	0.71	0.37	3.19	0.64	0.41	2.72
Sand (%)	0.88	3.96	3.06	0.86	4.44	2.94
N_{tot} (%)	0.86	0.05	2.91	0.87	0.05	2.92

Nach der Analyse der Modellleistungen für die verschiedenen Positionen des *In-situ*-Scannings zeigte sich, dass das Scannen entlang der Seite des 20 cm langen Bodenkerns mit fünf Wiederholungen die besten Vorhersagen lieferte. Mit dieser Methode kann sichergestellt werden, dass die Bodeneigenschaften über eine Tiefe gemessen werden, die im Allgemeinen für die landwirtschaftliche Nutzung relevant ist, und dass Verzerrungen durch Bodenoberflächenphänomene (z. B. Krusten, Algen, Streu) vermieden werden. Die Messung ist somit einfach und schnell durchzuführen

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse haben wir auch die Vorhersagegenauigkeit fünf weiterer Bodenqualitätsindikatoren (Metzger & Bragazza, 2024) getestet, die sich als wichtig für die Beschreibung des Bodenzustands erweisen könnten. Wir untersuchten den mit Permanganat extrahierbaren organischen Kohlenstoff (POXC oder leicht verfügbarer SOC) als Indikator für Veränderungen durch Bewirtschaftungsmethoden und das SOC:Ton-

Verhältnis als Indikator für die strukturelle Stabilität des Bodens. Die Modelle zeigten gute Leistungen bezüglich der Indikatoren R^2 (0.75 bzw. 0.73), RMSEP (96.4 bzw. 0.01) sowie RPIQ (2.71 bzw. 2.62) für POXC bzw. das SOC:Ton-Verhältnis. Die Ergebnisse zeigen auch, dass andere Parameter nicht zuverlässig vorhergesagt werden können. Dazu gehört der Gehalt an mineralischem Stickstoff (Ammoniak und Nitrat). Nichtsdestotrotz kann der Gesamtstickstoff (N_{tot} , RPIQ > 2.9) verlässlich bestimmt werden und dieser zur Abschätzung von potenziell verfügbarem organischem Stickstoff aus den Bodenreserven verwendet werden.

Bei der *In-situ*-Aufnahme von Spektren aus Bodenproben kann die in den Proben vorhandene Bodenfeuchtigkeit zu einer erhöhten Absorption bei bestimmten Wellenlängen des Spektrums führen. Dies kann problematisch sein, wenn Modelle auf der Grundlage bereits vorhandener Bibliotheken von Bodenspektren (soil spectral libraries, SSL), die ausgehend von getrockneten und gesiebten (< 2 mm) Bodenproben erstellt wurden, zur Vorhersage von Bodenparametern mit *In-situ*-Spektren verwendet werden. Eine Möglichkeit, den Einfluss der Feuchtigkeit zu verringern, besteht darin, das unerwünschte Rauschen (Variation) in den Spektren, das durch die Feuchtigkeit verursacht wird, mit Hilfe eines Orthogonalisierungsverfahrens (external parameter orthogonalization, EPO) mathematisch zu entfernen. Zu diesem Zweck wurden die *In-situ*-Spektren sowie die im Labor aufgenommenen Spektren von getrockneten und gesiebten bzw. getrockneten, gesiebten und gemahlten Proben in verschiedenen Kombinationen mit und ohne EPO-Korrektur verwendet und ihre Vorhersagegenauigkeit für SOC, Ton und N_{tot} anhand der Modellleistungsindikatoren getestet (Metzger *et al.*, 2024b). Dabei war festzustellen, dass das feine Mahlen die Modellleistung für die Vis-NIR-Spektren nicht wesentlich verbesserte. In einigen Fällen schnitten Modelle, die auf der *in-situ*-Aufnahme von Spektren mit der ursprünglichen Probefeuchtigkeit basierten, ebenso gut ab wie das entsprechende Modell aus im Labor aufgenommenen Spektren. Wenn Modelle mit Labor-Spektren zur Vorhersage von Bodenparametern ausgehend von *in-situ*-Spektren verwendet wurden, war die unkorrigierte Leistung zwar unzureichend, nach EPO-Korrektur verbesserte sich die Modellgenauigkeit aber erheblich. Wenn die *In-situ*-Modelle mit EPO korrigiert wurden, konnte die Vorhersagegenauigkeit für den Tongehalt für das PSR+3500-Spektrometer verbessert werden, nicht jedoch für das NeoSpectra-Spektrometer.

Im Rahmen des Indicate-Projekts «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» wurde mit dem SOC:Ton-Verhältnis ein wichtiger Indikator für die Bodenqualität identifiziert, der durch Vis-NIR-Spektroskopie genau vorhergesagt werden kann (Metzger & Bragazza 2024). Wir verglichen das mit Hilfe unseres Proximal-Sensing-Modells (siehe oben) vorhergesagte Verhältnis mit den Daten, die im Labor durch Analyse der im Projekt «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» gewonnen Proben ([DOK-Langzeit-Versuch](#)). Es lassen sich bei allen drei Methoden ähnliche Trends feststellen, was für das Potenzial der *In-situ*-Anwendung der Vis-NIR-Spektroskopie spricht.

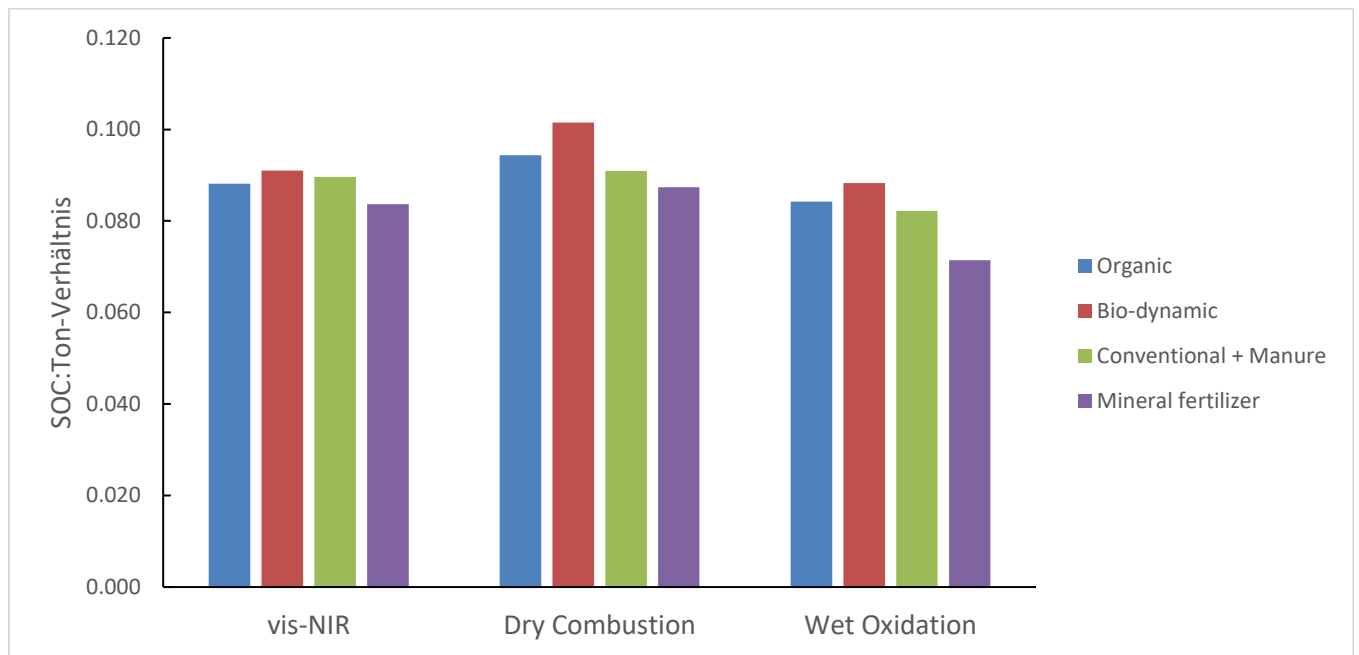


Abb. 7: Mittelwert des SOC:Ton-Verhältnisses aus vier Behandlungen im DOK-Langzeit-Versuch. Die Vis-NIR-Werte wurden anhand von In-situ-Spektren unter Anwendung des Proximal-Sensing-Modells vorhergesagt. Die Begriffe «Dry Combustion» und «Wet Oxidation» beziehen sich auf zwei verschiedene Laborprotokolle zur SOC-Bestimmung.

2.3.4 Fazit

Die Ergebnisse unserer Modellierungstests zeigen, dass tragbare vis-NIR-Spektrometer ein erhebliches Potenzial für die Vorhersage von Bodenparametern auf der Grundlage von *in situ* aufgenommenen Spektren besitzen. So wurde für einige wichtige Indikatoren zur Bodenqualität wie Tongehalt, organischer Kohlenstoff, pH-Wert des Bodens, Kationenaustauschkapazität und Gesamtstickstoff sowie für zusätzliche Bodenindikatoren wie POXC und das SOC:Ton-Verhältnis eine gute Vorhersagegenauigkeit erreicht.

Wenn ein zuverlässiges Vorhersagemodell für den betreffenden Bereich kalibriert und validiert ist, kann die Vis-NIR-Spektroskopie zur präzisen Überwachung der Qualität landwirtschaftlicher Böden mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung eingesetzt werden. Die Spektren können *in situ* nach dem von uns entwickelten Protokoll aufgenommen, und je nach Gerät entweder sofort durch Zugriff auf das Modell über Online-Dienste analysiert oder aufgezeichnet und später analysiert werden. Wenn ein zuverlässiges Modell besteht, muss nur noch die Qualität der Spektren bewertet werden, die dann zur Vorhersage von Bodenfruchtbarkeit verwendet werden können.

Es bestehen bei den Vorhersagemodelle allerdings noch gewisse Unsicherheiten, die allerdings durch eine mögliche Hochdurchsatzanalyse mit einer hohen räumlichen Auflösung und durch schnelle und erschwingliche Ergebnisse kompensiert werden. Dadurch erhalten die Anwenderinnen und Anwender detaillierte Informationen über den Bodenzustand, auf deren Grundlage die Bewirtschaftungsmassnahmen bewertet und wenn nötig angepasst werden können. Effizienz und Nutzen dieser Massnahmen können dann durch wiederholte Messungen während der Saison oder in den Folgejahren überwacht werden.

Da sich alle spektral aktiven Bodenbestandteile in den Spektren widerspiegeln, können die zuvor aufgezeichneten Spektren zu einem späteren Zeitpunkt auch zur Erstellung von Modellen für neue Indikatoren oder zur Vorhersage eines neuen Indikators auf der Grundlage eines neuen Modells verwendet werden, ohne dass eine erneute Aufnahme oder Probenahme im Feld oder eine Analyse aller Proben im Labor erforderlich ist.

2.4 Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung

Autorinnen und Autoren: Franziska Häfner, Gina Garland, Florian Walder

2.4.1 Einleitung

Der Boden spielt eine zentrale Rolle in Agrarökosystemen und bildet die Grundlage für die landwirtschaftliche Produktion. Er erfüllt wichtige Funktionen wie die Speicherung und Filterung von Wasser, den Abbau und die Transformation von Biomasse und Nährstoffen, die Kohlenstoffspeicherung, sowie die Bereitstellung eines Lebensraums für Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen. Die Fähigkeit des Bodens diese vielfältigen Funktionen zu erfüllen und somit Produktivität, Biodiversität und Ökosystemleistungen zu unterstützen wird häufig als gute Bodenqualität oder Bodengesundheit definiert (FAO). Ein qualitativ guter Boden, der diese Multifunktionalität ausüben kann, bildet sich über Jahrhunderte hinweg und stellt somit eine endliche Ressource in menschlichen Zeiträumen dar. Eine fundierte, qualitative Beurteilung des Bodenzustands ist daher entscheidend, um mögliche Risiken frühzeitig zu identifizieren und so einer Degradierung vorzubeugen. Hierbei spielen Bodenqualitäts-Indikatoren eine Schlüsselrolle, die bestimmte Anforderungen erfüllen müssen.

Indikatoren für die Bodenqualität müssen eine hohe Aussagekraft in Bezug auf Bodenfunktionen aufweisen, empfindlich auf Bewirtschaftungsveränderungen reagieren, diese Veränderungen zuverlässig erfassen sowie messbar und reproduzierbar sein (Oberholzer *et al.*, 2012; Thiele-Bruhn *et al.*, 2020). Aufgrund der hohen Heterogenität der inhärenten Bodeneigenschaften auf kleinem Raum und ihres grossen Einflusses auf die Ausprägung der Bodenqualitätsindikatoren ist eine standortbezogene Beurteilung notwendig, die durch kontextspezifische Referenzwerte – in Form von Ziel- oder Grenzwerten – erreicht werden kann.

Für eine fundierte Beurteilung des Bodenzustands sind sowohl dynamische Zustandsindikatoren als auch statische, inhärente Bodeneigenschaften (z. B. Textur) erforderlich. Zwar existieren bereits einzelne Referenzwerte, wie das Verhältnis von organischem Kohlenstoff (C_{org}) zu Ton, die im EU-Vorschlag für das Soil Monitoring and Resilience Law berücksichtigt werden, jedoch fehlt eine umfassende Zusammenstellung relevanter Indikatoren für biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften samt entsprechender Referenzwerte. Ein wesentlicher nächster Schritt ist daher die Entwicklung eines integrierten Bewertungssystems, um standortspezifische kritische Zustände zu identifizieren, die die Bodenfunktionalität gefährden.

Das Projekt «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» verfolgt das Ziel, ein Set praxisnaher und bewirtschaftungssensitiver Indikatoren für die standortspezifische Beurteilung der Bodenqualität zu entwickeln. Damit sollen mögliche Risiken in Bezug auf die Umweltziele Landwirtschaft erfasst und Verbesserungspotenzial bei einzelnen Bodenfunktionen aufgezeigt werden, um die landwirtschaftliche Produktivität langfristig zu sichern. Auf dieser Basis sollen die Bewirtschaftenden gezielte Massnahmen ergreifen können, um die Bodenqualität zu verbessern.

2.4.2 Methoden

Auf Basis einer Literaturstudie wurde eine Vorauswahl an sensitiven chemischen, physikalischen und biologischen Indikatoren getroffen, die mithilfe verfügbarer standardisierter Methoden erhoben werden konnten. Zur qualitativen Beurteilung dieser Indikatoren wurden sie, soweit möglich, mit verfügbaren Referenzwerten verglichen. Referenzwerte umfassen kritische Grenzwerte, Zielwerte (im Idealfall das Optimum), Referenzgleichungen (Oberholzer, 1999) (z. B. Pedotransferfunktionen) sowie Vergleichswerte auf Basis einer Datenverteilung (z. B. unteres/oberes Quantil). Alle identifizierten Referenzwerte sind in Häfner *et al.* (in Bearb.) zusammengestellt und diskutiert. In Tabelle 3 sind die Bewertungsgrundlagen für die Indikatoren von «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» aufgeführt. Der Fokus lag auf Indikatoren, die relevant für eine Bodenfunktion sind, sowie deren Beurteilung mittels des 'standortspezifischen Potenzials' anhand von Bodeneigenschaften wie Textur, Steingehalt, pH-Wert und Bodendichte (Greiner *et al.*, 2018; Vogel *et al.*, 2019). Für diese Indikatoren wurden dann standort-spezifische Referenzwerte benutzt, um die möglichen Einschränkungen in der Bodenfunktionalität aufzuzeigen. Auf Basis der Referenzwerte wurden dann lineare Bewertungskurven (scoring functions) gebildet, um die Indikatoren auf einer Skala von 0 bis 1 zu bewerten und zu normalisieren. Dabei steht 1 für das Potenzial bzw. einen optimalen Zustand ohne Limitierung, 0.5 markiert die Grenze zu möglicherweise kritischen Limitierungen von Bodenfunktionen, und somit auf ein mögliches Risiko hinweist, während 0 einen schlechten beziehungsweise limitierenden Zustand beschreibt (Beispiele in Abb. 8). Falls keine Referenzwerte hergeleitet werden konnten, wurde

die Bewertungsgrundlage für die Bewertungskurve um untere oder obere Quantile einer Datenverteilung ergänzt (z. B. Regenwürmer) (Cluzeau *et al.*, 2012; Stähli *et al.*, 1997).

Die ausgewählten Indikatoren wurden dann zu den Bodenfunktionen Kohlenstoffspeicherkapazität, Wasserspeicherkapazität, Bodenstrukturhaltung, Biologische Aktivität und Nährstoffregulierung zusammengeführt (Tab. 4). Für die Beurteilung der Bodenfunktionen wurden Indikatoren entweder (i) über den harmonischen Mittelwert aggregiert, falls Grenz- und Zielwerte vorhanden waren, oder (ii) auf Basis von Referenzgleichungen (Regressionsgleichungen/ Pedotransferfunktionen) direkt mit dem gemessenen Indikator verglichen (C-Speicherung und Wasserspeicherkapazität) (Vogel *et al.*, 2019). Anhand der aggregierten Indikatorwerte lässt sich der Erfüllungsgrad der jeweiligen Funktion abschätzen, was Aufschluss über die Funktionsfähigkeit des Bodensystems gibt.

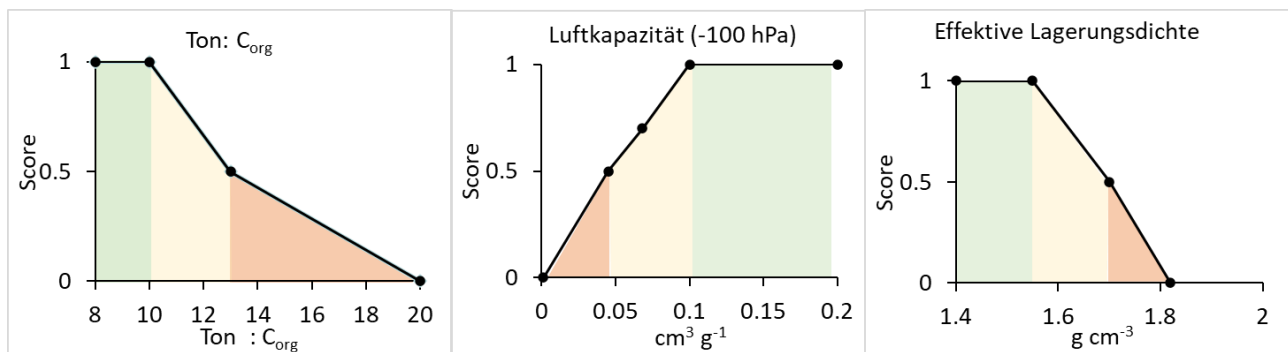


Abb. 8: Beispiel für eine Grenzwert basierte Beurteilungskurve (scoring curves) zur Normalisierung von Indikatoren für die Strukturqualität (Werte aus Tab. 3). Score 1 = optimal bzw. nicht limitierend (grün), zwischen 1 und 0.5 = Verbesserungspotenzial (gelb), suboptimal, 0.5 = Grenzwert; < 0.5 potenziell limitierend (rot). C_{org}:Ton-Verhältnis hier vereinfacht als Ton:C_{org} dargestellt mit Grenzwert bei 13:1.

Tab. 3: Ausgewählte Indikatoren (chem = chemisch, phys = physikalisch, bio = biologisch) für die Bodenzustandsbewertung mit Referenzwerten- bzw. Gleichungen. Methode nach Agroscope FAL wenn nicht spezifiziert; Sc = Score/Bewertung (zwischen 0 und 1) für die lineare Bewertungskurve/Scoring curve.

Typ	Indikatoren	Referenzwerte/ Bewertungsbasis	Quelle
phys/ chem	C _{org} ^a : Ton	1:10 = Optimum (Sc 1); 1:13 = kritisch (Sc 0.5); 1:20 = Sc 0 (Untergrenze definiert)	Abgeleitet von Johannes <i>et al.</i> (2017)
phys	Gravimetrische Luftkapazität («Grobporen») (cm ³ g ⁻¹) ^b	≥0.1 = Optimum (Sc=1; abgeleitetes Opt.) 0.068 = Grenzwert 0.045 = degradierte Struktur («remediation value», Sc 0.5) 0.01 = Untergrenze definiert (Sc 0)	Johannes <i>et al.</i> (2019)
	Effektive Lagerungsdichte (g cm ³) (LD _{eff}) LD _{eff} = LD + 0.009 x Ton%	≤ 1.55 = Optimum (Sc 1); 1.7 = Grenzwert zur Limitierung (Sc 0.5) 1.82 = verdichtet/ limitierend (Sc 0)	Abgeleitet von Kaufmann <i>et al.</i> (2010)
	Feld und Luftkapazität (vol%)	Referenzwert bzw. die Vergleichsgrösse basiert oft dem Optimum einer PTF für eine spezifische Textur	KA5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden)
chem	C _{org} (g kg ⁻¹) ^c	Referenzwert (Regressionsgleichung) basiert auf dem Textur-spezifischen C-Speicherpotenzial ^c $C_{potenzial} = (7.18 + 0.20 T) \times p_b d \times (1 - V_s)$ (C _{pot} = Sc 1) T = Ton + Schluff (%); V _s = Volumen Steine (%); p _b = Lagerungsdichte ³ (g cm ³); d = Horizont-Mächtigkeit (dm)	Six <i>et al.</i> (2002); Vogel <i>et al.</i> (2019)
	pH (in H ₂ O)	pH-Optimumkurve: 5.5–7 = Optimum (Sc1); > 7.5 / < 5.5 = limitierend (Sc 0.5); 3 bzw. 9 = Untergrenze definiert (Sc 0)	Bewertungsgrundlage auf Basis der GRUD (2017)
	Basensättigung (%)	≥ 60 % = ausreichende Basensättigung (Sc 1) < 50 % = «basenarm» (Sc 0,5) < 20 % als Untergrenze definiert (Sc 0) (wobei < 40 % bereits «sehr arm»)	

Typ	Indikatoren	Referenzwerte/ Bewertungsbasis	Quelle
bio	Basalatmung (BA)	Referenzgleichung für Ackerland in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften: $BA_{Ref} \text{ (mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ TS h}^{-1}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{org}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Ton}) - 0.0009 \text{ Sand} - \ln(88)$ $Quotient: Q_{BA} = \frac{BA_{gemessen}}{BA_{Ref}}$ Optimumkurve auf Basis von Q-BA-Bewertung: 0.82–1.22= Normbereich (Sc 1) > 1.49 bzw. <0.67 = sehr hoch/niedrig (Sc 0.5) > 3 bzw. 0.1 als Untergrenze definiert (Sc 0)	Oberholzer & Scheid (2007); Oberholzer (1999); Hug <i>et al.</i> (2021)
	qCO ₂ (=BA:MBC) (mg CO ₂ -C g ⁻¹ MBC h ⁻¹) "metabolischer Quotient"	≤ 1.2 ≈ Referenzwert Ackerland (Sc 1) 2 = Stressindikator ^d (Sc 0.5) 3 = Untergrenze definiert (Sc 0)	Anderson (2003); Anderson & Domsch (2010); Hug <i>et al.</i> (2021); VBB/BSA (2009)
	Mikrobielle Biomasse C (MBC):C _{org} (%) "mikrobieller Quotient"	2.9 = «Optimum» 2.3 =Referenzwert Monokultur (Sc 0.7 als Minimumziel) <2= kritischer Grenzwert ^d (Sc 0.5) 1= Untergrenze definiert (Sc 0)	Anderson (2003); Anderson & Domsch (2010)
	Regenwürmer ^e (RW), (RW _{BM} = Biomasse g m ⁻² ; RW _{Ind} = Anzahl Individuen m ⁻²)	300 g m ⁻² ; 320 Ind./m ⁻² = Zielwert (Sc 1) 130 g m ⁻² ; 150 Ind./m ⁻² = Min. Ziel (Sc 0.75) 86 Ind./m ⁻² = Grenzwert (Sc 0.5) 0 g m ⁻² oder 0 Ind./m ⁻² = Untergrenze (Sc 0)	Angepasst ⁵ aus Vergleichswerten von Cluzeau <i>et al.</i> (2012); Pfiffner (2022); Stähli <i>et al.</i> (1997)

^aC_{org}= TC-Carbonat-C; wobei TC (Total C) über die Verbrennungsmethode (Dumas) und Carbonat-C über die Scheibler-Methode

^bGravimetrische Luftkapazität bei -100 hPa nach Johannes *et al.* (2019)

^cFür das Potenzial, Annahme einer optimalen LD nach Kaufmann *et al.* (2010) in Abhängigkeit von Ton und Schluff (%)

LD_{opt}=1.524 – (0.00558 x Ton) – (0.000211 x Schluff²)

^dfür Böden mit ≈ neutralem pH

^eGrenzwerte ohne allgemeine Gültigkeit, Ableitung der linearen Bewertungskurve anhand Vergleichswerte aus der Literatur. Angepasst anhand von Erfahrungswerten und auf Basis einer Datenverteilung (unteres/oberes Quantil) von Regenwürmern in Schweizer Graslandstandorten.

Tab. 4: Berechnung der Bodenfunktionen anhand von Indikator-Proxies, Aggregation und Betrachtung weiterer Bodendaten.

Funktion	Indikatoren und Daten	Berechnung	Quelle
C- Speicherung	Indikator: C _{org} Weitere Daten: Textur (Ton, Schluff), Lagerungsdichte, Steingehalt	$C_{zustand} = \sum_i Corg_i \times p_{b,i} d_i \times (1 - V_{s,i})$ $C_{Speicherkapazität} = \frac{0.8 \times C_{zustand}}{C_{pot}}$ T=Ton und Schluff (%); Vs= Volumen Steine (%); p_b= Lagerungsdichte (g cm³); d_i= Horizont-Mächtigkeit (dm) des i-ten Horizonts	Six <i>et al.</i> (2002); Vogel <i>et al.</i> (2019)
Wasserspeicherkapazität ¹	Indikatoren: Luft- und Feldkapazität Weitere Daten: Textur, Hinneigung, Pedo-Transfer-Funktion für Feld und Luft-Kapazität (KA5)	$= \frac{1}{\sum_i d_i} \sum_i \frac{FK_{gemessen} + a AK_{gemessen}}{FK_{Textur} + a AK_{Textur}} d_i$ d_i = Horizont-Mächtigkeit (dm); a = 1 – (Neigung/9) für Hangneigung [%] < 9 %; a = 0 bei Neigung > 9 %	Vogel <i>et al.</i> (2019)
Bodenstruktur-erhaltung und Qualität	Indikatoren: C _{org} : Ton, effektive Lagerungsdichte (LD _{eff}), gravimetrische Luftkapazität (LK)	Harmonischer Mittelwert: $\bar{x}_{harm} \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \dots + \frac{1}{x_2}}$ $\bar{x}_{harm} (LD_{eff} + LK + Corg: Ton)$	Aggregation konzeptionell nach Vogel <i>et al.</i> (2019)
Biologische Aktivität ² (bzw. Habitat für Boden-organismen)	Indikatoren: Basalatmung, metabolischer Quotient (qCO ₂) Regenwürmer (Biomasse, Anzahl) Weitere Daten: pH, C _{org} , Ton, Sand, Landnutzung	$\bar{x}_{harm} (RW_{Ind} + RW_{BM} + Q_{BA} + qCO_2)$	Aggregation konzeptionell nach Vogel <i>et al.</i> (2019); Huber <i>et al.</i> (2008) ²
Nährstoffregulierung	Indikatoren: pH, Basensättigung, mikrobieller Quotient (MBC:C _{org}),	$\bar{x}_{harm} (pH + Basensättigung + MBC:Corg),$	Aggregation konzeptionell nach Vogel <i>et al.</i> (2019)

¹Regenwurmmabundanz und Biomasse sowie Basalatmung u.a. als Indikatorenset für Biodiversitätsverlust im ENVASSO-Projekt (Huber *et al.*, 2008) empfohlen.

²Die Wasserspeicherkapazität wurde vereinfacht nur für den Oberboden dargestellt, da keine Proben aus dem Unterboden entnommen wurden.

Neben den direkt messbaren Bodenindikatoren gibt es auch die Möglichkeit, die Bodenqualität anhand von Bewirtschaftungsdaten indirekt abzuschätzen. Für die Charakterisierung der Bewirtschaftung gibt es bereits gut etablierte Indikatoren, wie zum Beispiel die Intensität der Bodenbearbeitung, den organischen Kohlenstoff-Eintrag oder die Bodenbedeckung (Büchi *et al.*, 2019). Diese Bewirtschaftungsfaktoren haben bedeutende Auswirkungen auf den Boden (Bagnall *et al.*, 2023; Garland *et al.*, 2021; Liptzin *et al.*, 2022) und können daher als indirekte Indikatoren für Bodenqualität herbeigezogen werden. Im Projekt «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» wurden die folgenden Indikatoren berücksichtigt: (i) Kohlenstoff (C)-Input, (ii) Bodenbearbeitungsintensität (*soil tillage intensity rating* «STIR»), (iii) Bodenbedeckungsgrad bzw. -tage. Die Berechnung dieser Indikatoren erfolgte über das R-Package «SoilManageR» (Heller *et al.*, 2024). Ein weiterer indirekter Indikator für die Bodenfunktionalität ist die primäre Produktion, die durch den mittleren relativen Ertrag im Vergleich zum kulturspezifischen Referenzertrag (Sinaj *et al.*, 2017) ermittelt wurde. Der relative Ertrag wurde in Bezug zu den berechneten Bodenfunktionen gestellt, um mögliche Zielkonflikte zu identifizieren.

Im nächsten Schritt überprüfen wir die Wirksamkeit des Konzepts und der jeweiligen Indikatoren. Der Proof-of-Concept wurde an vier Langzeitversuchen in der Schweiz mit unterschiedlichen Bewirtschaftungen durchgeführt: DOK (Systemvergleich Dynamisch, Organisch, Konventionell), FAST (Farming System and Tillage Experiment), SSO (Soil Structure Observatory) und ZOFÉ (Zürich Organic Fertilisation Experiment). Die unterschiedlichen Verfahren in den Langzeitversuchen, z. B. Pflug vs. pfluglos, organische vs. mineralische Düngung und konventionell vs. biologische Bewirtschaftung, sollten zu kontrastreichen Unterschieden in den Bereichen Bodenbiologie, -chemie und -physik führen, die wir mit unseren Indikatoren testen und referenzieren wollen.

Pro Parzelle wurden repräsentative Mischproben (0–20 cm) aus dem Oberboden für die chemischen und biologischen Analysen entnommen (10 Einstiche je Parzelle). Für die physikalischen Messungen wurden ungestörte Bodenproben (Zylinder mit 5 cm Durchmesser) bei einer Tiefe von 5–7 cm entnommen. Die Anzahl und Biomasse von Regenwürmern wurden mit zwei (DOK, SSO) bzw. drei Messwiederholungen (FAST, ZOFÉ) je Parzelle über Handsortierung (20 x 20 x 20 cm) und Senfmehlzugabe bestimmt. Für alle der untersuchten Varianten der Langzeitexperimente liegen zudem die genauen Bewirtschaftungsinformationen vor. Die Daten von mindestens einer vollständigen Fruchtfolge wurden als Basis für die Berechnung der indirekten Bewirtschaftungsindikatoren herangezogen (Heller *et al.*, 2024).

Zusätzlich wurde ein Methodenvergleich durchgeführt, um zu testen, inwieweit die Nutzung von Spektrometern zu einer vergleichbaren Indikatorbeurteilung (hier C_{org}/Ton) wie mit den Labormethoden führt. Im Rahmen des Projekts «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» (siehe Kapitel 2.3) wurden im DOK-Versuch *in situ* die visNIR Spektren von Bodenproben im Feld gesammelt, um einzelne Indikatoren vorherzusagen. Zusätzlich wurde ein neues *In-situ*-Messgerät, «Soil Enzyme Activity Reader» (SEAR, Digit Soil, Zürich, Schweiz), für die Messung von fünf Enzymen getestet, mit zwei Messwiederholungen je Parzelle und drei internen Messreplikationen je Messmembran.

2.4.3 Hauptergebnisse

Beurteilung der Indikatoren

Das neu erarbeitete Bodenqualitätsbeurteilungskonzept bietet anhand der Referenzwerte einen Einblick in die Bodenqualität der getesteten Flächen und lässt unterschiedliche Sensitivitäten der Indikatoren gegenüber der Bewirtschaftung erkennen.

Von den physikalischen Indikatoren war die effektive Lagerungsdichte am wenigsten sensitiv und kaum im limitierenden Bereich. Das Verhältnis $C_{org}:\text{Ton}$ und die Luftkapazität zeigten hingegen deutliche Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsformen und überschritten teilweise die Grenzwerte. Das Verhältnis $C_{org}:\text{Ton}$ lag bei den meisten Bewirtschaftungsformen unter dem Zielwert von 1:10 ($C_{org}:\text{Ton}$) und überschritt den Grenzwert von 1:13 gerade in Varianten mit rein mineralischer Düngung und konventioneller Bodenbearbeitung. Noch deutlicher waren die Grenzwertüberschreitungen bei der Luftkapazität (Abb. 9).

Auch bei den biologischen Indikatoren zeigten sich Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsformen, wobei die meisten Werte im Norm- bzw. Optimalbereich lagen. Besonders hohe Werte wurden unter biologischer Bewirtschaftung und organischer Düngung beobachtet. Bei Regenwürmern zeigte zudem die reduzierte Bodenbearbeitung den erwarteten positiven Effekt. Ähnlich zeigten chemische Indikatoren zwar Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsformen, jedoch ohne Grenzwertüberschreitungen. Mit Ausnahme der rein mineralischen Düngung

lagen der mikrobielle Quotient und die Basensättigung in allen Varianten nahe dem Optimalbereich. Der pH-Wert wies zwar signifikante Unterschiede innerhalb der Versuche auf, blieb jedoch ebenfalls im unkritischen Bereich.

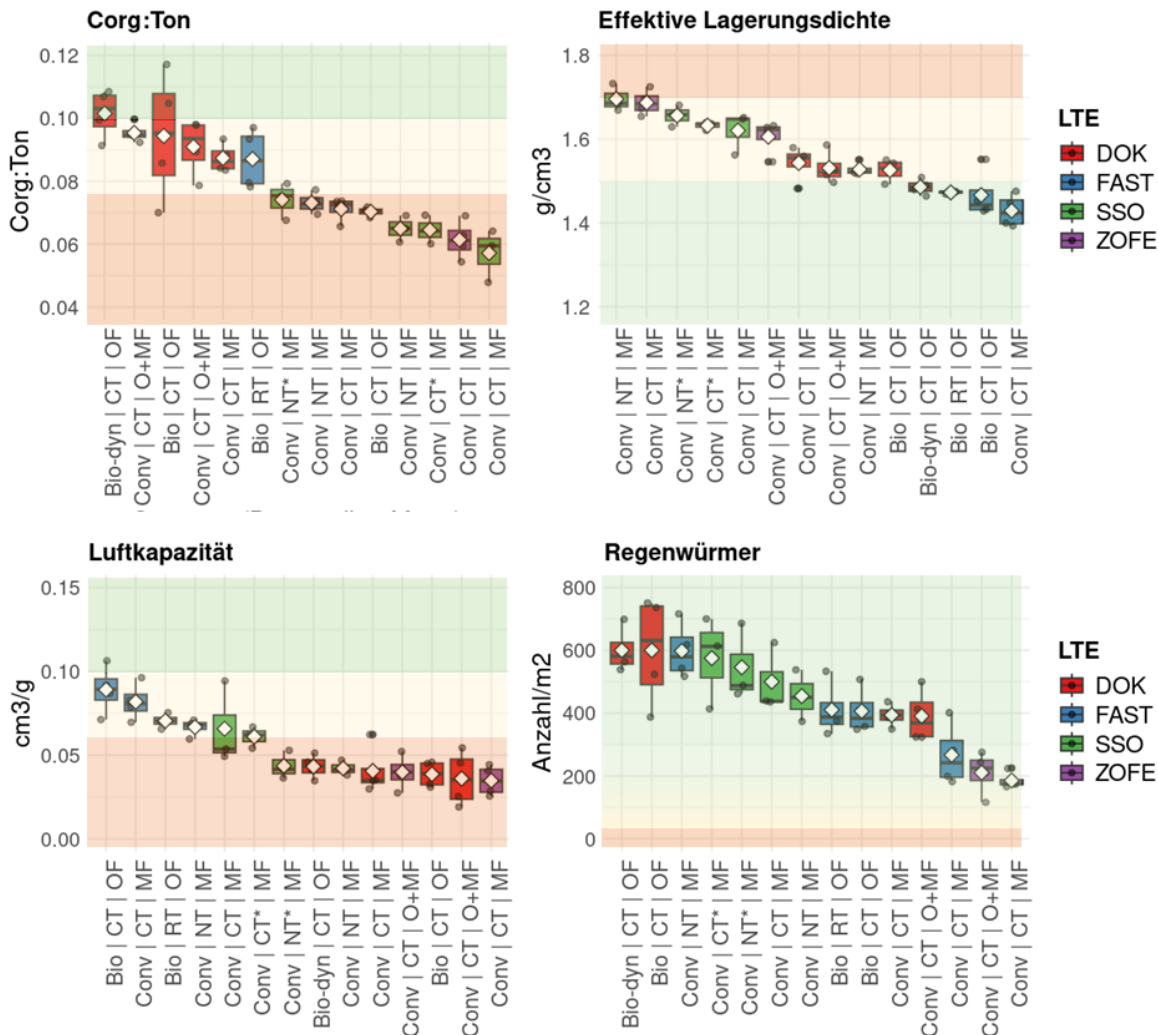


Abb. 9: Beispiele für einzelne Indikatoren und ihre Beurteilung anhand von Ziel- und Grenzwerten (Tab. 3). grün= optimal bzw. nicht limitierend, wobei der Übergang grün/gelb = Zielwert (Score 1), gelb= Verbesserungspotenzial, suboptimal (Score 0.5-1); Übergang gelb/rot =Grenzwert (Score 0.5), rot= <0.5 potenziell limitierend. Langzeitversuchen (LTEs) DOK, FAST, SSO und ZOFE, mit 3-4 Wiederholungen je Variante. Die Varianten unterschieden sich teilweise hinsichtlich: System I Bearbeitungsintensität I Düngerart, siehe y-Achse. Systemvergleich = konventionelle (conv), biologische (Bio) oder biodynamische (Bio-dyn) Bewirtschaftung; Bearbeitungsintensität = konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug (conventional tillage =CT), reduzierte Bodenbearbeitung (reduced tillage =RT), Direktsaat (no tillage =NT), wobei «*» ein einmaliges Verdichtungsereignis im SSO-Versuch vor 10 Jahren darstellt (CT* und NT*); Düngerart = rein mineralische Dünger (mineral fertilizer =MF), rein organische Dünger (organic fertilizer =OF), oder eine Mischung (O+MF)

Beurteilung der Bodenfunktionen

Auch bei der Beurteilung der Bodenfunktionen zeigte sich in Bezug auf die bodenphysikalischen Eigenschaften eine deutliche Differenzierung der Bewirtschaftungseinflüsse, mit tiefen Erfüllungsgraden von 0.32–0.79 (Abb. 10). Hohe Werte bei der Strukturhaltung (≥ 0.7) wurden für biologische Bewirtschaftung mit reduzierter Bodenbearbeitung, sowie für biodynamische Bewirtschaftung erreicht. Die Wasserspeicherkapazität zeigte Erfüllungsgrade von 0.61 bis 0.76 zwischen den Bewirtschaftungsformen, ohne kritische Unterschreitungen (< 0.5). Die rein mineralisch gedüngte Variante im ZOFE erreichte den niedrigsten, die biodynamische Variante im DOK den höchsten Wert. Da die Referenzwerte der Wasserspeicherkapazität auf texturbasierten Annahmen und nicht auf empirischen Grenzwerten basieren, könnte die geringe Spannweite der Ergebnisse auf eine niedrigere Sensitivität der Referenzwerte hinweisen.

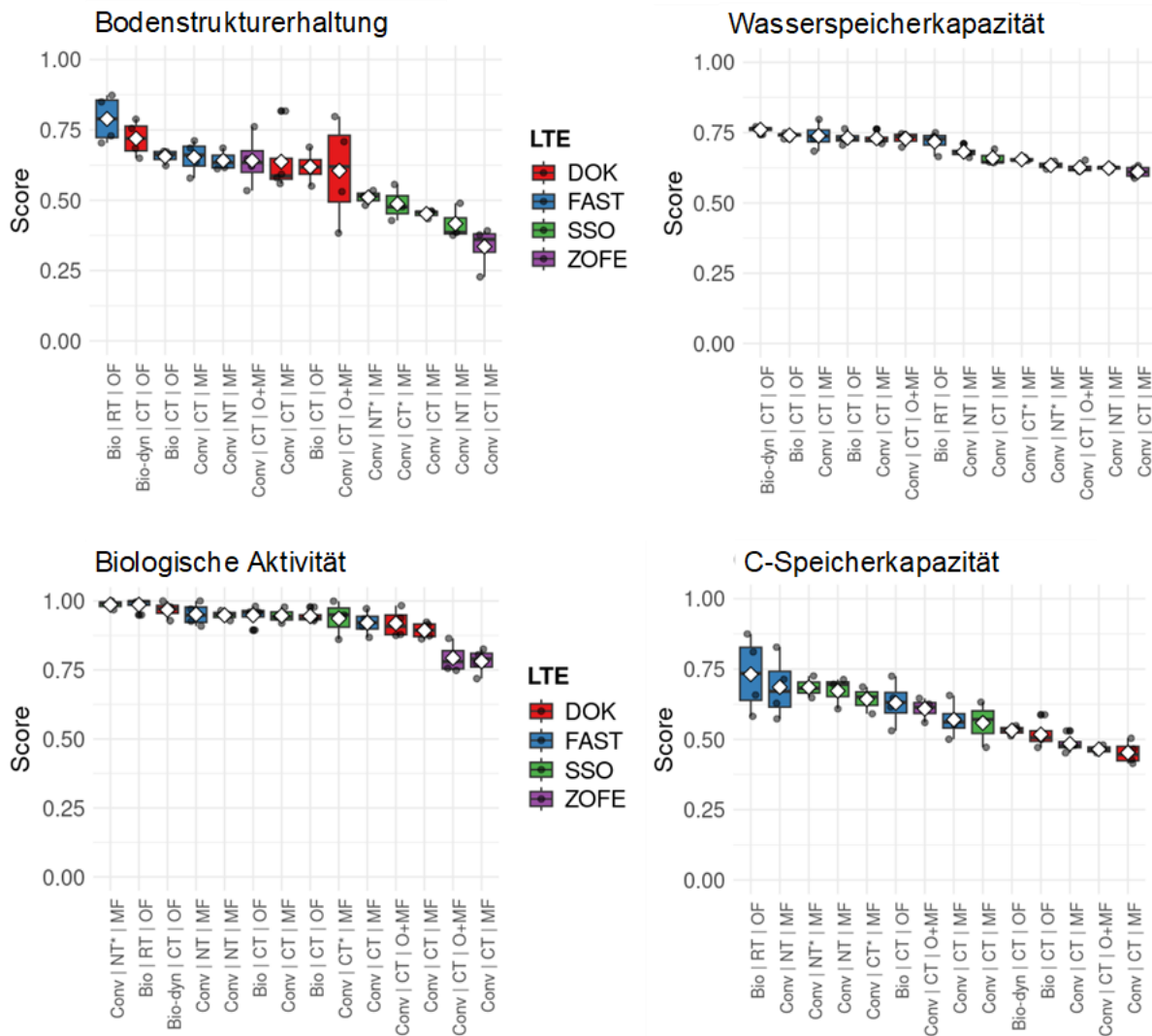


Abb. 10: Bodenfunktionsbewertungen (Scores) für die beprobten Bewirtschaftungsvarianten aus den Langzeitversuchen (LTEs) DOK, FAST, SSO und ZOFE, mit 3–4 Wiederholungen je Variante. 1 = Potenzial bzw. Optimum, < 0.5 weist auf ein erhöhtes Risiko hin. Die Varianten unterschieden sich teilweise hinsichtlich: System | Bodenbearbeitung | Düngerart, siehe y-Achse. Systemvergleich = konventionelle (Conv), biologische (Bio) oder biodynamische (Bio-dyn) Bewirtschaftung; Bearbeitungsintensität = konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug (Conventional tillage = CT), reduzierte Bodenbearbeitung (reduced tillage = RT), Direktsaat (no tillage = NT), wobei «*» ein einmaliges Verdichtungsereignis im SSO-Versuch vor 10 Jahren darstellt (CT* und NT*); Düngerart = rein mineralische Dünger (mineral fertilizer = MF), rein organische Dünger (organic fertilizer = OF) oder eine Mischung (O+MF).

Die Bodenfunktion C-Speicherkapazität zeigte teils kritische Erfüllungsgrade. Beispielsweise lagen die Bewirtschaftungsformen mit rein mineralischer Düngung im Grenzbereich unter 0.5 (Abb. 10). Die höchsten Erfüllungsgrade erreichten in diesem Datensatz die Varianten mit reduzierter Bodenbearbeitung. Bei der Nährstoffregulierungsfunktion lagen alle Bewirtschaftungsformen über 0.82 und zeigten somit sehr hohe Erfüllungsgrade, mit Ausnahme der rein mineralisch gedüngten Variante im ZOFE.

Die biologische Aktivitätsfunktion lag wie ihre darin aggregierte Indikatoren in einem hohen Bereich (0.74–0.99). Obwohl statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsformen erkennbar waren, waren diese nach der Aggregation nicht mehr erkennbar. Bei der Gesamtbetrachtung der Bodenfunktionen über alle Bewirtschaftungsformen zeigten sich nur wenige statistisch signifikante Unterschiede, mit Ausnahme extremer Varianten wie der rein mineralischen Düngung (Abb. 10). Insbesondere erwies sich die Funktion der Wasserspeicherkapazität im Vergleich der Langzeitversuche als wenig aussagekräftig und zeigte nur eine geringe Variabilität und somit Sensitivität gegenüber den Bewirtschaftungsformen.

Indirekte Bewirtschaftungsindikatoren

Die Analyse der Bewirtschaftungsindikatoren zeigte klare Assoziationen mit den gemessenen Indikatoren und den daraus abgeleiteten Bodenfunktionen. Beispielsweise korrelierte der C-Input stark positiv mit dem Verhältnis $C_{org}:Ton$ ($r = 0.72$) und negativ mit der effektiven LD ($r = -0.74$). Dadurch ergab sich eine positive Korrelation der C-Inputs mit den Bodenfunktionen Strukturerhaltung ($r = 0.70$), Wasserspeicherkapazität ($r = 0.75$) und Nährstoffregulierung ($r = 0.59$). Die Bodenbearbeitungsintensität (STIR) zeigte eine negative Korrelation mit der Basalatmung ($r = -0.58$) und der C-Speicherkapazität ($r = -0.74$), während der Bodenbedeckungsgrad keine signifikanten Korrelationen mit Indikatoren oder Bodenfunktionen aufwies.

Die Bewirtschaftungsindikatoren zeigten weitgehend die erwarteten Assoziationen und unterstreichen ihre Bedeutung als indirekte Indikatoren. Eine ganzheitliche Betrachtung erscheint jedoch notwendig, wie die Effekte der Bodenbearbeitungsintensität verdeutlichen. So konnte selbst bei hoher Intensität die Bodenstruktur, entgegen den Erwartungen, teilweise gut erhalten bleiben, wie beispielsweise in der biodynamischen Bewirtschaftung im DOK-Versuch. Dies zeigt, dass eine ganzheitliche Erfassung der Effekte und Unterschiede zwischen Indikatoren und Funktionen nur durch einen umfassenden Ansatz möglich ist.

Der Einbezug der relativen Erträge als Indikator für die Produktivität konnte wichtige Trade-offs zwischen verschiedenen Bodenfunktionen aufzeigen. Zum Beispiel wiesen die Produktivitätsfunktionen negative Korrelationen mit den Funktionen Strukturerhaltung ($r = -0.75$), biologische Aktivität ($r = -0.79$) und Nährstoffregulierung ($r = 0.65$) auf. Es ist jedoch anzumerken, dass die relativen Erträge allgemein sehr hoch waren (0.78–1.1), wodurch keine kritischen Trade-offs entstanden.

Neue Methoden und Indikatoren

Für die praktische Umsetzung der Bodenbeurteilung wären Messungen direkt auf dem Feld – beispielsweise *In-situ*-Messungen mittels Spektrometrie – eine erhebliche Vereinfachung (siehe Kapitel 2.3 «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen»). Die Modellierung auf Basis von vis-NIR zeigte Übereinstimmung mit den Labor-Messwerten für das Verhältnis $C_{org}:Ton$, mit geringeren Abweichungen als zwischen der nasschemischen Oxidation und der Verbrennungsmethode (Abb. 11). Zudem ermöglichte vis-NIR eine vergleichbare Einschätzung der Ziel- und Grenzwerte für das $C_{org}:Ton$ -Verhältnis. Die Beurteilung auf Basis von visNIR-Spektren für $C_{org}:Ton$ scheint somit eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Analysemethoden (siehe Diskussion in Kapitel 2.3).

Eine weitere *In-situ*-Methode wurde kürzlich von Digit Soil entwickelt (SEAR; Digit Soil, Zürich, Schweiz), welche die Enzymaktivität und somit den Umsatz von organischem Material im Boden direkt an Bodenproben messen kann. Diese Methode könnte die Funktion biologische Aktivität mit wichtigen Indikatoren verstärken. Die Ergebnisse dieser Studie sind jedoch noch nicht ausreichend robust. Mehrere Proben lagen unterhalb der Detektionsgrenze, was möglicherweise auf die lange Lagerung (≈ 6 Monate) bei $4^\circ C$ zurückzuführen ist. Von fünf gemessenen Enzymen konnten nur zwei statistisch beurteilt werden: β -Glucosidase (GLS) und Phosphatase (Phosphomonesterase [MUP]). Im Gegensatz zu den etablierten Indikatoren für biologische Aktivität, konnte weder GLS noch MUP signifikante Bewirtschaftungsunterschiede aufzeigen. GLS und MUP zeigten aber Assoziationen mit anderen Indikatoren; z. B. eine signifikant negative Korrelation mit der effektiven LD ($r = -0.43$ bzw. -0.48), sowie eine positive Korrelation mit der Luftkapazität ($r = 0.41$ – 0.42), was die erhobenen Daten plausibel macht.

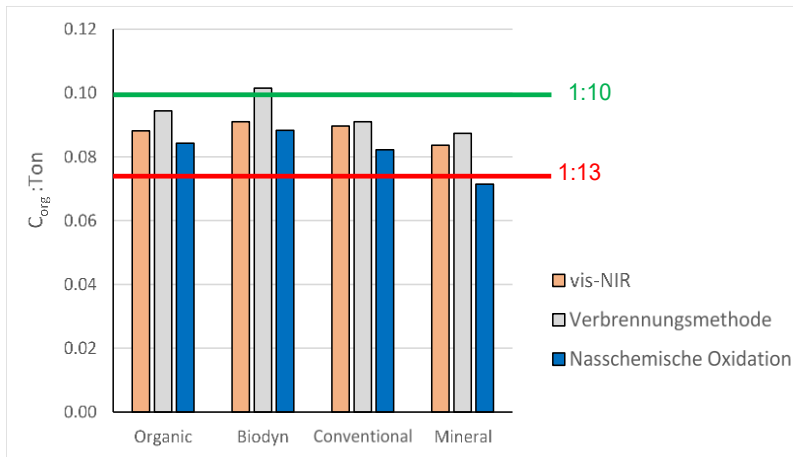


Abb. 11: Methodenvergleich für organischen Kohlenstoff (C_{org}) bzw. das Verhältnis C_{org} zu Ton im DOK-Versuch. Bei der Verbrennungsmethode wurde der Karbonat-C-Gehalt, der durch die Scheibler-Methode bestimmt wurde, abgezogen. Nasschemische Oxidation mit Kaliumdichromat; Modellierung anhand vis-NIR Spektren. Indikatorgrenzwerte nach Johannes et al. (2017) für C_{org} :Ton in grün: 1:10 (Score = 1) und rot: 1:13 (Score = 0.5).

2.4.4 Fazit

Referenzwerte für Bodenindikatoren

Die qualitative Bewertung des Bodenzustands mithilfe sensibler Indikatoren bildet die Basis für eine fundierte Beurteilung in der Bodenbewirtschaftung und die Identifikation möglicher Risiken. Referenzwerte für Bodenindikatoren ermöglichen es, den standortspezifischen Kontext zu verstehen und einzuschätzen, ob der Zustand im tolerierbaren, optimalen oder kritischen Bereich liegt. Dadurch wird eine Entscheidungsgrundlage für mögliche Handlungsoptionen geschaffen. Das Projekt «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» hatte daher das Ziel, verfügbare Referenzwerte zusammenzustellen und zu überprüfen. In der Literatur fanden sich vor allem Referenzwerte für physikalische und chemische Indikatoren, jedoch nur wenige Referenzwerte für biologische Indikatoren.

Proof of Concept Studie: Indikatoren und Bodenfunktionen

Das Set aus physikalischen, chemischen und biologischen Indikatoren und deren Aggregation zu Funktionen bietet einen Einblick in die Multifunktionalität der Böden. Am sensitivsten bzw. kritischsten zeigten sich die Indikatoren C_{org} , C_{org} :Ton und Luftkapazität. Eine Vereinfachung des Sets ist daher vorstellbar, da C_{org} :Ton zugleich für eine Einschätzung der Bodenstruktur sowie einen Richtwert für die Ausprägung der organischen Bodensubstanz bieten kann. In der Tat fanden wir signifikante positive Korrelationen von C_{org} :Ton mit den Bodenfunktionen Struktur-erhaltung ($r = 0.67$) und Wasserspeicherkapazität ($r = 0.48$), jedoch nicht mit der C-Speicherkapazität. Dies deutet darauf hin, dass das C_{org} :Ton-Verhältnis nicht die gesamte Aussagekraft zur Bewertung der C-Speicherkapazität besitzt, da auch der Schluffgehalt und die Art der Tonminerale das C-Speicherpotenzial beeinflussen (Six et al., 2002).

Die Indikator- und Funktionsbewertung auf den Langzeitversuchen spiegelten die erwarteten Effekte der Bewirtschaftung wider. Das Potenzial nachhaltiger «bodenschonender» Bewirtschaftungsmethoden ist erkennbar, wird jedoch bei allen Bewirtschaftungsvarianten noch nicht vollständig ausgeschöpft, da die Werte unter 1 auf ein Verbesserungspotenzial hinweisen. Die geringen Spannweiten der Wasserspeicherkapazität und biologischen Aktivität deuten auf eine geringe Sensitivität dieser Funktionen hin, könnten jedoch auch auf unzureichende Referenzwerte zurückzuführen sein. Insgesamt zeigten die Ergebnisse deutlich, dass mit unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen vergleichbare Erfüllungsgrade bei Bodenfunktionen erreicht werden können.

Weitere Entwicklungen und Potenzial für Indikatoren und Referenzwerte

Das Projekt «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» mit Indikatoren und Referenzwerten dient aktuell als Demonstrator für eine quantitative Bodenzustandsbeurteilung, die jedoch noch mit weiteren Praxisdaten validiert werden muss. Die Indikatoren zur Strukturqualität (v.a. C_{org} :Ton) mit bereits erprobten Referenzwerten zeigen ein hohes Potenzial zur Erfassung von Bewirtschaftungsunterschieden. Methodischen Vereinfachungen, insbesondere durch vis-NIR-Spektrometrie, werden die Nutzung quantitativer Bodenindikatoren in Zukunft erleichtern. Neue Tools, v. a. für biologische Indikatoren, wie die *In-situ*-Analyse der Enzymaktivität mit dem Soil

Enzyme Activity reader (SEAR; Digit Soil, Zürich, Schweiz) eröffnen vielversprechende Perspektiven für eine ganzheitliche Bodenbeurteilung. Sie müssen jedoch noch weiter auf ihre Praxistauglichkeit geprüft werden. Zudem bietet die Standardisierung molekulargenetischer Methoden zur Erfassung der Bodendiversität sowie die Erarbeitung von standorttypischen Referenzwerten für diese Verfahren ein grosses Potenzial zur Beurteilung der Habitatsfunktion von Böden.

Durch die Kombination aus Bodenfunktionsbewertung und Bewertung der Bodenbewirtschaftung erfolgt eine Gegenüberstellung von Zustand (*State*) und «Druck auf die Umwelt» (*Pressure*) entsprechend des DPSIR-Modells. Diese Gegenüberstellung ermöglicht einen Einblick in den aktuellen Bodenzustand und das mögliche Verbesserungspotenzial auf einer Skala von 0 bis 1. In Kombination mit einer Beurteilung der Bewirtschaftungsindikatoren lässt sich zudem einschätzen, welche möglichen Steuerungsgrössen in der Bewirtschaftung es auf dem Betrieb gibt. Für eine praktische Anwendung wäre die Einbindung von Feldkalender und anderen FMIS zur Berechnung der Bewirtschaftungsindikatoren hilfreich.

Die Skalierung von 0–1 ermöglicht eine direkte und zugängliche Beurteilung von Bodenfunktionen und dient damit der Risiko-Einschätzung im Rahmen von Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewertung. Die Bodenfunktionen lassen sich Umweltzielen Landwirtschaft gegenüberstellen und indizieren bei < 0.5 ein erhöhtes Risiko für eine spezifische Bodenfunktion. Die individuelle Bewertung der Bodenfunktionen ermöglicht eine unabhängige Beurteilung verschiedener Umweltziele. Kritische Überschreitungen bei Bodenfunktionen können aber auch die Produktivität beeinflussen, z. B. bei Bodenverdichtung.

2.5 Indikatoren Biodiversität

Autorinnen und Autoren: Maud Liégeois, Coralie Triquet, Yvonne Fabian, Philippe Jeanneret

2.5.1 Einleitung

Die Intensivierung der landwirtschaftlichen Praktiken in Europa in den letzten Jahrzehnten hat die Agrarökosysteme grundlegend verändert. Die Verarmung der Landschaft, der Verlust von naturnahen Lebensräumen und der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln haben zum Rückgang der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften beigetragen. Dieser Rückgang ist sehr besorgniserregend, weil er mit dem Verlust wichtiger Ökosystemdienstleistungen wie Bestäubung, Schädlingsregulierung oder Abbau organischer Stoffe einhergeht. In diesem Kontext wurde eine Vielzahl von Biodiversitätsindikatoren entwickelt, darunter Indikatoren für Lebensräume und Arten, mit denen der Zustand von Agrarökosystemen bewertet und tendenzielle Veränderungen der Biodiversität erkannt werden können. Die Artenvielfalt wird in vielfältiger Weise gemessen, von einfachen Artenzählungen bis hin zu komplexeren Messungen von Diversitätsindizes, wobei es manchmal zu widersprüchlichen Ergebnissen kommt. Für den dringend notwendigen Überblick zu diesem komplexen Bereich kann die Sichtung der vorhandenen Literatur einen wertvollen Beitrag leisten.

Das Hauptziel des Projekts «Indikatoren Biodiversität» besteht darin, einen solchen Überblick zu erstellen und eine Reihe von Indikatoren festzulegen, die eine quantitative Bewertung der Vielfalt (Lebensräume und Arten) auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebs bei Berücksichtigung der Bewirtschaftungspraktiken ermöglichen. Bisher erfolgten die Messungen der Vielfalt überwiegend auf der Ebene der Parzelle oder sogar der Landschaft. Ein grosser Teil der relevanten Entscheidungen (z. B. Direktzahlungen) wird jedoch auf Betriebsebene getroffen. Daher müssen Instrumente entwickelt werden, mit denen sich die Auswirkungen der Praktiken auf der Ebene eines Landwirtschaftsbetriebs abschätzen lassen und die von politischen Entscheidungsträgern genutzt werden können. Eine der grössten Herausforderungen besteht darin, die Anordnung der Parzellen des Betriebs in der Landschaft zu berücksichtigen. So könnte die biologische Vielfalt auf einem Landwirtschaftsbetrieb, dessen Parzellen landschaftlich verstreut liegen, durch die Praktiken benachbarter Betriebe oder benachbarter Lebensräume stark beeinflusst werden. Bisher gibt es keine Studien über die Auswirkungen landwirtschaftlicher Praktiken auf die Biodiversität, bei denen die landschaftliche Verteilung der Parzellen eines Betriebs berücksichtigt wurde.

2.5.2 Methoden

Das Projekt «Indikatoren Biodiversität» besteht aus vier miteinander verknüpften Arbeitspaketen. Die Arbeitspakete 1 und 2 basieren hauptsächlich auf der Zusammenfassung von bereits vorhandenem Wissen, während sich die Arbeitspakete 3 und 4 auf Daten stützten, die vor Ort gesammelt wurden.

Arbeitspaket 1: Wissensstand und Identifikation potenzieller Indikatoren

Auf der Grundlage vergangener Projekte und einer Literaturrecherche im Bereich Biodiversität und induzierte Ökosystemleistungen (z. B. Billeter *et al.*, 2008; Herzog *et al.*, 2017) haben wir eine Liste bestehender Indikatoren (z. B. für Lebensräume, Arten, landwirtschaftliche Praktiken) erstellt. Diese Bestandsaufnahme diente dazu, die verfügbaren Informationen in den interessierenden Bereichen zu sammeln und Lücken zu identifizieren. Ein weiterer Aspekt dieses Arbeitspakets war die Bestimmung von Messmethoden, mit denen diese Indikatoren auf der Ebene des Landwirtschaftsbetriebs bewertet bzw. angepasst werden können (z. B. Upscaling, Downscaling).

Arbeitspaket 2: Literaturübersicht (systematischer Überblick) über die Auswirkungen von landwirtschaftlichen Praktiken auf Gruppen von Indikatorarten

Für einen Überblick über das Wissen in diesem komplexen Bereich wurde die vorhandene Literatur zu den Auswirkungen landwirtschaftlicher Praktiken auf die Biodiversität mithilfe einer systematischen Karte gemäss den Richtlinien der *Collaboration for Environmental Evidence* (CEE) zusammengefasst. Bei dieser qualitativen Zusammenfassung wurde der Schwerpunkt auf Versuche gelegt, bei denen die Auswirkungen der wichtigsten landwirtschaftlichen Praktiken bei der Bewirtschaftung von Ackerkulturen und Grünland (in 10 Kategorien) auf 22 Gruppen von Indikatorarten für die biologische Vielfalt untersucht wurden, wobei der Schwerpunkt auf Monitoring- und Analysemethoden lag.

Arbeitspaket 3: Vielfalt der Agrarökosysteme

Beim Ziel, Indikatoren für die Vielfalt der Lebensräume auf Betriebsebene festzulegen, die wissenschaftlich zuverlässig, repräsentativ für die Realität vor Ort, gut verständlich und in der Praxis leicht anwendbar sind, stützten wir uns auf die Ergebnisse von Arbeitspaket 1. Wir arbeiteten bei der Auswahl von einem Dutzend relevanter Indikatoren für die Vielfalt der Lebensräume auf der Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe eng mit den Landwirtschaftsbetrieben und der landwirtschaftlichen Beratung des RISC-Projekts¹ zusammen. Unter Verwendung der geolokalisierten Daten von 46 Landwirtschaftsbetrieben im Kanton Waadt (ca. 1700 Parzellen) sowie von Geomatik- (QGIS) und Statistik-Software (R) berechneten wir diese Indikatoren für jeden Betrieb und für jedes Jahr (seit 2021). Jeder Landwirtschaftsbetrieb wurde anschliessend zu diesen Indikatoren und zu deren Entwicklung über die Zeit persönlich beraten.

Arbeitspaket 4: Biodiversität und Ökosystemleistungen

Die Bewertung der Biodiversität in den Agrarökosystemen (und der damit zusammenhängenden Ökosystemleistungen) ist aufgrund der Kosten und der Dauer der Messungen eine grosse Herausforderung. Ausserdem erschwert die grosse Vielfalt der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken solche Messungen zusätzlich. Für ein besseres Verständnis dieser komplexen Agrarökosysteme und als Fortsetzung der Arbeitspakete 1, 2 und 3 wurde im Jahr 2023 eine Feldkampagne auf 36 landwirtschaftlichen Parzellen im Waadtländer Gebiet des Schweizer Mittellands durchgeführt. Diese 36 Parzellen, die zu 9 der 46 zuvor untersuchten Betriebe gehörten, wurden nach einem geschichteten Design, abgestimmt auf unsere Forschungshypothesen (d. h. Betriebsebene, Patch Cohesion Index usw.), ausgewählt. Mithilfe verschiedener Probenahmemethoden sammelten wir Individuen verschiedener taxonomischer Gruppen, die als Bioindikatoren gelten, gemäss den Ergebnissen der in Arbeitspaket 2 erstellten Zusammenfassung. Wir konzentrierten uns auf Gefässpflanzen (primäre Ressourcen), Regenwürmer (Abbau organischer Stoffe und Bodenqualität) und Laufkäfer (Räuber und/oder Samenfresser und Regulierung von Schädlingen und bestimmten Unkräutern). Die Individuen dieser Indikatorengruppen wurde bis auf die Art bestimmt. Ausserdem widerspiegeln diese Artengruppen aufgrund der geringen Mobilität die Praktiken der Landwirtschaftsbetriebe.

¹ <https://www.prometerre.ch/prestations/projets-et-acquisitions-de-references/risc>

2.5.3 Hauptegebnisse

Arbeitspaket 1 und 2: Wissensstand und Literaturübersicht

In Arbeitspaket 1 wurden die 22 Gruppen von Indikatorarten und die 10 Gruppen von landwirtschaftlichen Praktiken gemäss der systematischen Karte (Triquet *et al.*, 2024) sowie die in Arbeitspaket 3 und 4 verwendeten Indikatoren zur Vielfalt der Lebensräume und Arten festgelegt. Im Rahmen der Literaturrecherche (Arbeitspaket 2) wurden 20 162 Publikationen erfasst, von denen 1208 nach Überprüfung des Volltextes ausgewertet wurden. Die Anzahl der veröffentlichten Studien stieg zwischen 1984 und 2022 exponentiell an. Bei den meisten Studien handelt es sich um Feldversuche. Die wichtigsten untersuchten landwirtschaftlichen Praktiken sind Düngung, Beweidung, Mahd, Bodenbearbeitung, Herbizideinsatz und biologische Landwirtschaft. Es wurden hauptsächlich Indikatorarten der Gruppen Flora, Laufkäfer, Spinnen, Vögel, Bienen und Regenwürmer zur Untersuchung der Auswirkungen herangezogen. Die zum Monitoring dieser Arten verwendeten Methoden haben sich seit den 1980er Jahren nicht wesentlich verändert. Neuere Technologien wie die Bestimmung über DNA-Sequenzen werden auch heute noch selten eingesetzt, meist erfolgt das Monitoring visuell (erfordert Expertenwissen) oder invasiv (destruktive Probenahme durch Fallen oder Fänge). Am häufigsten wird die Vielfalt über Abundanz, Artenreichtum, Shannon-Index, Gleichmässigkeit und Zusammensetzung der biologischen Gemeinschaften gemessen.

Bisher wurden nur wenige Studien (89 bzw. 7.4 % der in der Zusammenfassung berücksichtigten wissenschaftlichen Artikel) auf Betriebsebene durchgeführt. Der Hauptansatz besteht darin, alle Parzellen oder einen Teil der repräsentativen Parzellen des Betriebs zu untersuchen. Ausserdem erfordern die Methoden zur Bewertung dieser Biodiversitätsindikatoren auf Betriebsebene eine Skalierung (z. B. Upscaling, Downscaling), was erklären könnte, weshalb trotz eines praktischen und politischen Bedarfs so wenige solcher Studien bestehen (Klaus *et al.*, 2024).

Arbeitspaket 3 und 4: Biodiversität in Agrarökosystemen

Die Messungen der Biodiversitätsindikatoren auf der Ebene der Landwirtschaftsbetriebe haben gezeigt, dass es im Kanton Waadt über 130 verschiedene Bodennutzungen (z. B. Raps, Weizen, Wiesen, Hecken) gibt, dass diese Anzahl jedoch von Region zu Region sehr unterschiedlich ist (in den 14 geografischen Regionen des Kantons mindestens 29, maximal 103, Mittelwert 75). Aus diesem Grund haben wir auch einen Index für die Gleichmässigkeit erstellt (d. h. gewichtete Vielfalt der Habitate auf regionaler Ebene), der einen besseren Vergleich zwischen den Betrieben ermöglicht. Jeder Leiter bzw. jede Leiterin eines Landwirtschaftsbetriebs wird jährlich (seit 2022 und bis zum Ende des [RISC-Projekts](#) im Jahr 2029) persönlich im Hinblick auf eine Maximierung der Vielfalt der Agrarökosysteme auf seinem/ihrem Betrieb beraten. Ein diversifizierter Betrieb ist resilienter gegenüber verschiedenen Störfaktoren, darunter beispielsweise auch dem Klimawandel. Darüber hinaus werden im Rahmen des RISC-Projekts verschiedene Berichte (Start-, Zwischen- und Abschlussberichte) sowie Jahresberichte veröffentlicht.

In den ausgewählten Gruppen von Indikatorarten wurden 17 Regenwurm-, 66 Laufkäfer- und 146 Pflanzenarten gesammelt. Für das Gebiet der Schweiz sind in der Literatur rund 60 Regenwurm- und 521 Laufkäferarten beschrieben, was weit über den in landwirtschaftlichen Lebensräumen festgestellten Artenzahlen liegt. Allerdings sind die Gemeinschaften von Parzelle zu Parzelle und von Betrieb zu Betrieb sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Dies unterstreicht den grossen Einfluss landwirtschaftlicher Praktiken und/oder bestimmter Lebensräume auf die Biodiversität.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse tendenziell unsere Forschungshypothesen (Liegeois *et al.*, in Vorbereitung). Kurz zusammengefasst: Es besteht ein positiver Zusammenhang zwischen der Vielfalt der Lebensräume und den Arten, eine negative Korrelation zwischen der Intensität der landwirtschaftlichen Praktiken und der Artenvielfalt, und die Indikatoren für die Biodiversität auf der Ebene des Landwirtschaftsbetriebs werden durch die Anordnung der Parzellen in der Landschaft beeinflusst. Da die Daten für das Projekt «Indikatoren Biodiversität» jedoch nur bei vier Parzellen pro Betrieb bei insgesamt neun Landwirtschaftsbetrieben erhoben wurden, sind keine signifikante Aussagen zu den Hypothesen auf der Ebene der Landwirtschaftsbetriebe möglich. Auf der Ebene der Parzellen (n = 36) konnten die Hypothesen dagegen bestätigt werden (Liegeois *et al.*, in Vorbereitung).

2.5.4 Fazit

Im Rahmen des Projekts «Indikatoren Biodiversität» wurden verschiedene Forschungsfragen beantwortet, die zum Indicate-Programm gehören und mit den [Umweltzielen Landwirtschaft](#) (UZL) in Zusammenhang stehen:

Die Suche nach Indikatoren zur Bewertung und Verbesserung der Umweltauswirkungen von Landwirtschaftsbetrieben erfordert einen Überblick über die vorhandenen Indikatoren (Lebensräume, Arten, Praktiken). Die in Arbeitspaket 2 durchgeführte Literaturübersicht ergab, dass in der vorhandenen Literatur folgende Themen am häufigsten untersucht wurden: 1) Auswirkungen von biologischer Landwirtschaft, Düngung, Bodenbearbeitung, Beweidung und Mahd auf ein breites Spektrum von Indikatorartengruppen; 2) Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praktiken auf die Flora im Allgemeinen; 3) Auswirkungen agronomischer Arbeiten, welche die Bodenstruktur beeinflussen (z. B. Bodenbearbeitung, Düngung, Fruchtfolge, Umgang mit Ernterückständen), auf Regenwürmer; 4) Auswirkungen von Mahd und Beweidung von Grasland auf Schmetterlinge, Heuschrecken und Grillen; 5) Monitoring von Vögeln zur Bewertung der Wirksamkeit von Umweltmassnahmen in der Landwirtschaft auf Landschaftsebene. Diese Themen können somit Gegenstand zukünftiger quantitativer Überblicksarbeiten (z. B. Metaanalysen) sein.

Umgekehrt wurden in einigen Bereichen Lücken festgestellt, die weitere Forschung erfordern. Beispielsweise wurden die Auswirkungen landwirtschaftlicher Praktiken auf bestimmte Gruppen von Indikatorarten (Amphibien, Reptilien, Schnecken, Tausendfüsser und Hundertfüsser) nur wenig untersucht. Für Schlussfolgerungen zum Einfluss auf die Biodiversität wären daneben auch umfangreichere Daten zu den Auswirkungen von Anbaupraktiken zur Diversifizierung wie Zwischenfrüchte, Untersaat, Mischkulturen, Streifenanbau und Agroforstwirtschaft erforderlich.

Bisher wurden nur wenige Studien (89 bzw. 7.4 % der in der Zusammenfassung berücksichtigten wissenschaftlichen Artikel) auf Betriebsebene durchgeführt, obwohl diese Ebene für Bewirtschaftungsentscheidungen zentral ist. Ausserdem wird in keiner Studie die Verteilung der Parzellen des Betriebs in der Landschaft und damit der potenzielle Einfluss der Praktiken benachbarter Landwirtschaftsbetriebe auf die Biodiversität innerhalb des Betriebs berücksichtigt. Daher müssen zuverlässige Biodiversitätsindikatoren auf Betriebsebene gefunden werden, mit denen die Landwirtschaftsbetriebe und die landwirtschaftliche Beratung die Auswirkungen der Bewirtschaftungspraktiken auf die Biodiversität und die Umwelt bewerten können. Die Entwicklung dieser Indikatoren war der Schwerpunkt in den Arbeitspaketen 3 und 4, wobei namentlich die Landnutzung als Ganzes und insbesondere die im gesamten Betrieb vorhandenen halbnatürlichen Ökosysteme (z. B. Biodiversitätsförderflächen) berücksichtigt wurden. Dabei sollte nach effizienten Wegen gesucht werden, wie die räumliche Verteilung dieser Elemente (z. B. Patch Cohesion Index), ihre Häufigkeit und Abundanz (z. B. Vielfalt der Kulturen, Dauergrünland, Parzellengrössen) sowie ihre Bewirtschaftung (z. B. Anbaupraktiken) bewertet werden können.

Die wichtigsten Ergebnisse zeigen die Schwierigkeit, Indikatoren zusammenzustellen, die einerseits wissenschaftlich zuverlässig, für die Biodiversität relevant und repräsentativ, andererseits aber auch einfach und direkt in der Praxis anwendbar sind. Die meisten dieser Indikatoren erfordern ein hohes Mass an Fachwissen (z. B. Geomatik, Statistik, Ökologie) sowie beträchtliche Mittel (z. B. logistisch, finanziell). Andererseits sind sie leicht verständlich und wurden mit dem Ziel entwickelt, die Kluft zwischen Wissenschaft und Praxis zu verringern (z. B. Fabian *et al.*, 2019; Maas *et al.*, 2021). Auch andere Indikatoren wie NIVA (Bockstaller *et al.*, 2021) oder TAPE (Gilgen *et al.*, 2023b) sind für landwirtschaftliche Lebensräume relevant und sollten mit den Indikatoren von «Indikatoren Biodiversität» verglichen werden. Ausserdem wäre die Entwicklung vereinfachter Indikatoren (z. B. Obrist & Duelli, 2010) und der Aufbau eines Netzwerks für partizipative Wissenschaft wünschenswert.

Schliesslich könnten für beide Kategorien von Indikatoren (Habitate und Arten) Messtechniken genutzt werden, die auf Fernerkundung (Satellit, UVA) und/oder dem Einsatz von Drohnen basieren. Beispielsweise könnte die Kartierung der Flora mit Deep-Learning-Methoden (z. B. Gallmann *et al.*, 2022) ein interessanter Ansatz sein. Auch genetische Werkzeuge wie das DNA-Metabarcoding könnten im landwirtschaftlichen Umfeld verstärkt eingesetzt werden. Ausserdem könnten sich auch Umwelt-DNA-Analysen (z. B. Kestel *et al.*, 2022) als sehr effektives Instrument zur Messung der Biodiversität eines Lebensraums erweisen.

2.6 Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland

Autorinnen und Autoren: Valentin H. Klaus, Sergei Schaub, Pierrick Jan, Andreas Lüscher, Nadja El Benni, Olivier Huguenin-Elie

2.6.1 Einleitung

Die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz bestand 2023 zu 58 % aus Dauergrasland (BFS, 2024), und 58 % der Landwirtschaftsbetriebe wurden 2022 vom BFS als «Weideviehbetriebe» klassiert (Agristat, 2023; Weidevieh im Sinne von raufutterverzehrenden Nutztieren). Darüber hinaus ist Grasland auch wegen der vielen Ökosystemdienstleistungen (ÖSL) wichtig, die es potenziell für die Gesellschaft erbringen kann (Plantureux *et al.*, 2016; Richter *et al.*, 2024). Indikatorsysteme für eine umfassende Bewertung und Optimierung der ÖSL der graslandbasierten Produktionssysteme müssen daher in der Lage sein, diese zu quantifizieren. Eine umfassende Liste an Indikatoren für ÖSL im Grasland kann bei Richter *et al.* (2021) eingesehen werden. Jeder dieser Indikatoren muss jedoch im Feld gemessen werden, was für eine breite Anwendung einen viel zu hohen Arbeitsaufwand bedeutet. Daher ist es wichtig, Indikatoren zu definieren, die entweder über eine Vielzahl von ÖSL informieren oder die mit möglichst wenig Felderhebungen berechnet werden können.

Die Intensität der Bewirtschaftung hat einen grossen Einfluss auf die ÖSL des Graslandes (Schils *et al.* 2022; Richter *et al.* 2024). Auf der Ebene der Einzelparzelle wird das Maximum einer ÖSL bei einer gegebenen Bewirtschaftungsintensität erreicht. Allerdings unterscheidet sich die optimale Bewirtschaftungsintensität verschiedener ÖSL stark, was auf der Einzelparzelle zu Zielkonflikten führt. Deshalb ist es nicht möglich, gleichzeitig eine hohe Bereitstellung aller ÖSL auf der gleichen Parzelle zu erreichen (Huguenin-Elie *et al.*, 2018). Auf Betriebs- und Landschaftsebene bieten sich jedoch interessante Möglichkeiten, mehrere Ziele zu erreichen, indem komplementäre Gruppen von ÖSL durch die Kombination unterschiedlicher Graslandtypen (z. B. extensive vs. intensive Wiesen oder Weiden) angestrebt werden (Le Clec'h *et al.*, 2018; White *et al.*, 2019; Huber *et al.*, 2022). Während der Betrieb für die Optimierung der ÖSL entscheidend sein kann (Li *et al.*, 2017; Rocas-Díaz *et al.*, 2018), bietet die Organisation der Bewirtschaftung auf der Landschaftsebene weitere Optionen, um Effizienzgewinne in der Bereitstellung verschiedener ÖSL zu generieren (Klaus *et al.*, 2024a). Allerdings fehlt ein Indikatorsystem zur Bewertung der vielfältigen ÖSL von Landwirtschaftsbetrieben mit Dauergraslandflächen. Dies erfordert unter anderem das Hochskalieren (Upscaling) von ÖSL von Parzellenebene auf grössere räumliche Einheiten wie Betrieb oder Landschaft.

Vor diesem Hintergrund fokussierte sich dieses Projekt auf die Beantwortung der folgenden vier Fragen:

1. Welche Zielkonflikte gibt es auf Parzellenebene zwischen einzelnen ÖSL des Dauergraslands, und welche Parameter können als Indikatoren für die Gesamtheit dieser ÖSL (d. h. die Multifunktionalität) genutzt werden (Klaus *et al.*, 2024b)? Hierzu analysierten wir einen umfassenden Datensatz mit Feldmessungen von 30 ÖSL-Indikatoren (Richter *et al.*, 2024) mittels Hauptkomponenten- und Korrelationsanalyse.
2. Welche Anforderungen an die Datenverfügbarkeit stellen sich, um ÖSL möglichst genau für eine Region schätzen zu können (Klaus *et al.* 2024c)? Hierzu haben wir verschiedene Modelle zur Schätzung von ÖSL spezifiziert und deren Modellgüte analysiert. Mit diesem Vorgehen beurteilen wir das Potenzial dieser Modelle, die unter i) erwähnten und auf Feldmessungen basierten ÖSL-Indikatoren mit Indikatoren zu ersetzen, die auf öffentlich verfügbaren Datensätzen basieren.
3. Welche Optionen gibt es, die gemessenen ÖSL von der Parzellen- auf die Betriebsebene hochzuskalieren bzw. auf Landschaftsebene zu modellieren? Hierzu haben wir ein Konzept mit konkreten Vorschlägen ausgearbeitet (Klaus *et al.*, 2024d).
4. Welches Optimierungspotenzial gibt es für die Bereitstellung von ÖSL unter der Berücksichtigung von Stakeholder-Präferenzen (Schaub *et al.*, 2025)? Hierzu berücksichtigen wir, neben den Erwartungswerten für verschiedene ÖSL und einem aggregierten Multifunktionalitätsindex, auch das Risiko (d. h. Schwankungen in den Erwartungswerten von ÖSL und dem Multifunktionalitätsindex), die Zielkonflikte in der Bereitstellung verschiedener ÖSL, verschiedene Optimierungsebenen (nämlich Betriebs- und Landschaftsebene) und verschiedene gesetzliche Anforderungen an einen Mindestanteil von extensivem Grasland.

2.6.2 Methoden

Der Grossteil unserer Daten stammt aus dem Kanton Solothurn. In diesem Kanton ist die vorherrschende landwirtschaftliche Bodennutzung Dauergrasland, das etwa zwei Drittel der landwirtschaftlichen Fläche bedeckt (ohne Sommerungsweiden). Die Region ist vielfältig, sowohl in Bezug auf die Topografie als auch auf die Produktionssysteme (Le Clec'h *et al.*, 2019), sodass eine grosse Vielzahl an Graslandtypen vorhanden ist.

Wir verwenden den Ausdruck «extensives» und «intensives» Grasland wie folgt: «extensiv» bezieht sich auf ungedüngte Graslandflächen die als Biodiversitätsförderflächen (BFF) bewirtschaftet werden, während wir uns hier mit «intensiv» auf alle düngbaren und Nicht-BFF-Graslandflächen beziehen, ohne Berücksichtigung des Düngungsniveaus und ob die Parzelle intensiv, mittelintensiv oder wenig intensiv bewirtschaftet wird. Für die «intensive» Gruppe wird die Düngung nur auf Betriebsebene gemäss dem ökologischen Leistungsnachweis eingeschränkt (Direktzahlungsverordnung; DZV Art. 13) und kann deshalb von Parzelle zu Parzelle stark variieren. Durchschnittswerte der Nutzung (inkl. der Düngung) der hier untersuchten Parzellen können Richter *et al.* (2024) entnommen werden.

Frage 1

Zur Beantwortung von Frage 1 nutzten wir einen Datensatz von 88 Dauergraslandparzellen aus dem Kanton Solothurn (Richter *et al.*, 2024). Pro Parzelle wurden 30 ÖSL-Indikatoren auf dem Feld gemessen, deren positive und negative Beziehungen untereinander wir mittels Hauptkomponentenanalyse erfasst haben. Die 30 auf dem Feld gemessenen ÖSL-Indikatoren werden in Klaus *et al.* (2024b) gelistet. Zudem haben wir, basierend auf den ÖSL-Indikatoren der regulierenden, unterstützenden und kulturellen ÖSL, die Multifunktionalität (Nicht-Produktion-Multifunktionalität) der Graslandbestände berechnet und mittels Korrelationsanalyse einen Indikator für diese Multifunktionalität extrahiert.

Frage 2

Zur Beantwortung von Frage 2 haben wir, für fünf grundlegend unterschiedliche ÖSL und basierend auf dem unter 1 beschriebenen Datensatz, verschiedene Modelle für die Schätzung der ÖSL auf Ebene ganzer Betriebe oder Landschaften spezifiziert. Lineare Regressionsmodelle wurden schrittweise um zusätzliche Datenquellen zur Schätzung der ÖSL erweitert. Die Datenquellen reichten dabei von einfach verfügbaren Daten der Agrarstatistik über GIS-Daten bis hin zu erhobenen Messwerten auf Parzellenebene. Anhand der Modellgüte wurde analysiert, welche Kombinationen von Datenquellen geeignet sind, um ÖSL möglichst effizient auf Basis leicht verfügbarer Datensätze schätzen zu können.

Frage 3

Zur Beantwortung von Frage 3 haben wir gemeinsam mit dem Indicate-Projekt «Indikatoren Biodiversität» ein Konzept entwickelt, wie ÖSL, die auf einzelnen Parzellen gemessen oder modelliert wurden, auf die Ebene eines ganzen Betriebs oder einer ganzen Landschaft hochskaliert werden können (auch «Upscaling» genannt). Folgend den Eigenschaften der jeweiligen ÖSL und dem Zweck der Analyse haben wir verschiedene Ansätze und Empfehlungen für das Hochskalieren entwickelt.

Frage 4

Um Frage 4 zu beantworten, verwendeten wir das Konzept der Multifunktionalität. Multifunktionalität, beziehungsweise ein Multifunktionalitätsindex, kann verschiedene ÖSL und die Präferenzen der Stakeholder für verschiedene ÖSL berücksichtigen (Allan *et al.*, 2015; Linders *et al.*, 2021). Zudem erweiterten wir die Berechnung der Multifunktionalität zu einer risikoadjustierten Multifunktionalität unter Verwendung des Erwartungsnutzungsmodells (Chavas, 2004), um Unsicherheiten in der Erbringung von ÖSL darzustellen. In Anlehnung an die Wirtschaftsliteratur definieren wir das Risiko als jedes Ergebnis, das nicht mit Sicherheit im Voraus bekannt ist, über das jedoch einige Informationen über die Wahrscheinlichkeiten des Ergebnisses bekannt sind. Um die risikoadjustierte Multifunktionalität des Dauergraslandes zu berechnen und das diesbezügliche Optimierungspotenzial in der Landnutzung zu eruieren, erweiterten wir die oben beschriebenen Arbeiten 1 bis 3 wie folgt: Erstens verwendeten wir Stakeholder-Informationen aus einer Onlineumfrage (Klaus *et al.*, 2022; 364 auswertbare Antworten), um die durchschnittlich wahrgenommene Relevanz der ÖSL abzuschätzen. Zwei Drittel der Stakeholder, die den Fragebogen beantwortet haben, arbeiteten in der Landwirtschaft, 14 % im Bereich Umweltschutz, 10 % in beiden Bereichen und 10 % in

anderen Bereichen. Zweitens verwendeten wir räumliche Daten aus dem Jahr 2019, um die risikoadjustierte Multifunktionalität zu simulieren (Baseline Szenario; siehe 2). Drittens untersuchten wir, welche Landnutzung (d. h. Zuteilung der Parzellen zu einer extensiven bzw. intensiven Graslandnutzung) zu einer maximalen (risikoadjustierten) Multifunktionalität führt unter verschiedenen Anforderungen an den Mindestanteil von extensivem Grasland. Dabei wurde zwischen einer Optimierung auf der Betriebs- und Landschaftsebene unterschieden (Optimierungsszenarien), um das Potenzial einer ÖSL-Optimierung über die Betriebsebene hinaus abschätzen zu können.

2.6.3 Hauptergebnisse

Frage 1

Das Schweizer Dauergrasland ist ein hochgradig multifunktionales Ökosystem, das Viehfutter und viele regulierende und kulturelle ÖSL bietet (Richter *et al.*, 2024). Unsere Analysen ergaben zwei unterschiedliche Bündel von ÖSL-Indikatoren, die durch die Korrelationen der einzelnen ÖSL untereinander und dem Einfluss der Nutzungsintensität entstanden (Klaus *et al.*, 2024b). Das erste Bündel kann als «extensives Bündel» bezeichnet werden und bestand unter anderem aus ästhetischer Wertschätzung, der Vielfalt von Pilz- und Pflanzenarten und Indikatoren für geringe negative Umweltauswirkungen (z. B. verringertes Nährstoffauswaschungsrisiko) und geringe Futterproduktivität. Dieses Bündel stand in starkem negativem Zusammenhang mit dem zweiten Bündel, das als «intensives Bündel» bezeichnet werden kann und das unter anderem aus Indikatoren für Ertragsmenge, Futterqualität und Nährstoffversorgung bestand. ÖSL-Indikatoren bezüglich Erosionsschutz und Bodengesundheit standen jedoch nicht in Zusammenhang mit diesen zwei Bündeln und müssen deshalb separat eingeschätzt werden. Wir fanden zudem, dass, aufgrund seiner starken Korrelation ($R^2 = 0.62$), der Pflanzenartenreichtum ein möglicher (positiv korrelierter) Indikator für die ÖSL-Multifunktionalität des Graslands sein könnte (Abb. 12). Mit etwas geringerer Verlässlichkeit ($R^2 = 0.54$) könnte auch die Düngeintensität (kg Stickstoff pro Hektar pro Jahr) als (negativ korrelierter) Multifunktionalitätsindikator verwendet werden.

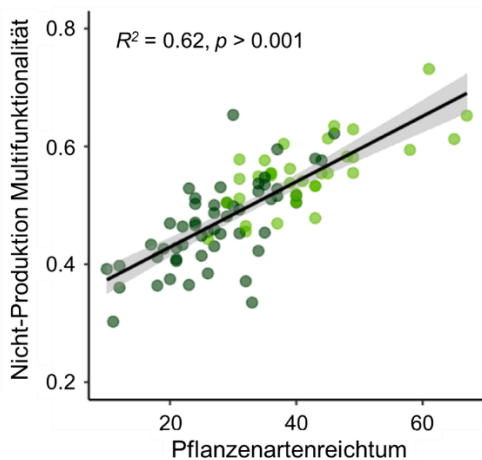


Abb. 12: Zusammenhang zwischen nicht produktiver Multifunktionalität und der Anzahl der Gefäßpflanzenarten auf der Graslandfläche.

Frage 2

Wir entwickelten schrittweise Regressionsmodelle zu fünf Grasland-ÖSL, sprich Futterqualität (Rohproteingehalt im ersten Schnitt), Bodenkohlenstoffvorrat, Anzahl der Gefäßpflanzenarten, Nektarangebot und ästhetischer Wert der Pflanzengemeinschaft. Diese Modelle beruhten auf (i) parzellenspezifischen Daten der Agrarstatistik (= die grobe vier Graslandkategorien extensive oder intensive Wiesen oder Weiden), (ii) topografischen Merkmalen, (iii) regionalen Bodeneignungskarten, (iv) Bodenmessdaten, (v) detaillierten Bewirtschaftungsdaten und (vi) Informationen zu Pflanzengemeinschaften (d. h. Klee- und Kräuteranteile). Die Modelle zeigten, dass der Datenbedarf und die Modellgüte stark von der betrachteten ÖSL abhängt. Drei der fünf ÖSL konnten nur schlecht ohne Daten aus Feldmessungen modelliert werden (Pflanzenvielfalt, Nektarangebot und Bodenkohlenstoffvorrat), während die Futterqualität bereits mit den groben Graslandkategorien gemäss Agrarstatistik recht gut geschätzt werden konnte. Für den ästhetischen Wert der Pflanzengemeinschaft zeigten die Modelle ohne Feldmessungen (Modelle 1 bis 3) eine Bestimmtheitsmass von fast 0.5, eine Felderhebung der Klee- und Kräuteranteile war jedoch notwendig, um die Bestimmtheitsmass auf 0.65 zu erhöhen. Generell waren die Graslandkategorien gemäss Agrarstatistik in fast allen Modellen von Bedeutung für die Schätzung der jeweiligen ÖSL, was die Wichtigkeit solcher Datenerhebungen für

die Analyse von ÖSL auf Landschaftsebene verdeutlicht. Andere Datenquellen, die häufig für die Modellgüte wichtig waren, waren topografische Daten und Bodenmessdaten. Detaillierte Angaben zur Bewirtschaftung (z. B. Düngungsintensität in kg Stickstoff pro ha) führten vergleichsweise selten zu Modellverbesserungen, da deren Bedeutung für die betrachteten ÖSL vermutlich schon durch die Daten der Agrarstatistik (Düngung verboten vs. erlaubt) abgedeckt wurden. Die Ergebnisse sind für den Bodenkohlenstoffvorrat detailliert in Tabelle 5 dargestellt. Für die anderen vier ÖSL werden die Bestimmtheitsmassen als Überblick in Tabelle 6 angegeben. Diese Ergebnisse zeigen, dass Agrarstatistik-Daten zwar bei der Bewertung bestimmter Dienstleistungen gut unterstützen können, dass aber Feldmessungen für eine genaue Bewertung der meisten Dienstleistungen weiterhin wichtig sind.

Tab. 5: Ergebnisse der schrittweisen linearen Regressionsmodellierung zur Bewertung der Kohlenstoffvorräte im Boden (als Beispiel). Das Modell wurde schrittweise um zusätzliche Datenquellen zur Schätzung der ÖSL erweitert (Modell 1 bezog die Datenquelle i ein, Modell 2 die Datenquellen i und ii, usw.), und die Entwicklung der Modellgüte wurde berechnet.

	Modellgüte	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	Modell 6
	Adj. R^2 , p	0.13 **	0.36 ***	0.38 ***	0.60 ***	0.60 ***	0.61, ***
	AICc	-593	-620	-622	-660	-660	-662
Datenquellen	Prädiktoren	Effekt, p					
i. Agrarstatistik-Daten	a) Mähwiese / Weide	↑ n.s.	–	–	–	–	–
	b) Düngung erlaubt ja/nein	↓ ***	↓ ***	↓ ***	↓ ***	↓ ***	↓ ***
	Interaktion a x b	*	–	–	–	–	–
ii. Topographie	Höhenlage (m ü.M.)		↑ **	↑ **	↑ ***	↑ ***	↑ ***
	Neigung (Grad)		↑ ***	↑ ***	↑ (.)	↑ (.)	↑ (.)
iii. Bodenkarten	Wasserdurchlässigkeit			↑ (.)	–	–	–
	Vernässung			–	–	–	–
iv. Bodenanalysen	Boden pH				↑ ***	↑ ***	↑ ***
	Tongehalt				↑ ***	↑ ***	↑ ***
v. Genauere Bewirtschaftungsdaten	Düngung (kg N _{verf} ha ⁻¹ a ⁻¹)					–	–
	Weidetage (GVE*Tag ha ⁻¹ a ⁻¹)					–	–
vi. Botanische Zusammensetzung	Kräuteranteil						↑ (.)
	Kleeanteil						–

Positive und negative Korrelationen wurden mit «↑» bzw. «↓» abgekürzt. Die Signifikanz wurde wie folgt angegeben: $p = *** < 0,001$; $** < 0,01$; $* < 0,05$; $(.) < 0,1$; n.s.: nicht signifikant. Ein «–» bedeutet, dass ein Prädiktor basierend auf AICc nicht ausgewählt wurde.

Tab. 6: Bestimmtheitsmasse der Modelle für die Futterqualität (Rohproteingehalt im ersten Schnitt), die Anzahl der Gefässpflanzenarten, das Nektarangebot und den ästhetischen Wert der Pflanzengemeinschaft. Wie in der Tab. 5, Modell 1 bezog die Datenquelle i ein, Modell 2 die Datenquellen i und ii, usw., bis zum Modell 6, das alle 6 Datensätze einbezog.

	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	Modell 6
Futterqualität (RP-Gehalt)	0.68	0.71	0.72	0.73	0.74	0.74
Pflanzenartenreichtum	0.41	0.45	0.47	0.50	0.58	0.68
Nektarangebot	0.09	0.12	0.14	0.14	0.15	0.46
Ästhetischer Wert	0.48	0.48	0.48	0.50	0.50	0.65

Frage 3

Wir schlagen verschiedene Optionen für die Hochskalierung von ÖSL von der Parzellen- auf die Betriebsebene vor und diskutieren deren Vor- und Nachteile (Klaus *et al.*, 2024d). Unsere Vorschläge setzen an dem Punkt an, an dem Daten für jede der Parzellen verfügbar sind. Bei einer solchen Hochskalierung muss die Beziehung zwischen der erbrachten ÖSL («Angebot») und dem letztendlichen Nutzen berücksichtigt werden. Die Angebots-Nutzen-Beziehung beschreibt, wie sich eine Veränderung des Angebots auf den daraus resultierenden Nutzen für Landwirtinnen und Landwirte sowie die Gesellschaft auswirkt. Da der Nutzen oft nicht kontinuierlich mit dem Angebot ansteigt, sondern durch Schwellenwerte im Angebot definiert sein kann, variiert die Form der Angebots-Nutzen-Beziehung zwischen verschiedenen ÖSL. Während einige ÖSL mit einem einfachen (flächengewichteten) Gesamt- oder Durchschnittswert hochskaliert werden können (z. B. Bodenkohlenstoffvorrat), sind bei anderen ÖSL-Schwellenwerte von grosser Bedeutung für die Wahl des besten Hochskalierungsansatzes. Bei der Hochskalierung muss beispielsweise oft ein Mindestwert berücksichtigt werden, der überschritten werden muss, damit eine ÖSL überhaupt einen Nutzen bringt (z. B. einen Mindestfutterqualität oder -menge).

Frage 4

Das Risiko in der Bereitstellung von Ökosystemleistungen reduziert deren erwarteten Nutzen. Das heisst, dass die risikoadjustierte Multifunktionalität gemäss unserer Berechnung um 12 % geringer ist als die Multifunktionalität ohne Betrachtung des Risikos in der untersuchten Modellregion (Solothurn). Die Optimierung der Landnutzung kann zu einer Erhöhung der risikoadjustierten Multifunktionalität von bis 3.9 % betragen. Eine Benchmarking-Analyse zeigt, dass dieser Wert (nämlich 3.9 %) im Vergleich zum Einfluss der jetzigen Landnutzung (*Status quo*) und einer zufälligen, hypothetischen Landnutzungszuordnung, eine ökonomisch relevante Grösse darstellt (mit einem Faktor von vier bis sechs). Des Weiteren zeigt unsere Analyse, dass ein Mindestanteil von extensivem Grasland auf Landschaftsebene zu einem höheren Mehrwert führt, als wenn der Mindestanteil auf Betriebsebene festgelegt wird. Dies resultiert aus einer besseren Nutzung von ortsspezifischen «Multifunktionalitätspotenzialen». Der hinsichtlich risikoadjustierter Multifunktionalität optimale Anteil von extensivem Grasland auf Landschaftsebene beträgt 48 % mit den betrachteten ÖSL und den für diese Studie ausgewählten Modelleinstellungen und Region. Unsere Sensitivitätsanalysen zeigen, dass dieser optimale Anteil wesentlich davon abhängt, wie die verschiedenen ÖSL bei der Berechnung der Multifunktionalität gewichtet werden.

Unser Projekt hat zudem beschrieben, wie die Einbeziehung aller beteiligten Interessengruppen und die Umsetzung von Massnahmen zur Verbesserung der ÖSL auf Ebene der Parzellen, der Betriebe und der Landschaft dazu beitragen können, Zielkonflikte zwischen ÖSL entgegenzuwirken (Klaus *et al.*, 2024a). Anhand von zusätzlich durchgeführten Literaturanalysen zeigten wir ausserdem auf, welche Faktoren für Landwirtinnen und Landwirte bei der Entscheidung, bei Agrarumweltmassnahmen teilzunehmen, besonders relevant sind (Schaub *et al.*, 2023; Sander *et al.*, 2024). Zwei der häufigsten positiven Faktoren für die Teilnahme an Agrarumweltmassnahmen waren die landwirtschaftliche Ausbildung und die Beratung, was darauf hindeutet, dass der Aufbau von Wissen über die ÖSL ein wesentlicher erster Schritt zur Förderung der ÖSL ist. Auch zeigten wir auf, wie die Entwicklung von Dünger- und Outputpreisen die Einführung von Produktionssystemen mit geringem Düngemittelbedarf beeinflussen kann (Schaub & El Benni, 2024). Des Weiteren zeigten wir in einer Übersichtsarbeit, welche Biodiversitätsindikatoren für ergebnisorientierte Agrarumweltprogramme vorgeschlagen und aktuell verwendet werden; sowie welche Potenziale es gibt, diese Programme weiterzuentwickeln (Elmiger *et al.*, 2023).

2.6.4 Fazit

Unser Projekt hat zu einem besseren Verständnis der ÖSL des Schweizer Dauergraslands auf verschiedenen Ebenen (Parzelle, Betrieb und Landschaft) beigetragen, und Möglichkeiten sowie Grenzen aufgezeigt, wie die ÖSL und die Multifunktionalität von Grasland vereinfacht erhoben bzw. abgeschätzt werden können. Unsere Ergebnisse unterstreichen die grosse Relevanz der Graslandbewirtschaftung für die ÖSL einer Parzelle. Unterschiede in der Bewirtschaftungsintensität, d. h. ob Grasland extensiv (BFF) oder intensiv bewirtschaftet wird, führen zu zwei klar abgegrenzten ÖSL-Bündeln (Klaus *et al.*, 2024b). Die ÖSL dieser beiden Bündel können aufgrund der mechanistischen Zielkonflikte nicht zugleich auf der Einzelparzelle erreicht werden. Zudem haben wir gezeigt, dass ÖSL und Multifunktionalität von der (räumlich-gerichteten) Platzierung der unterschiedlichen Graslandkategorien in heterogenen Landschaften abhängen (Schaub *et al.*, 2025).

Unsere Ergebnisse zeigen verschiedene Optionen auf, wie Anpassungen bei Agrar(umwelt)massnahmen die Bereitstellung von ÖSL und die Grasland-Multifunktionalität stärken können. Hier spielt insbesondere die räumliche Platzierung der Massnahmen in der Landschaft eine wichtige Rolle (Schaub *et al.*, 2025). Die politischen Anforderungen eines Mindestanteils an extensivem Grasland auf Landschafts- statt auf Betriebsebene würde zu Effizienzgewinnen im Sinne der Multifunktionalitätserhöhung führen. Dies, weil es die Nutzung günstiger Umweltproduktionsbedingungen über den Raum ermöglicht. Zudem haben wir aufgezeigt, wie komplex es ist, ÖSL, die auf einzelnen Parzellen gemessen wurden, (a) mittels Regressionsmodellen in grössere Räume zu extrapolieren (Klaus *et al.* 2024c) und (b) diese parzellenspezifischen ÖSL auf der Ebene eines gesamten Betriebes oder gar einer ganzen Landschaft hochzurechnen, so dass diese «Betriebs-ÖSL» mit den dazugehörigen Einflussfaktoren (z. B. Betriebsökonomie, Agrarpolitik) in Beziehung gesetzt werden können. Dieses stellt auch das Risiko in der Angebots-Nutzen-Beziehung dar (Schaub *et al.*, 2025).

Unsere Erkenntnisse können die Erhebung von ÖSL vereinfachen, denn aufgrund der starken Beziehungen zwischen einzelnen ÖSL müssen nicht zwingend alle einzelnen Leistungen separat erhoben werden (Klaus *et al.*, 2024b). Soll zudem die Nicht-Produktions-Multifunktionalität des Graslands ermittelt werden, so kann auch hier auf vereinfachte Indikatoren zurückgegriffen werden (z. B. Pflanzenartenzahl [positiver Zusammenhang] und Düngungsintensität [negativer Zusammenhang]) (Klaus *et al.*, 2024b). Diese Erkenntnisse können zukünftigen Agrarumweltmassnahmen dienen, welche einzelne ÖSL oder die Multifunktionalität fördern wollen, dazu aber von Abschätzungen dieser Leistungen auf grösseren räumlichen Skalen abhängen. Allerdings gibt es bei solchen möglichst einfachen Indikatoren auch immer eine nicht zu übersehende unerklärte Restvarianz sowie einzelne ÖSL, die nicht durch Bündel abgebildet oder erklärt werden können, oder die nur mit sehr grosser Ungenauigkeit modelliert werden können (Klaus *et al.*, 2024b; Klaus *et al.*, 2024c). Ob die Verwendung vereinfachter Indikatoren sinnvoll ist, muss daher im Hinblick auf die Ziele der beabsichtigten Studie oder auf die betrachteten Massnahmen sorgfältig abgewogen werden. Trotzdem kommen wir zum Schluss, dass die Hochskalierung von Indikatoren auf die Ebene der landwirtschaftlichen Betriebe ein interessantes Potenzial für die betriebliche Förderung von ÖSL und für die Ausgestaltung zukünftiger Agrarumweltmassnahmen birgt.

3 Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung

3.1 Mapping von Umweltindikatoren

Autorinnen und Autoren: Barbara Mejia, Andreas Roesch, Anina Gilgen, Thomas Nemecek

3.1.1 Einleitung

Wegen der immer stärkeren Sensibilisierung für Umweltfragen seit Beginn des 21. Jahrhunderts benötigen die politischen Entscheidungsträger zunehmend empirische Daten zu den Zusammenhängen zwischen landwirtschaftlichen Praktiken und Umweltauswirkungen, damit geeignete politische Massnahmen ausgearbeitet und bewertet und Fortschritte bei der Umsetzung der Ziele einer nachhaltigen Landwirtschaft gemessen und festgehalten werden können (Moxey *et al.*, 1998; Piore, 2003). Die Entwicklung von Agrarumweltindikatoren kam in den späteren 1990er Jahren als Forschungsgebiet auf, und die Zahl der entwickelten Indikatoren ist seither stetig gestiegen.

Es gibt verschiedene Ansätze und Methoden zur Bewertung der Umweltauswirkungen bzw. der ökologischen Nachhaltigkeit der Landwirtschaft (Bockstaller *et al.*, 2008; Soulé *et al.*, 2021). Agrarumweltindikatoren (AUI), Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) und die Bewertung von Ökosystemleistungen (Ecosystem Services Assessment, ESA) sind gängige Instrumente für die Entscheidungsfindung und die Politik im Zusammenhang mit Umweltfragen in der Landwirtschaft (z. B. Rega & Spaziante, 2013; de Souza *et al.*, 2018; Soulé *et al.*, 2021; Bergez *et al.*, 2022). Wegen der Komplexität dieser Fragen und der wachsenden Nachfrage nach systemorientierten und umfassenden Konzepten ergänzen sich die verschiedenen Ansätze. Trotz einiger Überschneidungen werden die Indikatoren in den meisten Fällen für spezifische Ziele oder spezifische Akteure entwickelt und die einzelnen Indikatoren lassen sich nur beschränkt auf andere Anwendungen übertragen. Die je nach wissenschaftlichen Disziplinen und Akteuren verschiedenen Anwendungen und die unterschiedlichen Auffassungen des Zwecks von Indikatoren machen es ausserdem schwierig, verschiedene Indikatoren in einem einzigen Indikatorensystem zusammenzubringen.

Der Schwerpunkt des Indicate-Programms lag auf der Ebene der Landwirtschaftsbetriebe, wo die endgültigen Entscheidungen über landwirtschaftliche Praktiken getroffen werden. Das Erheben der Daten, die Berechnung der Indikatoren und die Erstellung von Berichten sind jedoch zeit- und kostenintensiv. Im Rahmen des Agroscope-Forschungsprogramms Indicate wurden verschiedene Indikatoren entwickelt, mit denen die ökologische Nachhaltigkeit auf der Ebene des Landwirtschaftsbetriebs oder der Parzelle mit unterschiedlichen Ansätzen bewertet werden kann. Im Kapitel 3.1 wird ein Überblick über das Indikatorensystem auf Programm-Ebene gegeben. Durch verschiedene Perspektiven soll ein besseres Verständnis des Beitrags von Indicate vermittelt werden.

Damit werden die Indikatorensätze der Forschungsprojekte des Programms Indicate unter verschiedenen Gesichtspunkten zusammengefasst und strukturiert. Dies erfolgt mit folgenden Zielen:

- 1) Strukturierung von Indikatoren innerhalb eines konzeptionellen Systems und über Disziplinen hinweg
- 2) Ermittlung von Zusammenhängen, Ähnlichkeiten und Komplementaritäten zwischen den Indikatoren bei der Bewertung der Auswirkungen von Agrarumweltmassnahmen
- 3) Ermittlung von Lücken bei den Indikatoren der Indicate-Projekte und Aufzeigen des Forschungsbedarfs.

3.1.2 Terminologie der Indikatoren

Selbst nach langjähriger Entwicklung und Verwendung von Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft ist die Terminologie der Indikatoren nach wie vor nicht eindeutig und sorgt in den verschiedenen Disziplinen oft für Verwirrung (de Olde *et al.*, 2017a, 2017b; Soulé *et al.*, 2021). So wird der Begriff «Indikator» oft austauschbar mit anderen Begriffen wie «Variable», «Parameter», «Proxy», «Index» oder «Wert» (Moxey *et al.*, 1998) verwendet, obwohl diese Begriffe unterschiedliche Bedeutungen haben. Wir verwenden hier die folgenden Definitionen:

Variablen legen einen Modellzustand fest, wobei ihr Wert je nach den verschiedenen Themen, Bedingungen und Kriterien variiert (Bevans, 2022, Kaur, 2013; Zangiabadi, 2021). Die Betriebe einer Stichprobe unterscheiden sich

beispielsweise in Bezug auf die landwirtschaftliche Fläche, die Anzahl der Grossvieheinheiten oder das Einkommen. In diesem Zusammenhang handelt es sich bei diesen Werten um Variablen, da sie sich von einem Betrieb zum anderen unterscheiden.

Parameter stellen im Allgemeinen die Verbindung zwischen mehreren Variablen her (Altman & Bland, 1999). Parameter beziehen sich nicht auf tatsächliche Messungen oder Eigenschaften, sondern entsprechen Grössen, die ein (theoretisches) Modell festlegen. Sie sind im Allgemeinen für eine bestimmte Situation konstant, können aber zur Anpassung des Verhaltens eines Modells verändert werden. Zum Beispiel kann ein Regressionsmodell so angepasst werden, dass es die Beziehung zwischen zwei Eigenschaften – beispielsweise Grösse und Gewicht – optimal beschreibt, wobei in diesem Fall die Steigung und der Achsenabschnitt der Regressionsgeraden den Parametern des Modells entsprechen. Die Parameter widerspiegeln nicht genau die einzelnen Personen, können aber verwendet werden, um das Gewicht einer Person anhand ihrer Grösse vorherzusagen. In manchen Kontexten sind Parameter Werte, die verändert werden können, um die Leistung eines Systems zu untersuchen oder zu optimieren (Parametrisierung).

Indikatoren liefern vereinfachte Informationen (Erkenntnisse) über ein komplexes Phänomen, die Entscheidungsprozesse unterstützen. Ein Indikator ist an sich ein Kommunikationsinstrument und hat daher einen vordefinierten Zweck und richtet sich an eine bestimmte Zielgruppe. Damit ist, was ein Indikator misst, ebenso wichtig wie die Art und Weise, wie er berechnet und kommuniziert wird und zu welchem Zweck (Bockstaller *et al.*, 1997; Moxey *et al.*, 1998; Rees *et al.*, 2008; Bockstaller *et al.*, 2015; Latruffe *et al.*, 2016; de Olde *et al.*, 2017a; Roesch *et al.* 2017, 2021, 2023).

Messgrösse: In diesem Kapitel wird Messgrösse als neutraler Begriff verwendet, wenn unklar ist, ob ein Wert oder eine Messung als Indikator zu betrachten ist.

3.1.3 Methoden

Die Zusammenstellung der Indikatoren erfolgte in drei Hauptschritten:

- 1) Indikatoren nach mehreren Dimensionen kategorisieren und strukturieren
- 2) Beziehungen zwischen den Indikatoren untersuchen («Mapping»)
- 3) Beziehungen zwischen den Dimensionen für ein besseres Verständnis des Indikatorensystems und der Landschaft von Indicate untersuchen

3.1.3.1 Indikator-Kategorisierung

Wir haben die Indikatoren in 8 Dimensionen und 64 Kategorien eingeteilt (siehe Tab. A1) und folgende Fragen untersucht:

Frage 1: Was misst der Indikator? (D1, D2)²

Frage 2: Wie misst der Indikator? (D3)

Frage 3: Welchem Zweck dient der Indikator? Wer ist die Zielgruppe? (D2, D3, D6)

Frage 4: Welchen Bereich der (zeitlichen, räumlichen) Skala deckt der Indikator ab? (D4, D5)

Die Dimensionen und Kategorien wurden in einem iterativen Prozess festgelegt, bei dem wir nach dem idealen Gleichgewicht zwischen dem Streben nach einer umfassenden Bewertung und der Begrenzung der Komplexität der Analyse suchten und gleichzeitig Redundanzen so weit wie möglich vermieden. Nachfolgend geben wir einen kurzen Überblick über die Kategorisierung (weitere Einzelheiten sind in Anhang A1 zu finden).

Dimension 1 (D1) – Agrarumweltthemen und -fragen

Wir legten die Kategorien auf zwei Ebenen fest: nach Agrarumweltthemen (D1a) und Agrarumweltfragen (D1b). Sie betreffen gesellschaftliche Problembereiche im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Praktiken und deren (positiven und negativen) Umweltauswirkungen.

Die Umweltziele Landwirtschaft (UZL) (BAFU & BLW, 2008, 2016) waren der Ausgangspunkt für die Festlegung dieser Kategorien. Da politische Ziele und Vorgaben jedoch das Ergebnis eines Kompromisses zwischen konkurrierenden Interessen sind, können bestimmte Themen über- oder unterrepräsentiert sein. So werden beispielsweise

² D1 bis D6 beziehen sich auf die nachstehend bzw. in Anhang A1 beschriebenen Dimensionen.

Fragen im Zusammenhang mit der Erschöpfung von Ressourcen, wie beispielsweise Wasser, in den UZL nicht berücksichtigt. Ausserdem können sich Ziele und Vorgaben im Laufe der Zeit ändern, ebenso wie sich die politische Landschaft verändert. Daher haben wir die UZL-Kategorien um weitere Problembereiche ergänzt, die zu einem vollständigeren Bild der potenziellen Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praktiken beitragen (weitere Einzelheiten unter Tab. A1 und Tab. A7).

D2 – Ursache-Wirkungs-Kette

Für die Beschreibung der Rolle eines Indikators in einer Ursache-Wirkungs-Kette stützten wir uns auf das DPSIR-Modell (Driver-Pressure-State-Impact-Response, EEA, 1999), das über eine Systemperspektive die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen menschlichen Aktivitäten und Umweltbelastungen darstellt (siehe Tab. A2, A8 und Abb. 13). Ursprünglich war das Modell für Anwendungen auf Sektorebene oder nationaler Ebene zur Unterstützung politischer Entscheidungen und als Monitoring-Instrument vorgesehen, aber es wurde auch auf die Betriebsebene angewendet, etwa im Rahmen des Monitorings des Agrarumweltsystems Schweiz (Gilgen *et al.*, 2023a).

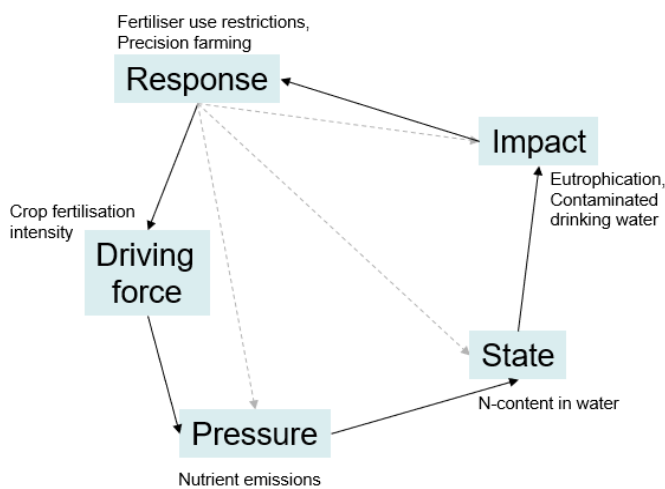


Abb. 13: Das von der EEA (1999) übernommene DPSIR-Modell.

In diesem Beispiel wird der intensive Einsatz von Pflanzendüngern (Driver) als Ausgangspunkt betrachtet, der zu übermässigen Nährstoffemissionen führt (Pressure). Die Nährstoffauswaschung führt unter anderem zu einem Anstieg der Stickstoffkonzentration (State) in Gewässern wie Seen, was wiederum zu Eutrophierung oder kontaminiertem Trinkwasser führen kann (Impact). Um diese Auswirkungen abzuwachen (Response), führt die Regierung z. B. Beschränkungen des Düngemitelesatzes ein, die Landwirtschaftsbetriebe wenden Methoden der Präzisionslandwirtschaft an usw.

D3 – Zielpublikum

Dimension 3 bezieht sich auf die Zielgruppe(n) der Indikatoren, namentlich Landwirtinnen und Landwirte, politische Entscheidungsträgerinnen und -träger und/oder Forschende (Tab. A3). Die Zielgruppe sollte in der Lage sein, einen bestimmten Indikator zu interpretieren und auf der Grundlage der von diesem Indikator gelieferten Informationen (mit minimaler Unterstützung durch Expertinnen und Experten) zu handeln, sie berechnet die Indikatoren aber nicht unbedingt selbst. Diese Kategorisierung ermöglicht es uns, verschiedene Arten von Indikatoren darzustellen und Indikatoren mit mehreren Anwendungen zu identifizieren, wobei die Komplexität eines Indikators (und damit die Anwendungsmöglichkeit in einem praktischen Umfeld) berücksichtigt wird.

D4 – Räumliche Skala

Wir unterscheiden zwischen den räumlichen Ebenen Parzelle/Feld, Kultur, Herde, Betrieb, Region/Landschaft, nationale, sub-/kontinentale und globale Ebene (Tab. A4).

D5 – Zeitliche Skala

Wir unterscheiden die zeitlichen Ebenen kurzfristige (< 5 Jahre), mittelfristige (5–25 Jahre) und langfristige (> 25 Jahre) Ebene (Tab. A5).

D6 – Rahmen für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit

Dimension 6 beschreibt den Rahmen für die Umweltbewertung eines Indikatorensets bzw. des entsprechenden Projekts. Auf diese Weise können wir Bereiche mit potenziellen Synergien und Komplementaritäten zwischen verschiedenen Forschungsdisziplinen und der jeweiligen Konzepte zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit aufzeigen (Tab. A6). Wir können die Indikatoren der verschiedenen Projekte in Beziehung zu bestehenden Systemen

der Umweltüberwachung und Umweltverträglichkeitsbewertung setzen. Hier werden Agrarumweltindikatoren, Ökobilanz, Bewertung von Ökosystemleistungen und Betriebsführungsindikatoren berücksichtigt.

3.1.3.2 Mapping der Indikatoren

Auf der Grundlage der Indikatoren-Kategorisierung (siehe Kapitel 3.1.3.1) bestand das Mapping des Indikatorensystems darin, die Beziehungen zwischen Indikatoren paarweise zu untersuchen und sie in eine Systemebene zu integrieren.

Mapping von Indikator-Paaren

Im Rahmen des ersten Mappings bewerteten wir die Ähnlichkeit von Indikator-Paaren. Die Ähnlichkeit entsprach dabei der Anzahl gemeinsamer Kategorien von zwei gegebenen Indikatoren, geteilt durch die maximale Anzahl der Kategorien jeder Dimension, aggregiert zu einem einzigen Wert.

Mapping des Indikatorsystems

Auf der Grundlage des Mappings von Indikator-Paaren konstruierten wir ein System von Indikatoren, bei dem jeder Indikator mit jedem anderen Indikator auf der Grundlage von Ähnlichkeiten (d. h. gemeinsamer Eigenschaften oder Kategorien) verbunden ist. Wir verwendeten statistische Methoden zur Erstellung objektiver und umfassender Analysen und zur Identifizierung von Indikator-Clustern. Dadurch konnten wir Ähnlichkeiten zwischen den Projekten einerseits und zwischen den verschiedenen Dimensionen andererseits aufzeigen.

Schritt 1: Aufbau des Indikatorennetzes

Aufbauend auf der Kategorisierung der Indikatoren legten wir unser Indikatorensystem als Netzwerk fest, in dem jedes Element (Knoten) einen Indikator darstellt, und jede Verbindung (d. h. Kante oder Beziehung) die Ähnlichkeit zwischen zwei bestimmten Indikatoren repräsentiert. Wir betrachteten jede Dimension und Kategorie als gleich wichtig (d. h. ohne Gewichtung) und verwendeten für die Verbindungsstärke zwischen zwei Indikatoren den Durchschnitt über alle Dimensionen.

Schritt 2: Indikatoren-Clustering

Als Cluster gilt eine Gruppe von Knoten mit einer hohen Dichte an internen Verbindungen und wenigen externen Verbindungen. In unserem Zusammenhang weisen Indikatorengruppen einen hohen Grad an Ähnlichkeiten zwischen den Indikatoren auf (d. h. gemeinsame Kategorien) und haben nur wenige Ähnlichkeiten mit Indikatoren ausserhalb der Gruppe.

Für die Analyse des Indikatorensystems verwendeten wir den folgenden Clustering-Ansatz: Zunächst wendeten wir den *Walktrap*-Algorithmus (Pons & Latapy, 2005) an, der das Netzwerk in immer kleinere Gruppen zerlegt, indem er Bereiche mit einer hohen Verbindungsdichte identifiziert, bis er 1er-Subgruppen erreicht. Zweitens berechneten wir zur Bestimmung des optimalen Schwellenwerts für das Clustering bei jeder Teilgruppe die *Modularität*, welche die Stärke des Zusammenhalts eines Netzwerks im Vergleich zu zufällig definierten Gruppen quantifiziert. Eine hohe Modularität deutet auf eine gute Gemeinschaftsstruktur hin, d. h. die Knoten innerhalb dieser Gemeinschaft (d. h. Knoten mit gemeinsamen Eigenschaften) sind dichter miteinander vernetzt als mit Knoten in anderen Clustern (d. h. unterschiedliche Gruppen mit minimaler Überschneidung). Die Analyse des Netzwerks und die Erstellung der Grafiken erfolgte mit der Programmbibliothek *igraph*³ der Python-Software (Csardi & Nepusz, 2006).

Mapping der Indikatoren-Landschaft

Das Mapping der Indikatoren-Landschaft, bei dem die Beziehungen zwischen Dimensionen (nicht zwischen Indikatoren) untersucht wird, stützt sich ebenfalls auf die Kategorisierung der Indikatoren. In erster Linie konnten wir damit die mithilfe von Vektor- und Matrixoperationen berechnete Abdeckung durch die Indikatoren – d. h. gemeinsame Kategorien über die Dimensionen hinweg – auf Programm- und Projektebene bewerten⁴.

Bei der Analyse wurden die sechs in Kapitel 2 beschriebenen Indicate-Projekte sowie zwei übergreifende Monitoring- und Bewertungssysteme berücksichtigt, nämlich die Agrarumweltindikatoren aus dem Projekt «Indikatoren für das

³ <https://github.com/igraph/python-igraph>

⁴ Genauer gesagt: Für jeden Indikator betrachten wir zwei Dimensionen als Vektoren, transponieren einen der beiden Vektoren und multiplizieren die Vektoren dann. Dieser Vorgang wurde für jeden Indikator über die Dimensionen durchgeführt und dann wurde über alle Indikatoren summiert.

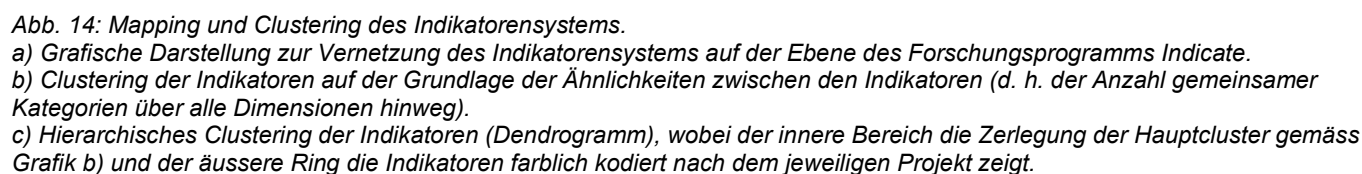
Agrarumweltmonitoring» und die Ökobilanzierung aus dem Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» (Tab. A6).

3.1.4 Ergebnisse: Mapping und Clustering des Indikatorensystems

Die grafische Darstellung des Indikatorensystems von Indicate (Abb. 14a, System-Mapping) zeigt die gegenseitigen Beziehungen der Indikatoren. Je näher die Knoten sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie zu einer Gruppe gehören. Je grösser die Knoten sind, desto mehr Kategorien deckt ein bestimmter Indikator über alle Dimensionen hinweg ab, und je kräftiger der Farbton, desto höher ist seine Ähnlichkeit insgesamt. Auf diese Weise können wir Indikatoren ermitteln, die vielfältige Informationen zu Agrarumweltfragen und zu verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen liefern, aber auch feststellen, ob eine Messgrösse bei verschiedenen Arten von Bewertungen und Methoden für Inputdaten als Proxy-Indikator oder als eigenständiger Indikator einfließt. So liefert beispielsweise der organische Kohlenstoff im Boden (SOC) nicht nur Informationen über die physikalische, chemische und biologische Qualität des Bodens, sondern kann auch als Proxy-Indikator für viele Ökosystemfunktionen verwendet werden, einschliesslich der Kapazität des Bodens zur Kohlenstoffaufnahme und Wasserspeicherung und damit der Fähigkeit des Bodens, Ökosystemleistungen zu erbringen, einschliesslich der Abschwächung des Klimawandels (durch Kohlenstoffspeicherung) und Hochwasserschutz. Im Allgemeinen sind die Indikatoren für die Bodenqualität vielfältig mit anderen Agrarumweltkomponenten und -fragen verknüpft (dichter Bereich in der Mitte), z. B. mit den Auswirkungen einer schlechten Bodenstruktur (Verdichtung, Erosion) und ihrer Rolle beim Transport von Schadstoffen in Trinkwasserquellen und in Süsswasserökosysteme.

Es lassen sich vier Hauptgruppen von Indikatoren unterscheiden (Abb. 14b). Aus dem Dendrogramm in Abb. 14c lassen sich detailliertere Informationen zu den Gruppierungen entnehmen. Innerhalb des Rings ist das hierarchische Clustering der Indikatoren dargestellt, wobei die Zweige verschiedenen Clustern entsprechen und die Zweige umso länger sind, je mehr sich die betroffenen Knoten unterscheiden. Die Farben Grün, Blau, Rot und Rosa entsprechen den vier Hauptclustern in Abbildung 14b. Ausserhalb des Rings, ganz am Ende der Zweige, sind die Indikatoren aufgelistet. Die Farbkodierung entspricht den verschiedenen Projekten (bzw. dem Indikatorenset), zu denen sie gehören. Indikatoren, die zu einem gemeinsamen Zweig zusammengefasst sind, weisen mehr Ähnlichkeiten auf.

Das Zielpublikum (und damit der Zweck und die Komplexität des Indikators) scheint eine wichtige Rolle bei der Clusterbildung zu spielen. So sind beispielsweise Indikatoren von «Nährstoffmanagement Hofdünger» und «Indikatoren Biodiversität» in der Regel im selben Cluster zusammengefasst. Obwohl die entsprechenden Indikatoren unterschiedliche thematische Schwerpunkte haben (Futtermittelplanung bzw. Biodiversität), wurden sie in erster Linie für Landwirtschaftsbetriebe entwickelt. Die SALCA-LCIA-Indikatoren (Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung») wiederum stehen isolierter. So gehören diese Indikatoren zu einem Set, das im Hinblick auf die Darstellung verschiedener Arten von Auswirkungen in höheren zeitlichen und räumlichen Ebenen unter Verwendung komplexer Methoden wie die Ökobilanzierung zusammengestellt wurde. Interessanterweise erscheinen die Indikatoren N-Bilanz und P-Bilanz in unterschiedlichen Clustern, je nachdem, ob sie mit der OECD-Methode oder mit der Suisse-Bilanz-Methode berechnet werden, obwohl es sich in beiden Fällen um Nährstoffbilanzen handelt. Die im Projekt «Nährstoffflüsse abbilden» beschriebenen Unterschiede der Methoden ergeben sich aus der Ausrichtung auf verschiedene Gruppen von Akteuren. Umgekehrt sind die Indikatoren von «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» oft zusammengefasst. Auch wenn ähnliche Indikatoren mit unterschiedlichen Ansätzen berechnet werden, scheinen sie ähnliche Informationen zu liefern, was zeigt, wie sich diese beiden Projekte ergänzen. Ausserdem erscheinen Indikatoren aus den Projekten «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» aufgrund der engen Wechselwirkungen zwischen Grünland, Beweidung und Bodenqualität häufig nahe nebeneinander.



3.1.5 Ergebnisse: Mapping der Indikatoren-Landschaft

3.1.5.1 Thematische Indikatorabdeckung

Der thematische Schwerpunkt des gesamten Indikatorensystems liegt hauptsächlich auf bodenbezogenen Fragen und der biologischen Vielfalt in landwirtschaftlichen Betrieben, mit einer stärkeren Berücksichtigung von State-Indikatoren als von Impact-Indikatoren (Abb. 15). Da diese beiden Bereiche jedoch mit anderen Komponenten und Fragen, insbesondere mit Wasser, zusammenhängen, ist es wichtig zu verstehen, welche Rolle die landwirtschaftlichen Praktiken spielen, und wie diesen Problemen mit der Bewirtschaftung entgegengewirkt werden kann. Das Programm Indicate gewährt Einsichten in Driver- und Pressure-Mechanismen, die sowohl für die Bodenqualität relevant sind als auch Vorläufer anderer Umweltprobleme darstellen.

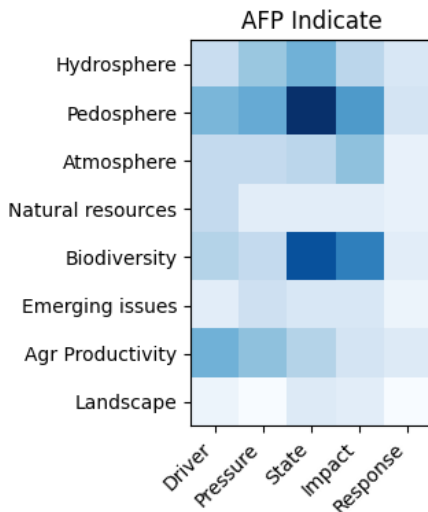


Abb. 15: Indikatorabdeckung auf Programmebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1a) und Ursache-Wirkungs-Kette (DPSIR, D3).

Auf einer feineren Analyseebene (Abb. 16) lässt sich eine Konzentration von Indikatoren zur Bodenfruchtbarkeit feststellen. Sie sind mit dem Zustand anderer Umweltkompartimente und den ihnen zugrunde liegenden Problemen verbunden. Dazu gehören insbesondere die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Süßwasser-Ökosysteme, Luftqualität (stickstoffhaltige Gase, Bildung von atmosphärischem Ozon und Feinstaub) und Klimawandel (insbesondere Ammoniak, Stickoxide als Vorläufersubstanzen von Treibhausgasen und Freisetzung bzw. Verlust der Speicherkapazität von Kohlenstoff von Böden). Im Gegenzug gibt es nur wenige Indikatoren, mit denen sich die Wirksamkeit von Massnahmen überwachen lässt, die zur Abschwächung der Auswirkungen landwirtschaftlicher Praktiken ergriffen werden könnten.

Wenn ein Agrarumweltthema auf einer bestimmten räumlichen Ebene von einem bestimmten Projekt abgedeckt wird, sind im Allgemeinen auch die damit verbundenen Agrarumweltfragen abgedeckt. Es lässt sich jedoch eine wichtige Ausnahme feststellen: Die Frage «genetische Diversität» (die zum Thema «Biodiversität» gehört) wird von keinem der Indicate-Projekte behandelt. Die genetische Diversität bezieht sich auf die Vielfalt der Gene innerhalb einer Art oder Population. Sie umfasst Unterschiede in den DNA-Sequenzen, die zu individuellen Merkmalen, zur Anpassungsfähigkeit und zum Überleben beitragen. Das Thema «neu auftretende Probleme» und insbesondere die Probleme antimikrobieller Resistenzen (AMR) und der Plastikverschmutzung werden kaum behandelt.

Betrachtet man die Zusammenhänge zwischen den Agrarumweltthemen und den DPSIR-Kategorien, so wird die Komplementarität zwischen verschiedenen Indikatorensets und Bewertungsansätzen deutlich (Abb. 15, 16, A1). Beispielsweise liegt der Fokus der SALCA-LCIA-Indikatoren auf den Auswirkungen, während sich die Indikatoren des Projekts Agrarumweltmonitoring (AUM) auf die mit diesen Auswirkungen verbundenen Belastungen und die entsprechenden Reaktionen konzentrieren. Ähnliches gilt für die Projekte «Nährstoffmanagement Hofdünger» und «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung», wobei sich das erstgenannte Projekt mit der Frage befasst, wie Futtermittel und Hofdünger in der Viehzucht die Bodenqualität beeinflussen.

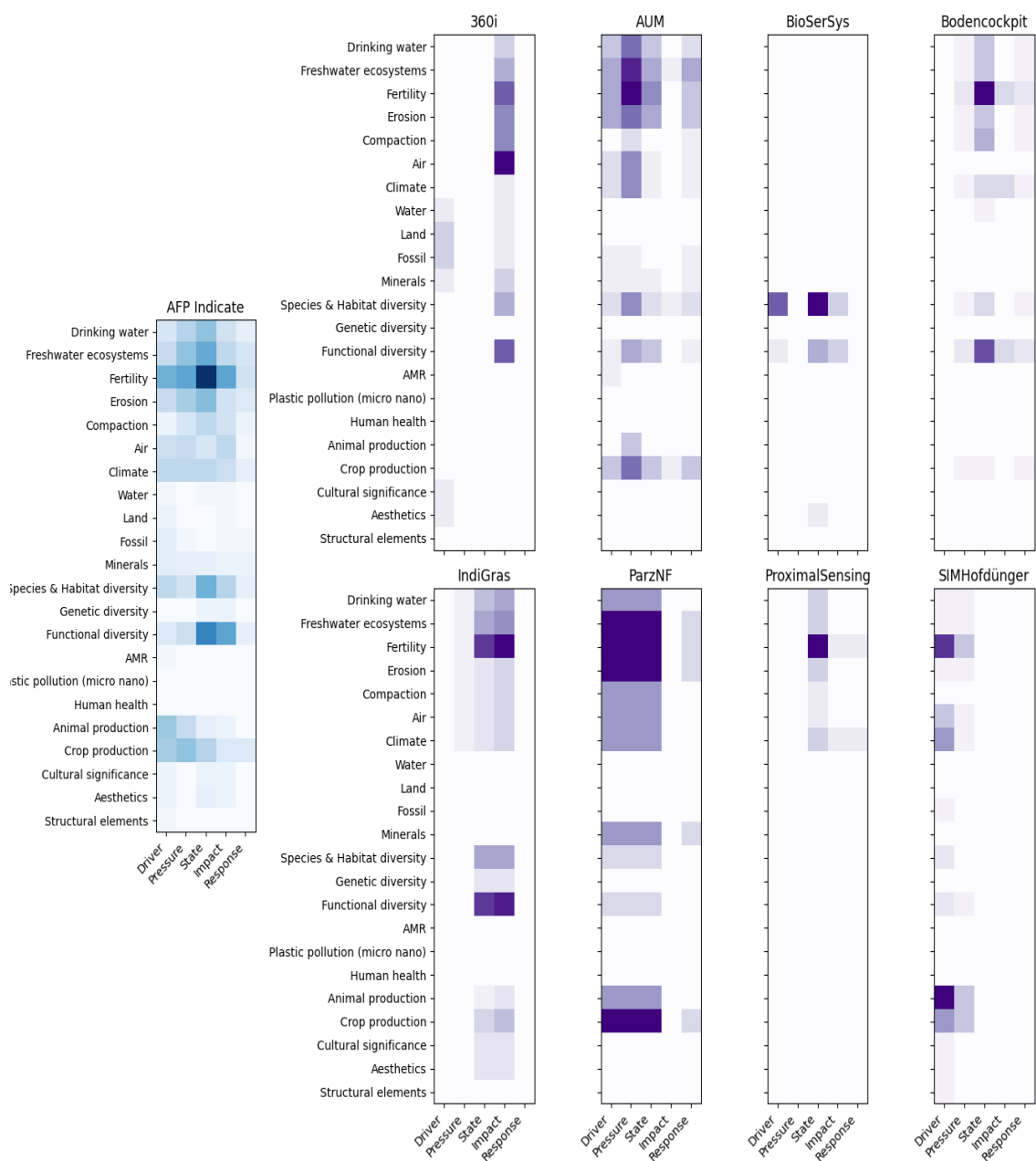


Abb. 16: Indikatorabdeckung auf Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltfragen (D1b) und Ursache-Wirkungs-Kette (DPSIR) (D2)

3.1.5.2 Indikatorabdeckung bezüglich des Zielpublikums

Ein Blick auf die Zielgruppen der Indikatoren zeigt (Abb. 17), dass alle drei Zielgruppen durch Indikatoren aus dem Programm Indicate angesprochen werden. Allerdings werden die einzelnen Agrarumweltthemen unterschiedlich abgedeckt und die Indicate-Projekte haben ihre spezifischen Schwerpunkte. Die Themen Boden bzw. Biodiversität (d. h. die Schwerpunkte der Indicate-Projekte) sind hinsichtlich der Zielgruppe breit gefächert, wobei die Betonung auf der Forschung liegt (mit Indikatoren, deren Interpretation Expertenwissen erfordert). Es gibt auch eine gewisse Konzentration von Indikatoren für die Führung von Landwirtschaftsbetrieben, insbesondere im Rahmen der Projekte «Indikatoren Biodiversität» und «Nährstoffmanagement Hofdünger». Die Projekte «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» wiederum haben ein eher heterogenes Zielpublikum und tendenziell eher einfacher verständliche Indikatoren. Die Aufschlüsselung nach Agrarumweltfragen (Abb. A2) zeigt, dass der Schwerpunkt auf Indikatoren zur Bodenfruchtbarkeit, zur Vielfalt der Arten und Lebensräume und zur funktionellen Vielfalt liegt. Die Aufschlüsselung nach den DPSIR-Kategorien (Abb. A3) zeigt, dass die Indikatoren für die Zielgruppe der Landwirtinnen und Landwirte hauptsächlich in den

Kategorien «Drivers» und «State» zu finden sind, während die Indikatoren «Impacts», «State» und «Pressure» häufiger die Zielgruppe Politik betreffen.

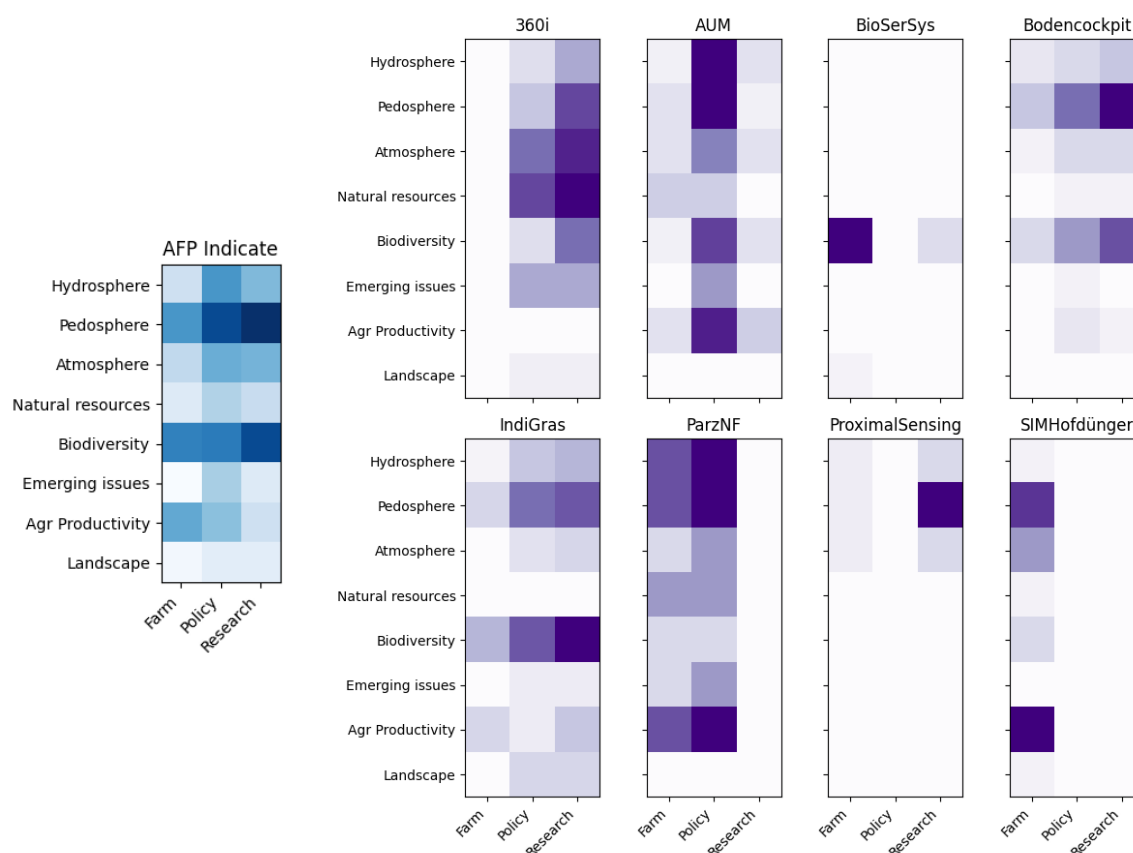


Abb. 17: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1b) und Zielpublikum (D3).

3.1.5.3 Indikatorabdeckung bezüglich der räumlichen Skala

Es wurde untersucht, wie das Programm Indicate mit den acht beteiligten Projekten sowohl den Raum der Agrarumweltthemen und -fragen als auch die räumliche Skala von der Parzelle bzw. vom Feld bis zur globalen Ebene abdeckt. Betreffend der räumlichen Skala der Umweltthemen zeigt Abb. A4 deutlich, dass sich Indicate eher auf kleinere Massstäbe konzentriert: Die vier räumlichen Ebenen Parzelle/Feld, Kultur, Herde und Betrieb sind gut abgedeckt, wohingegen die Projekte – mit Ausnahme des Projekts «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» – keine Informationen auf nationaler, kontinentaler oder globaler Ebene liefern. Nicht überraschend betrifft das Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» eine hohe räumliche Ebene, da es sich auf für Ökobilanzen verwendete Midpoint-Indikatoren konzentriert, welche die Emissionen sowohl aus vorgelagerten Prozessen als auch über den gesamten Wirkungspfad berücksichtigen. Das Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» und teilweise auch das Projekt «Indikatoren für das Agrarumweltmonitoring» decken einen deutlich grösseren Teil der Agrarumweltthemen und der räumlichen Skala ab als die vier Projekte «Indikatoren Biodiversität», «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung», «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» und «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen». Die Projekte «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» legen den Schwerpunkt grundsätzlich auf die gleichen Kombinationen von Themen und räumlicher Skala ab, nämlich auf Aspekte der Biodiversität und der Pedosphäre auf der Ebene Parzelle/Feld. Bei den beiden Projekten «Indikatoren Biodiversität» und «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» handelt es sich um sehr spezifische Projekte bezüglich der Agrarumweltthemen in Kombination mit der räumlichen Skala. Sie konzentrieren sich stark auf eine von 64 möglichen Kombinationen (Abb. A4): Beim Projekt «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» liegt der Fokus auf der Pedosphäre auf der Ebene Parzelle/Feld, beim Projekt «Indikatoren Biodiversität» auf Aspekten der Biodiversität auf der Ebene Landwirtschaftsbetrieb. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, da «Indikator

Bodenfruchtbarkeit einfach messen» für die Bestimmung wichtiger Indikatoren zur Bodenfruchtbarkeit auf der *In-situ*-Vis-NIR-Spektroskopie basiert, wobei die Spektren mit tragbaren Spektrometern direkt auf dem Feld aufgenommen werden. Auch bei «Indikatoren Biodiversität» liegt ein klarer Fokus bei einem abgedeckten Thema auf einer räumlichen Ebene: Das Projekt befasst sich vorwiegend mit den Auswirkungen der wichtigsten landwirtschaftlichen Praktiken wie Düngung, Beweidung, Mahd, Bodenbearbeitung, Herbizideinsatz und biologischer Anbau auf Indikatorartengruppen (Laufkäfer, Spinnen, Vögel, Bienen und Regenwürmer).

In den

Abb. A5 und Abb. A6 sind die Agrarumweltthemen in jeweils 2–4 Unterkategorien (im Folgenden Agrarumweltfragen genannt) unterteilt. Sie zeigen, dass der Schwerpunkt der Indicate-Projekte eher auf der Pflanzenproduktion als auf der Tierproduktion liegt, mit Ausnahme des Projekts «Nährstoffmanagement Hofdünger»/Nährstoffmanagement Hofdünger. Bei diesem Projekt wird der Gesamtfuttermittelverbrauch laktierender Milchkühe anhand einer Reihe von Regressionsgleichungen geschätzt.

3.1.5.4 Indikatorabdeckung bezüglich der zeitlichen Skala

In den Abbildungen Abb. A7 und Abb. A8 ist die Abdeckung der Agrarumweltthemen und -fragen mit Indikatoren bezüglich der zeitlichen Skala (kurz-, mittel-, langfristig) sowohl auf der Ebene des Forschungsprogramms Indicate als auch der acht einzelnen Forschungsprojekte dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sich die meisten Projekte auf den kurz- und mittelfristigen Bereich konzentrieren. Die einzige Ausnahme ist das Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung», bei dem der auf langfristigen Auswirkungen ausgerichtete Rahmen der Ökobilanz (Umweltauswirkungen auf Midpoint- und Endpoint-Ebene) verwendet wird. Bei den anderen sieben Projekten des Programms Indicate liegt der Fokus auf kurzfristigen Indikatoren. Das Thema Biodiversität, auf dem der Schwerpunkt der beiden Projekte «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» und «Indikatoren Biodiversität» liegt, schliesst auch mittelfristige Aspekte ein. Die Grafik zeigt, dass die Bodenfruchtbarkeit bis zu einem gewissen Grad auch mittel- und langfristige Aspekte umfasst, z. B. bei den drei Projekten «Agrarumweltmonitoring (AUM)», «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland».

3.1.5.5 Indikatorabdeckung bezüglich des Rahmens für die Umweltbewertung

Zur Kategorisierung der Indikatoren wurden vier Bewertungsrahmen verwendet: (i) AUI: Agrarumweltindikatoren, (ii) Ökobilanz (LCA, Life Cycle Assessment), (iii) ESA: Bewertung von Ökosystemleistungen (Ecosystem Services Assessment) und (iv) Betriebsführung (Tab. A6). Die Abbildungen Abb. A9 und Abb. A10 zeigen, dass sich die Projekte in Bezug auf den hauptsächlich verwendeten Bewertungsrahmen deutlich unterscheiden. Insgesamt dominiert der Rahmen AUI, in erster Linie wegen der drei Projekte «Agrarumweltmonitoring (AUM)», «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» und «Nährstoffflüsse abbilden». Die ersten beiden Projekte sind für das Monitoring vorgesehen. Durch die Berücksichtigung von Betriebsführungsindikatoren ist das Monitoring auch ein wichtiges Ziel des Projekts «Nährstoffflüsse abbilden», das Landwirtinnen und Landwirte bei der Optimierung ihrer Düngungsplanung auf der Ebene Feld unterstützt. Der gleiche Bewertungsrahmen wird im Projekt Nährstoffmanagement Hofdünger/Nährstoffmanagement Hofdünger verwendet. Dies ist naheliegend, da hier das Hauptziel darin besteht, den Futtermittelverbrauch von laktierenden Milchkühen genau zu schätzen. Das Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» basiert ausschliesslich auf der Methode der Ökobilanzierung, was sich in Abb. A9 deutlich zeigt. Ökosystemleistungen sind – trotz ihrer Bedeutung und des hohen Forschungsinteresses – eher

schwach vertreten. Einzig beim Projekt «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» liegt der Schwerpunkt auf Indikatoren, welche Ökosystemleistungen beschreiben.

Alle Glieder der Ursachen-Wirkungs-Kette (DSPIR) werden durch Agrarumweltindikatoren (AUI) abgedeckt, wobei der Schwerpunkt auf State-Indikatoren liegt (Abb. A11). Dafür sind in erster Linie die Projekte «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung», «Indikatoren Biodiversität», «Nährstoffflüsse abbilden» und «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» verantwortlich. Nur schwach sind Response-Indikatoren und noch schwächer Pressure-Indikatoren in den Indicate-Projekten vertreten. Während Monitoring-Indikatoren entlang der gesamten Ursache-Wirkungs-Kette eingesetzt werden (mit einem klaren Schwerpunkt auf State- und weniger ausgeprägtem Fokus auf Driver-Indikatoren), betreffen ESA-Indikatoren in erster Linie den Zustand und die Auswirkungen (State und Impact). Es ist offensichtlich, dass Indikatoren, die sich auf landwirtschaftliche Praktiken beziehen, meist Driver-Indikatoren sind, da davon ausgegangen wird, dass die Betriebsführung direkte oder indirekte Auswirkungen auf die ökologische Nachhaltigkeit des Betriebs hat.

Bei der Betrachtung des Rahmens für die Umweltbewertung hinsichtlich der räumlichen Skala (Abb. A12) fällt eine Konzentration von Indikatoren auf die Ebenen Parzelle/Feld und Landwirtschaftsbetrieb auf, hauptsächlich aufgrund von Messgrößen im Zusammenhang mit Agrarumweltindikatoren. Die Projekte «Nährstoffmanagement Hofdünger» und «Nährstoffflüsse abbilden» bewerten in erster Linie Betriebsführungsindikatoren auf der Ebene Herde/Landwirtschaftsbetrieb. Ausserdem ist der untere Bereich der räumlichen Skala (Landwirtschaftsbetrieb und darunter) stärker vertreten. Die Indikatoren der Ökobilanzierung decken die räumliche Skala am breitesten ab und ergänzen die anderen Konzepte mit dem Bereich ab der Ebene Landwirtschaftsbetrieb.

Bezüglich der zeitlichen Skala (Abb. A13) werden kurzfristige Aspekte in allen vier Rahmen für die Umweltbewertung berücksichtigt und mittelfristige Aspekte in allen Bewertungsrahmen ausser bei der Betriebsführung. Langfristige Auswirkungen sind Gegenstand des Rahmens Ökobilanz und in geringerem Masse des Rahmens Agrarumweltindikatoren.

3.1.6 Diskussion

Die beschriebenen Ergebnisse hängen von der Methodik ab, die für das Mapping der Indikatoren verwendet wird. Deshalb ist es wichtig, im Auge zu behalten, dass dieses Mapping in einem gewissen Grad subjektiv ist. Bei allen Bestrebungen, die Indikatoren einheitlich zu klassifizieren, sind doch gewisse Diskrepanzen aufgrund unterschiedlicher Einschätzungen des jeweiligen Managements der Indicate-Projekte möglich.

Das Indikatoren-Mapping vermittelt aber einen Überblick über die unterschiedlichen Indikatoren, die in den verschiedenen Projekten des Forschungsprogramms Indicate verwendet oder entwickelt wurden. Das Mapping zeigt auch die Bedeutung von Schlüsselindikatoren, die durch vielfältige vermittelte Informationen verschiedenen Zielen dienen. Ein interessanter Kandidat ist der organische Kohlenstoff im Boden (soil organic carbon, SOC) bzw. das Verhältnis von SOC zum Tongehalt. Dieser Indikator ist mit vielen Bodenfunktionen und -leistungen verknüpft. Ein weiterer Schlüsselindikator ist die Vielfalt der Flora, da dieser Indikator einerseits den allgemeinen Artenreichtum und andererseits die Bereitstellung vieler Ökosystemfunktionen und -leistungen widerspiegelt. Die Ermittlung solcher Indikatoren kann die Prioritätensetzung bei der Planung von Datenerfassungskampagnen und bei der politischen Berichterstattung unterstützen. Schlüsselindikatoren helfen dabei, potenzielle Agrarumweltmassnahmen zu ermitteln und zu konzipieren, den Fokus eines Monitorings festzulegen und die entscheidenden Schritte der praktischen Umsetzung zu verstehen. Ausserdem müssen wichtige Aspekte wie Arbeitsaufwand, Ausrüstungskosten und Vorhersagekraft berücksichtigt werden (Richter *et al.*, 2021). Dadurch lassen sich Anreize für Landwirtschaftsbetriebe zur Umsetzung von Massnahmen festlegen, mit denen Schlüsselmerkmale verbessert und geschützt werden können, und es lässt sich sicherstellen, dass diese Massnahmen für den Betrieb nützlich sind.

Während einige Indikatoren ähnliche Informationen liefern, spielt die Methodik zur Messung der entsprechenden Werte und zur Nutzung für Politik und Management eine entscheidende Rolle. Ein Vergleich der Indikatoren zur Nährstoffbilanz nach OECD bzw. Suisse-Bilanz zeigt beispielsweise, dass die Indikatoren in beiden Fällen für Richtlinien eingesetzt werden, aber nicht die gleichen Werte liefern (siehe Kapitel 2.1). Ihre Konzipierung kann durch politische Interessen beeinflusst werden, und Abweichungen der Ergebnisse können auch durch unterschiedliche Datenquellen entstehen. Eine ausgedehntere Anwendung eines bestimmten Indikators für verschiedene Zwecke

erfordert daher eine sorgfältige Prüfung der methodischen Aspekte und der potenziellen Auswirkungen auf die Interpretation der Ergebnisse in verschiedenen Kontexten oder für verschiedene Zwecke.

Die Bewertung von Umweltfragen auf Betriebsebene stellt eine grosse Herausforderung dar. Es müssen geeignete Upscaling- und Downscaling-Ansätze gefunden werden, mit denen sich Indikatoren und Indikatorensets bis zu einem gewissen Mass über einen bestimmten Skalenbereich hinweg anwenden lassen. Das Upscaling auf eine Region oder eine höhere räumliche Ebene wird z. B. in den Projekten «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» und «Nährstoffflüsse abbilden» gezeigt. Damit Entscheidungsprozesse auf der entsprechenden Ebene gesteuert werden können, müssen die Wechselwirkungen zwischen Betriebsführung und Umwelt über einen mehrstufigen Ansatz besser untersucht werden. Ausserdem werden politisch festgelegte Ziele wie Umweltziele Landwirtschaft (UZL) auf nationaler Ebene oder Sektor-Ebene festgelegt. Das Verbinden von Indikatoren auf betrieblicher Ebene und auf nationaler Ebene ist nicht einfach. Die Verwendung standardisierter Indikatorensets und Methoden für die internationale Berichterstattung (in der Regel auf der Grundlage von Statistiken) kann zu Unterschieden gegenüber lokalen oder regionalen Bewertungen führen (siehe z. B. Baumgartner *et al.*, 2024).

Je weiter wir uns von der Ebene des Landwirtschaftsbetriebs entfernen, desto länger sind die Zeitspannen der beteiligten Prozesse, da die alltäglichen betrieblichen Aktivitäten in den Hintergrund treten und ein Verständnis komplexer längerfristiger Phänomene angestrebt wird. Die Betriebsführung konzentriert sich meist auf den kurzfristigen Bereich (Produktionskalender), während das Monitoring von Agrarumweltmassnahmen längere Zeiträume betrifft.

Die Ergebnisse des Mappings der Indikatoren-Landschaft zeigen, dass die einzelnen Indicate-Projekte bezüglich Schwerpunkt und Spezialisierung sehr unterschiedlich sind: Während die beiden Projekte «Indikatoren Biodiversität» und «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» eine sehr begrenzte Anzahl von Kombinationen in Bezug auf Agrarumweltthemen, räumliche oder zeitliche Skala und Bewertungsrahmen abdecken, sind die beiden übergreifenden Projekte «Indikatoren für das Agrarumweltmonitoring» und «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» weniger spezifisch und weisen eine breitere Abdeckung auf.

Eine stetige Herausforderung ist die Vereinfachung zur Kommunikation an ein breiteres Publikum bei gleichzeitiger Bewahrung der wissenschaftlichen Fundiertheit durch eine gewisse Komplexität, die für die verschiedenen Projektgruppen wichtig ist. Es gibt zwar umfassende Indikatorensets, diese eignen sich aber nicht für alle Zwecke. Verschiedene Gruppen von Akteuren haben unterschiedliche Bedürfnisse. Die Erstellung eines Indikatorensets zur Messung der Nachhaltigkeit eines Landwirtschaftsbetriebs bei Berücksichtigung vielfältiger Aspekte erfordert umfassende Forschungsansätze mit unterschiedlichen Perspektiven. Selbst wenn ein Indikator für die Betriebsführung operationalisiert werden kann, erfordert dies häufig Fachwissen für die Berechnung und Interpretation dieser Indikatoren. Einige Indikatoren bleiben komplex, können aber für die Kommunikation und Interpretation vereinfacht werden (z. B. durch den Einsatz von Werkzeugen und Diagrammen). Ihr Verständnis erfordert die Zusammenarbeit zwischen der Wissenschaft und anderen Akteuren.

Damit sie sich gezielt einsetzen lassen, müssen die Indikatoren einerseits unter realen Betriebsbedingungen und andererseits bezüglich ihrer Nützlichkeit für die Landwirtinnen und Landwirte und die Durchführbarkeit der Datenerhebung getestet werden. Im Rahmen einiger Projekte des Forschungsprogramms Indicate wurden bereits bestimmte Tests durchgeführt (siehe Kapitel 2).

Abgesehen von den Anforderungen an die Berechnung von Indikatoren und den Herausforderungen, die mit dem Einsatz digitaler Technologien verbunden sind (siehe auch Kapitel 4), stellt sich die Frage der Interpretation. Um nützlich zu sein, muss ein Indikator aufschlussreiche, umsetzbare Informationen für die Entscheidungsfindung liefern, was voraussetzt, dass er mit einer Referenz verglichen werden kann. Die Festlegung von Zielwerten ist nicht immer trivial (Ehlers *et al.*, 2024). Selbst wenn die Zielwerte wissenschaftlich bestimmt wurden (z. B. maximale Menge an Treibhausgasemissionen zum Erreichen des Zwei-Grad-Ziels), muss zuvor in der Regel eine tolerierbare Auswirkung festgelegt werden (in diesem Beispiel ein maximaler Anstieg der globalen Temperatur von 2 Grad). Ausserdem gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie die aus den nationalen politischen Zielen abgeleiteten Werte auf die Ebene der Betriebe angewendet werden. So könnten beispielsweise alle Betriebe in gleichem Masse zur Erreichung des Ziels beitragen oder bestimmten Betrieben könnte eine grössere Verpflichtung zukommen. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass es für die Betriebe sehr schwierig sein kann, die Ziele für mehrere Indikatoren gleichzeitig zu erreichen.

Wie das Indikatoren-Mapping sichtbar gemacht hat, gibt es mehrere Lücken in der thematischen Abdeckung, da der Schwerpunkt auf den Nährstoffflüssen, der Bodenqualität und der Biodiversität liegt. So waren beispielsweise die Agrarumweltthemen natürliche Ressourcen (z. B. Wasser, fossile und mineralische Ressourcen), neu auftretende Probleme (z. B. Antibiotikaresistenzen, Plastikverschmutzung) und Landschaft unterrepräsentiert. Ausserdem wurde im Indicate-Programm die genetische Diversität nicht berücksichtigt. Bezüglich des DPSIR-Rahmens waren die Response-Indikatoren weniger vertreten als die anderen Glieder der Ursache-Wirkungs-Kette. Der Schwerpunkt der meisten Indikatoren lag auf der kurz- und mittelfristigen Perspektive, während langfristige Überlegungen – mit Ausnahme der Ökobilanzen im Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung» – meist fehlten. Was die räumliche Skala der Umweltthemen betrifft, so bezogen sich die meisten Indikatoren auf die Ebene der Parzelle/Feld und Betrieb, gefolgt von der Ebene Kultur und Herde. Es gab kaum Indikatoren auf regionaler Ebene. Ökobilanzen lieferten zusätzliche Indikatoren von der nationalen bis zur globalen Ebene, die in den anderen Projekten weitgehend fehlten.

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit wäre es generell sinnvoll, nach Möglichkeiten für eine Harmonisierung und Angleichung der in den einzelnen Indicate-Projekten verwendeten Methoden zu suchen. Von entscheidender Bedeutung ist die Entwicklung von Indikatoren, die auf verschiedenen Ebenen der Skala eingesetzt werden können und die sich mit langfristigen Fragen befassen. Folgeprojekte sollten darauf abzielen, eine breitere Palette von Ökosystemleistungen einzubeziehen und damit wertvolle ergänzende Informationen für die Betriebsführung und die Politik bereitzustellen. Ausserdem kann die Entwicklung benutzerfreundlicher Instrumente die Kommunikation komplexer Indikatoren verbessern, ohne dass die wichtigsten Informationen verloren gehen, und die Akteure, einschliesslich der Landwirtinnen und Landwirte, bei der Interpretation der Ergebnisse unterstützen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind auch geeignete Instrumente für die Datenerhebung, die überprüfbare, sichere und transparente Daten liefern, von grösster Bedeutung. Die Entwicklung gemeinsamer Standards für Datenformate und Instrumente im Hinblick auf den Datenaustausch zwischen den Akteuren (z. B. Landwirtinnen und Landwirte, Forschende, politische Entscheidungsträger) würde ein umfassenderes und einheitlicheres Monitoring erleichtern. Schliesslich könnten auch die Verifizierung und Validierung von Indikatoren für unterrepräsentierte Themen (z. B. die genetische Diversität) zu einem vollständigeren Bild der ökologischen Nachhaltigkeit des gesamten Landwirtschaftssektors der Schweiz beitragen.

3.1.7 Schlussfolgerungen

Auf Programmebene liegt der thematische Schwerpunkt des Programms Indicate hauptsächlich auf Nährstoffflüssen, bodenbezogenen Aspekten und der biologischen Vielfalt in Landwirtschaftsbetrieben. Dagegen werden die Themen natürliche Ressourcen, neu aufkommende Probleme und Landschaft in den beteiligten Projekten kaum behandelt. Bei den DPSIR-Kategorien liegt der Schwerpunkt auf State- und Impact-Indikatoren, gefolgt von Driver- und Pressure-Indikatoren. Response-Indikatoren wurden seltener einbezogen. Die einzelnen Indicate-Projekte haben dabei unterschiedliche Schwerpunkte und liefern komplementäre Informationen. Zum Beispiel überwiegen die Impact-Indikatoren im Projekt «Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung», die Pressure-Indikatoren im Projekt «Indikatoren für das Agrarumweltmonitoring» und die Driver-Indikatoren im Projekt «Nährstoffmanagement Hofdünger».

Das Zielpublikum scheint eine erhebliche Rolle für das Clustering der Indikatoren zu spielen. Die Themen Boden und Biodiversität richten sich an unterschiedliche Zielgruppen, wobei der Schwerpunkt auf der Forschung liegt. Die auf die Politik ausgerichteten Indikatoren decken den grössten Teil der Agrarumweltthemen ab.

Bei der räumlichen Skala werden die Ebenen Parzelle, Kultur, Herde und Betrieb am stärksten abgedeckt. Viel schwächer vertreten sind die höheren Ebenen von der regionalen bis zur globalen Ebene, die hauptsächlich in Ökobilanzen berücksichtigt werden. Das Upscaling der Informationen, z. B. vom landwirtschaftlichen Betrieb auf die nationale Ebene, bleibt eine Herausforderung. Der Schwerpunkt liegt auf kurz- und mittelfristigen Prozessen; langfristige Auswirkungen sind weniger stark vertreten und werden wieder in erster Linie in den Ökobilanzen berücksichtigt.

Beim angewendeten Rahmen für die Umweltbewertung überwiegen die Agrarumweltindikatoren, gefolgt von den Ökobilanz-Indikatoren. Die Indikatoren zu Ökosystemleistungen werden hauptsächlich vom Projekt «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» bereitgestellt, und auch die Indikatoren zur Betriebsführung sind seltener vertreten.

Der organische Kohlenstoff im Boden (bzw. das Verhältnis SOC zu Tongehalt) und die Vielfalt der Flora wurden als zwei potenzielle Schlüsselindikatoren identifiziert, die mit vielen Umweltprozessen sowie Ökosystemfunktionen und -leistungen in Zusammenhang stehen.

Es braucht einen sinnvollen Kompromiss zwischen einer Vereinfachung für die Kommunikation an ein breites Publikum und der Beibehaltung der Nützlichkeit für spezifische Anwendungen. Dies impliziert, dass ein einziges Indikatorenset nicht alle Bedürfnisse abdecken kann. Die Indikatoren müssen für ein bestimmtes Ziel ausgewählt werden, und ihre Kommunikation muss an das jeweilige Zielpublikum angepasst werden.

3.2 Mapping sozialer Indikatoren

Autorinnen und Autoren: Manika Rödiger, Stefan Mann

3.2.1 Soziale Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebe

Nachdem sich die Forschung zu Nachhaltigkeitsindikatoren lange Zeit hauptsächlich auf Umweltindikatoren konzentriert hat, wurden grosse Fortschritte bei der Klärung des Konzepts der sozialen Nachhaltigkeit und seiner Operationalisierung durch Indikatoren erzielt. Eine Definition von Rasouli und Kumaranyar (2016) macht deutlich, dass soziale Nachhaltigkeit voraussetzt, dass menschliche Grundbedürfnisse erfüllt sind, aber auch unter anderem soziale Gerechtigkeit, Gleichberechtigung, sozialer Zusammenhalt, soziale Vielfalt und Sicherheit für heutige und zukünftige Generationen gewährleistet ist.

In Bezug auf die Landwirtschaft lassen sich mindestens zwei Teile sozialer Nachhaltigkeit unterscheiden: erstens der Teil, der die Lebensqualität und das Wohlbefinden der in der Landwirtschaft tätigen Menschen betrifft, und zweitens der Teil, der sich auf Aspekte der Landwirtschaft bezieht, die sich auf die Lebensqualität und das Wohlbefinden der Menschen ausserhalb der Landwirtschaft auswirken (Abb. 18) (Bathaei & Štreimikiene, 2023; Lebacqz *et al.*, 2013). Der erstgenannte Teil kann Aspekte der persönlichen Ebene (z. B. persönliche Zufriedenheit), der Haushaltsebene (z. B. Konsummöglichkeiten des Haushalts) und der Betriebsebene (z. B. Arbeitsbedarf und -ressourcen des Betriebs) umfassen (Guptill and SARE Quality-of-Life working group, 2021). Da in bäuerlichen Familienbetrieben diese Ebenen jedoch oft stark miteinander verwoben sind (Janker *et al.*, 2019), wird im Folgenden nicht zwischen ihnen unterschieden. Eine Unterscheidung, die jedoch vorgenommen wird, ist diejenige zwischen Aspekten, welche die Landwirtinnen und Landwirte sowie deren Familien betreffen, und solchen, die Angestellte in der Landwirtschaft betreffen. Viele Aspekte betreffen jedoch beide Gruppen.

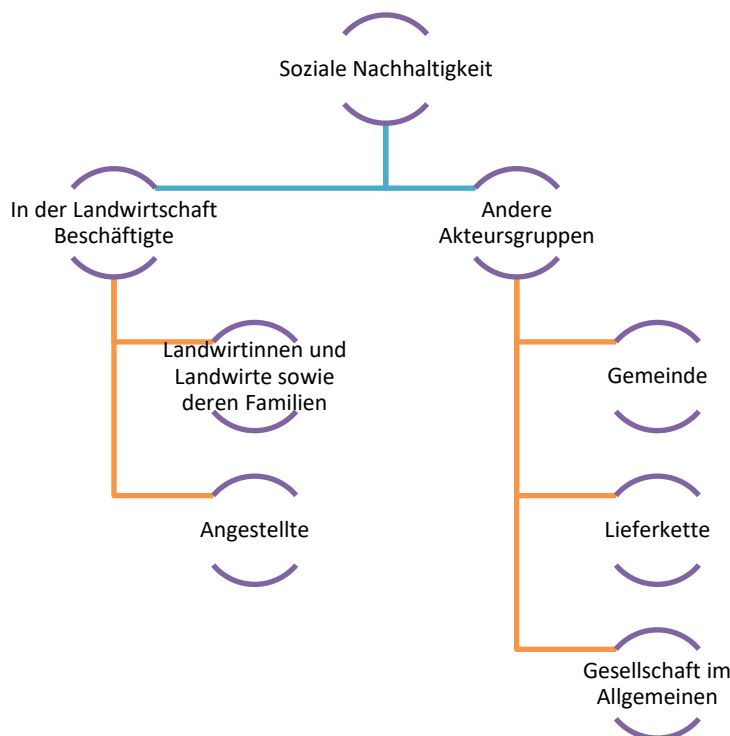


Abb. 18: Kategorisierung von Interessensgruppen sozialer Nachhaltigkeitsaspekte in der Landwirtschaft (konzeptuell teilweise basierend auf Guptill und SARE Quality-of-Life working group 2021).

Der zweitgenannte Teil der sozialen Nachhaltigkeit umfasst Aspekte, welche die lokale Gemeinschaft (z. B. Nachbarn), andere Akteure der Lebensmittellieferkette, also vorgelagerte und nachgelagerte Akteure, und die Gesellschaft im Allgemeinen betreffen (siehe auch Abb. 18) (Guptill und SARE Quality-of-Life working group, 2021). Für beide Bereiche wurden bereits viele Indikatoren entwickelt und verwendet. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Themen und Indikatoren für beide Bereiche gegeben. In Tabelle 7 ist, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, eine Auswahl an Themen zur Messung sozialer Nachhaltigkeit auf Landwirtschaftsbetrieben aufge-

führt. Es wurde zwischen Themen unterschieden, welche die Angestellten, Landwirtinnen und Landwirte sowie deren Familien oder beide Gruppen betreffen. Die Einteilung der Themen wurde von den Autoren dieses Beitrags vorgenommen und kann von anderen Einschätzungen abweichen. Es wurden Themen ausgewählt, die als relevant für Betriebe in der Schweiz eingeschätzt wurden. Grundsätzlich behandeln die Themen die Bereiche Gesundheit, Arbeitsbedingungen, Wohlbefinden, Zufriedenheit, Lebensqualität und soziale Gerechtigkeit. Dabei gibt es einige Themen, die relevanter für Angestellte als für Landwirtinnen und Landwirte sind und umgekehrt.

Tab. 7: Auswahl an Themen für die Evaluierung sozialer Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebe (Quellen: Alaoui *et al.*, 2022; Bathaei & Štreimikiene, 2023; Desiderio *et al.*, 2022; Lebacqz *et al.*, 2013; Mills *et al.*, 2021; Sannou *et al.*, 2023; Roesch *et al.*, 2016).

Betroffene Akteure	Themen sozialer Nachhaltigkeit
Alle in der Landwirtschaft Beschäftigten	Wahrgenommene Arbeitsbelastung Arbeitszeit Schmerzhaftigkeit der Arbeit Körperliche Gesundheit Körperliche Belastung Wohlbefinden Lebensqualität Arbeitszufriedenheit (Work-Life-Balance, Bauersein, Entscheidungsfreiheit) Weiterbildung Geschlechtergerechtigkeit
Landwirtinnen, Landwirte und deren Familien	Stressempfinden Isolationsempfinden Burnout / mentale Gesundheit Urlaub
Angestellte	Diskriminierung Gesundheitsschutz Arbeitsbedingungen (Urlaub, Vertrag usw.) Angemessene Entlohnung
Gemeinde (und Lieferkette)	Kulturelle Dienstleistungen Beitrag zur Schaffung von Arbeitsplätzen Partizipation in Organisationen und Behörden Lokale Netzwerke (Qualität ländlichen Lebens) Hofnachfolge
Gesellschaft (und Lieferkette)	Akzeptierte landwirtschaftliche Praxis, inkl. Tierwohl Landschaftsästhetik/-qualität Lebensmittelsicherheit Lebensmittelqualität Transparenz Gleichberechtigung Erbe (kulturell, spirituell)

Für Aspekte sozialer Nachhaltigkeit, die andere als in der Landwirtschaft Beschäftigte betreffen, zeigt Tabelle 7 eine Auswahl an Themen, anhand derer soziale Nachhaltigkeit bewertet werden kann. Themen, welche die Akteure der Lieferkette betreffen, liessen sich nicht deutlich von jenen abgrenzen, welche die Akteursgruppen Gemeinde und Gesellschaft betreffen; eine separate Auflistung der die Lieferkettenakteure betreffenden Themen hätte zu Dopplungen geführt. Daher sind solche Themen gemeinsam mit denjenigen der Gemeinde und der Gesellschaft aufgeführt. Die Themen betreffen die Beiträge von Landwirtschaftsbetrieben zur wirtschaftlichen Lage und zum sozialen Leben und Zusammenhalt der Gemeinde, sowie zur Produktqualität und -sicherheit, zur gesellschaftlichen Akzeptanz der Produktion und zur Erhaltung der Landschaftsästhetik wie auch zum kulturellen und spirituellen Erbe.

Im Zuge der Literaturanalyse wurden bei der sozialen Nachhaltigkeit noch deutliche Lücken festgestellt, gerade bezüglich Indikatoren für Betriebe im Globalen Norden. Im Indicate-Programm, dessen primäres Ziel ja die Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren war, wurde für den sozialen Bereich ein Indikator entwickelt, der den Herausforderungen im Schweizer Agrarsystem mit seinen starken Steuerungsmechanismen durch die Agrarpolitik, aber auch wachsenden Anforderungen der Marktpartner in besonderem Masse Rechnung trägt. Indem die Freiheitsgrade der Betriebsleiterinnen und -leiter sowohl bei Konsum- als auch bei Produktionsentscheidungen abgefragt werden, fokussiert der durch Mann & Rödiger (2024) entwickelte Befähigungsindex auf die Spielräume, die Betriebsleitende in ihrem Arbeits- und Privatleben haben.

3.2.2 Soziale Nachhaltigkeit aus Sicht der Landwirtinnen und Landwirte

Nachhaltigkeitsmessung wird nicht nur zu Informationszwecken durchgeführt, sondern das schlussendliche Ziel ist, Bereiche zu identifizieren, in denen die Nachhaltigkeit verbessert werden sollte, und Handlungen zu motivieren, um dies zu bewirken (Pope *et al.*, 2004). Eine höhere Motivation von Akteursgruppen, von denen Handlungen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit erhofft werden, kann erwartet werden, wenn die Nachhaltigkeitsbewertung Themen abdeckt, die relevant für diese Gruppen sind. Im Fall der Landwirtschaft sind dies hauptsächlich Landwirtinnen und Landwirte (Janker *et al.*, 2019). Um zu prüfen, ob Nachhaltigkeitsbewertungen die Themen abdecken, die für Landwirtinnen und Landwirte wichtig sind, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um solche Themen zu identifizieren. Die Literaturrecherche wurde in den Datenbanken Web of Science und Scopus durchgeführt. Wir haben nach englischsprachigen wissenschaftlichen Artikeln gesucht, die im Zeitraum zwischen 2014 und 2024 veröffentlicht wurden und Themen enthielten, die für Schweizer Landwirtinnen und Landwirte und für landwirtschaftliche Familienbetriebe im Allgemeinen von Bedeutung sind. Um auch deutschsprachige wissenschaftliche Literatur miteinzu-beziehen, wurden die Veröffentlichungen der Zeitschrift «Agrarforschung Schweiz» für denselben Zeitraum durchsucht. Insgesamt wurden vier wissenschaftliche Artikel identifiziert, die relevante Informationen für die Forschungsfrage enthielten. Ausserdem wurde eine Studie des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) zur Situation von Frauen in der Landwirtschaft mit einbezogen (Agridea, 2022).

Tabelle 8 zeigt die Themen, die in der Literatur identifiziert wurden. In die Liste wurden Themen aufgenommen, wenn sie einen Anteil von 5 % oder mehr an den Nennungen der jeweiligen Studie hatten. Der Anteil an den Nennungen kann als Annäherung einer Gewichtung der Themen durch die Studienteilnehmer gesehen werden, denn ein Thema, welches häufiger als andere genannt wurde, wird vermutlich als wichtiger empfunden. Basierend auf dieser Annahme lässt sich schliessen, dass die drei wichtigsten Themen für Landwirtinnen und Landwirte die Work-Life-Balance, die Beziehungen sowie die Sozialversicherung und Rente sind. Weitere Themen mit folglich geringerer Wichtigkeit waren die Zufriedenheit mit Leben und Arbeit, Entscheidungsfreiheit, die Hofnachfolge und die Verfügbarkeit von Arbeitskräften. Das spiegelt sich auch in der Studie des BLW (2022) wider. Die Studie zeigte, dass sich Frauen in der Landwirtschaft mehr durch Zeitdruck, Arbeitsbeanspruchung und zu wenig Zeit für die Partnerschaft belastet fühlten, als durch fehlende Wertschätzung, Generationenkonflikte, soziale Isolation und Konflikte in der Partnerschaft. Am meisten fühlten sich die teilnehmenden Frauen durch die Agrarpolitik belastet, was in den anderen Studien nicht explizit auftauchte. Deutlich weniger belastet fühlten sich die Frauen durch zu wenig Entscheidungsmöglichkeiten (Agridea, 2022).

Auch das Einkommen wurde häufig genannt. Da es jedoch üblicherweise den Indikatoren der ökonomischen Nachhaltigkeitsdimension zugeordnet wird, ist das Einkommen nicht in Tabelle 8 enthalten. Das Thema «Beziehungen» enthält solche zu vielen verschiedenen Akteuren und kann auch unterteilt werden in Beziehungen zwischen den Beschäftigten auf dem Familienbetrieb, Beziehungen zu Personen oder Organisationen, mit denen der Betrieb in direktem Kontakt steht, und Beziehungen zu den Konsumentinnen und Konsumenten der Produkte.

Tab. 8: Themen sozialer Nachhaltigkeit aus Sicht der Landwirtinnen und Landwirte (basierend auf Baccar *et al.*, 2020^a; Contzen & Häberli, 2021^b; Saleh & Ehlers, 2023^c; Yamaguchi *et al.*, 2020^d).

Themen	Beispiele	Anteil an Nennungen
Work-Life-Balance	Genug Zeit für Pausen, für die Familie, für Hobbies; Urlaub nehmen können	8.3 % ^c , 39.4 % ^b
Beziehungen	Respektvolle Interaktion mit Konsumentinnen und Konsumenten; Wertschätzung von Konsumentinnen und Konsumenten sowie der Gemeinde; gute Beziehungen mit Bauernverbänden, Vereinen, anderen Landwirtinnen und Landwirten, der Administration; familiäre Zusammenarbeit auf dem Betrieb; Zusammenarbeit verschiedener Generationen	9.3 % ^c (für Beziehungen ausserhalb des Betriebs), 8.3 % ^c (für Beziehungen innerhalb des Betriebs), 14.1 % ^b
Sozialversicherung und Rente	Ausreichende Rente; Sozialversicherung der Ehefrauen der Landwirte	12.6 % ^c , ~8 % ^a
Zufriedenheit mit Leben und Arbeit	Zufriedenheit mit der Lebenssituation; Freude an der Arbeit	10.6 % ^b
Entscheidungsfreiheit	Unabhängigkeit; eigenständig entscheiden können; Arbeitszeit selbst einteilen; Handlungsfreiheit	9.9 % ^b
Hofnachfolge	Kann ein tragfähiger Betrieb an einen Nachfolger übergeben werden	6.0 % ^c , ~10 % ^a
Verfügbarkeit von Arbeitskräften	Schwierigkeit, genug qualifizierte Arbeitskräfte zu bekommen	6.3 % ^d

3.2.3 Abdeckung durch Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools

Die für die Landwirtinnen und Landwirte in Bezug auf soziale Nachhaltigkeit als wichtig identifizierten Themen sind teilweise in der Auswahl sozialer Nachhaltigkeitsthemen in Tabelle 7 enthalten. So sind beispielsweise Themen mit Bezug zur Work-Life-Balance enthalten ebenso wie die Zufriedenheit mit der Arbeit und die Entscheidungsfreiheit. Die Themen Beziehungen, Sozialversicherung und Rente, Hofnachfolge und Verfügbarkeit von Arbeitskräften andererseits sind nicht oder nicht explizit in Tabelle 7 aufgeführt. Jedoch enthält Tabelle 7 kein ausgearbeitetes Indikatorenset für eine Nachhaltigkeitsmessung, sondern dient lediglich der Übersicht. Um eine bessere Aussage darüber treffen zu können, inwieweit die für Landwirtinnen und Landwirte wichtigen Themen in Nachhaltigkeitsmessungen berücksichtigt werden, analysierten wir im Folgenden mehrere Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools bezüglich deren Abdeckung der Themen. Dafür schauten wir uns Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools an, die ein Indikatorenset für die Messung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit von landwirtschaftlichen Betrieben industrialisierter Länder entwickelt haben. Um Lösungen aus verschiedenen geographischen und kulturellen Kontexten abzubilden, schauten wir uns nicht nur die in der Schweiz entwickelten Tools RISE⁵ und SMART⁶ sowie das noch in der Entwicklung befindliche SALCAsustain⁷ an, sondern auch IDEA⁸ aus Frankreich, MOTIFS⁹, SAFE¹⁰ aus Belgien und PGTool¹¹ aus dem Vereinigten Königreich. Tabelle 9 zeigt, welche Themen von welchen Tools abgedeckt werden. Spezifisch wird analysiert, ob die Themen vollständig oder nur teilweise, explizit oder implizit und durch ein subjektives oder ein objektives Mass abgedeckt werden.

Insgesamt schneidet RISE bei diesem Vergleich am besten ab, da alle Themen aus Tabelle 8 zumindest implizit und teilweise abgedeckt werden. PGTool deckt nur ein Thema implizit und teilweise ab. Allerdings ist zu beachten, dass die unterschiedlichen Tools unterschiedliche Fokusse haben: PGTool bewertet die Nachhaltigkeit eines Landwirtschaftsbetriebes nahezu ausschliesslich anhand dessen Leistungen für die Gesellschaft und behandelt Aspekte, die für Landwirtinnen und Landwirte relevant sind nicht. Auch IDEA, MOTIFS und SAFE sind stark auf die Leistungen der Landwirtschaftsbetriebe für die Gesellschaft ausgerichtet.

⁵ Response-Inducing Sustainability Evaluation (Grenz *et al.*, 2012)

⁶ Sustainability Monitoring and Assessment RouTine (Schader *et al.*, 2016)

⁷ Swiss Agricultural Life Cycle Assessment for sustainability evaluation is an indicator-based sustainability assessment method (Roesch *et al.*, 2021)

⁸ Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles (Zahm *et al.*, 2008)

⁹ Monitoring tool for integrated farm sustainability (Meul *et al.*, 2008)

¹⁰ Sustainability Assessment of Farming and the Environment (Van Cauwenbergh *et al.*, 2007)

¹¹ Public Goods Tool (Organic Research Centre, 2024)

Die Work-Life-Balance wird in SALCAsustain, RISE und SMART durch Fragen zu den Arbeitsstunden, Ferien und Überstunden von Angestellten und des/der Betriebsleitenden sowie deren Familie gemessen (Grenz *et al.*, 2012; Roesch *et al.*, 2016; Schader *et al.*, 2016). Ähnlich enthält SAFE einen Indikator zur jährlichen Arbeitszeit der auf dem Betrieb Beschäftigten (Sauvenier *et al.*, 2006). IDEA verwendet einen Indikator zur Intensität der Arbeit, der das Thema implizit behandelt (Zahm *et al.*, 2008, 2024).

Die das Thema «Beziehungen» erklärenden Beispiele in Tabelle 8 beinhalten eine qualitative Konnotation, also beispielsweise, dass die Beziehungen «respektvoll» und «wertschätzend» sein sollen. Die Tools RISE und SALCAsustain ermöglichen den Einbezug der Qualität der Beziehungen, indem nach der allgemeinen Zufriedenheit mit den sozialen Beziehungen gefragt wird (Grenz *et al.*, 2012; Roesch *et al.*, 2016). Die Tools unterscheiden jedoch nicht zwischen Beziehungen zu Konsumentinnen und Konsumenten, Mitgliedern der Gemeinde, der Familie oder Mitgliedern von Vereinen und Organisationen. Trotzdem werden die Tools als vollständig und explizit dieses Thema abdeckend kategorisiert. Die anderen Tools bedienen sich einer Annäherung, indem nach Mitgliedschaften oder unbezahltem sozialem Engagement gefragt wird. Da angenommen wird, dass soziales Engagement zu Wertschätzung der Gemeindemitglieder führen kann, ist dies als impliziter unvollständiger Indikator kategorisiert.

Tab. 9: Abdeckung der für Landwirte und Landwirtinnen wichtigen Themen sozialer Nachhaltigkeit von sieben Nachhaltigkeitsbewertungstools (zwei Häkchen/ein Häkchen = vollständig/teilweise abgedeckt, grün/orange = explizit/implizit abgedeckt, s/o/u = subjektives/objektives/unbekanntes Mass).

	SALCAsustain ¹	SMART ²	RISE ³	IDEA ⁴	SAFE ⁵	MOTIFS ⁶	PGTool ⁷
Work-Life-Balance	✓✓ o	✓✓ s & o	✓✓ o	✓ u	✓ o		
Beziehungen	✓ s & o	✓ o	✓✓ s	✓ u	✓ o	✓ u	✓ o
Sozialversicherung und Rente	✓ o	✓ o	✓ o				
Zufriedenheit	✓✓ s		✓✓ s	✓ u		✓ u	
Entscheidungsfreiheit			✓ s		✓✓ s	✓✓ u	
Hofnachfolge		✓✓ o	✓✓ o		✓✓ o		
Verfügbarkeit Arbeitskräfte		✓✓ o	✓✓ o				

¹ Roesch *et al.* (2016), ² Supplementary Material A from Schader *et al.* (2016), ³ Grenz *et al.* (2012), ⁴ Zahm *et al.* (2008, 2024), ⁵ Van Cauwenbergh *et al.* (2007), Sauvenier *et al.* (2006), ⁶ Meul *et al.* (2008), ⁷ Organic Research Center (2024)

Die Zufriedenheit mit Leben und Arbeit wird in SALCAsustain und RISE mit einem expliziten ausführlichen Frageblock behandelt (Grenz *et al.*, 2012; Roesch *et al.*, 2016). IDEA hingegen beinhaltet einen Indikator zur Lebensqualität (Zahm *et al.*, 2008, 2024), der inhaltlich mit der Zufriedenheit verwandt ist und deswegen als teilweise implizit enthalten kategorisiert wurde.

Die Entscheidungsfreiheit wird in RISE implizit abgedeckt, da nach der Zufriedenheit mit persönlichen Freiheiten, jedoch nicht explizit nach der Entscheidungsfreiheit, gefragt wird (Grenz *et al.*, 2012). SAFE behandelt das Thema implizit mit zwei Fragen nach der empfundenen Unabhängigkeit von Subventionen und Verträgen (Sauvenier *et al.*, 2006). MOTIFS hingegen enthält einen expliziten Indikator zum empfundenen Entscheidungsspielraum (Meul *et al.*, 2008).

Das Thema «Sozialversicherung und Rente» wird von SALCAsustain, SMART und RISE teilweise abgedeckt. SALCAsustain enthält einen Indikator zur Altersvorsorge, während SMART einen Indikator zur sozialen Absicherung der Ehegatten und anderen Familienangehörigen verwendet (Schader *et al.*, 2016; Roesch *et al.*, 2016). RISE

beinhaltet entfernt implizit einen Indikator, der auch das Thema Altersvorsorge betrifft. Der Indikator prüft, ob das Einkommensniveau erlaubt, einen angemessenen Lebensstil zu führen, der nicht nur alltägliche Konsumentscheidungen, sondern auch die soziale Absicherung umfasst (Grenz *et al.*, 2012).

Ob die Hofnachfolge gesichert ist, wird von SMART, RISE und SAFE explizit anhand einer Frage abgedeckt. Ähnlich ist es beim Thema «Verfügbarkeit von Arbeitskräften», das von SMART und RISE explizit durch eine Frage zur Knappheit von Arbeitskräften abgedeckt wird (Schader *et al.*, 2016; Grenz *et al.*, 2012). IDEA beinhaltet zwei Indikatoren, die das Thema berühren: zum einen die Arbeits(ver)teilung und zum anderen das Management von Angestellten und der Beitrag zur Arbeitsplatzschaffung. Daher wurde das Tool als teilweise implizit dieses Thema abdeckend kategorisiert.

3.2.4 Operationalisierung und Aufwand für Datenerhebung

Der Blick in die Literatur und in vorhandene Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools verrät, dass zu Themen, die wichtig für Landwirtinnen und Landwirte sind, viel Material vorhanden ist. Viele Indikatoren sind bereits getestet oder in der Praxis angewendet worden, sodass auch deren Operationalisierung und Bewertungsskalen bekannt sind. In Tabelle 10 sind einige Beispiele für Indikatoren und deren Operationalisierung sowie Referenzwerte genannt. Die meisten Bewertungsskalen sind einfach, indem es sich um eine binäre Ja/Nein-Frage oder eine Frage handelt, bei der die Antwort einen bestimmten kategorischen Wert erreichen sollte.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Nachhaltigkeitsmessung ist der Aufwand für die Datenerhebung. Der Nachhaltigkeitsindikator Arbeit (NIA), der den Arbeitszeitbedarf mit der verfügbaren Arbeitszeit abgleicht, ist sowohl für Betriebe als auch für die Politik nutzbar. Die Forschungsgruppe Sozioökonomie bei Agroscope arbeitet zurzeit daran, den NIA für grosse Stichproben automatisiert zu berechnen, was eine Aussage über die Arbeitszeitsituation grosser Teile der Betriebe ermöglicht. Mit wenigen Schwierigkeiten verbunden scheint auch eine Einbindung einer automatisierten Berechnung eines betriebsspezifischen NIA in Betriebsmanagement-Informationssysteme, wenn Schnittstellen zu Arbeitszeiterfassungsprogrammen hergestellt werden können.

Ein weiterer Indikator, der mit wenig Zusatzaufwand für die Datenerhebung verbunden ist, ist der Isolationsindikator, den Dillon *et al.* (2010) anhand eines Datensatzes der Irischen nationalen Landwirtschaftserhebung berechnet haben. Denkbar ist, dass der Indikator für die Schweiz berechnet werden kann, wenn eine Vernetzung von Daten des Agrarpolitischen Informationssystems (AGIS) und Meldedaten ermöglicht würde. Dieser Indikator ist jedoch für die Betriebe uninteressant, während er für ein nationales Nachhaltigkeitsmonitoring von Interesse sein könnte. Eine theoretische Fundierung des Indikators wird jedoch vor der Verwendung empfohlen.

Tab. 10: Indikatoren für Themen, die den Landwirtinnen und Landwirten wichtig sind, mit bereits getesteten Skalen.

Thema	Indikator	Operationalisierung	Aufwand Datenerhebung	Quelle
Work-Life-Balance	Nachhaltigkeitsindikator Arbeit (NIA)	$NIA = \frac{\text{nötige Arbeitskraftstunden}}{\text{verfügbare Arbeitskraftstunden}}$ Berechnung der nötigen Arbeitskraftstunden über LabourScope, verfügbare Arbeitskraftstunden per Betriebsangaben, Zentrale Auswertung Buchhaltungsdaten oder AGIS Referenzwert: ≥ 0.6 bis < 0.9	Mittel, automatisierte Berechnung mit bereits vorhandenen Daten möglich	Roesch <i>et al.</i> (2016) und Umstätter <i>et al.</i> (2022)
	Arbeitszeit der auf dem Betrieb Beschäftigten	Wie viele Stunden beträgt die Wochenarbeitszeit für familieneigene Arbeitskräfte und jeden Ihrer familienfremden Angestellten im Jahresdurchschnitt? Referenzwert: Höchstarbeitszeit 48 Std./Woche (ILO-Konvention 1, Art. 2)	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Roesch <i>et al.</i> (2016), alternativ: Grenz <i>et al.</i> (2012), Schader <i>et al.</i> (2016)
	Urlaub der auf dem Betrieb Beschäftigten	Wie viele Ferien hat jeder Ihrer familienfremden Angestellten pro Jahr? Wie viele Ferien nehmen der Betriebsleiter/die Betriebsleiterin und familieneigene Arbeitskräfte pro Jahr? Referenzwert: vier Wochen Urlaub im Jahr, < 20 und > 50 Jahre: fünf Wochen Urlaub im Jahr	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Roesch <i>et al.</i> (2016), alternativ: Grenz <i>et al.</i> (2012), Schader <i>et al.</i> (2016)
	Kompensation Überzeiten	Werden die Überstunden der familienfremden Arbeitskräfte auf der Lohnabrechnung stets ausgewiesen und können diese ihre Überstunden kompensieren oder mit einem Zuschlag auf den Normallohn von mindestens 25 % auszahlen lassen? Referenzwert: Ja	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Roesch <i>et al.</i> (2016), alternativ: Grenz <i>et al.</i> (2012), Schader <i>et al.</i> (2016)
Beziehungen	Zufriedenheit mit den sozialen Beziehungen	Einschätzung der Zufriedenheit und Wichtigkeit auf einer 5-Punkte Skala (analog zum Lebensqualitätsindex), Unterscheidung zwischen Beziehungen zu auf dem Betrieb Beschäftigten, den Nachbarn und der Gemeinde, Zulieferern und Abnehmern und Konsumenten möglich Referenzwert: über 0	Hoch, Daten müssen erhoben werden	BLW (2013), alternativ: Roesch <i>et al.</i> (2016), Grenz <i>et al.</i> (2012)
	Isolation	Anteil an Einpersonenhaushalten Referenzwert: nicht eindeutig (möglichst gering)	Gering, Meldestatistiken und Adressen	Dillon <i>et al.</i> (2010)
Sozialversicherung und Rente	Altersvorsorge	Wie viele Franken konnte Ihr Haushalt im vergangenen Jahr in die Vorsorge einzahlen/investieren? Referenzwert: über 0, aber sonst kein klarer Wert	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Roesch <i>et al.</i> (2016)
	Sozialversicherung/soziale Absicherung	Ist der Ehegatte/die Ehegattin und andere abhängige Verwandte des Betriebsleiters/der Betriebsleiterin im Falle des Todes oder der Scheidung finanziell abgesichert? Referenzwert: Ja	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Schader <i>et al.</i> (2016)

Thema	Indikator	Operationalisierung	Aufwand Datenerhebung	Quelle
Entscheidungsfreiheit	Entscheidungsspielraum	Entscheidungsspielraum bzgl. Einkommen, Auto, Waren, Reisen, Sorten/Rassen, Düngung, Pflanzenschutz, Vermarktung, Arbeitsorganisation, Technologie (bisher nicht für Tierhaltung) Referenzwert: Bewertung von mindestens 30 für den einfachen Indikator	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Mann und Rödiger (2024)
Zufriedenheit	Wichtigkeit und Zufriedenheit	12 Lebensbereiche werden anhand einer 5-Punkte-Skala bewertet, daraus wird der Lebensqualitätsindex berechnet Referenzwert: > 0	Hoch, Daten müssen erhoben werden	BLW (2013)
Hofnachfolge	Hofnachfolge	Ist die Hofnachfolge organisiert? (wenn Betriebsleiter/in > 55 Jahre) Referenzwert: Ja	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Grenz <i>et al.</i> (2012)
Verfügbarkeit von Arbeitskräften	Arbeitskräftemangel	Gab es in den letzten fünf Jahren einen Arbeitskräftemangel, der nicht behoben werden konnte? Referenzwert: Nein	Hoch, Daten müssen erhoben werden	Schader <i>et al.</i> (2016)

3.2.5 Fazit

Im Bereich der sozialen Nachhaltigkeit der Landwirtschaft gibt es Aspekte, die auf dem Betrieb Beschäftigte betreffen, und solche, die andere Stakeholder-Gruppen tangieren. Eine Nachhaltigkeitsbewertung sollte beides beinhalten (Bathaei & Štreimikiene, 2023; Lebacqz *et al.*, 2013). Im vorliegenden Kapitel haben wir uns auf die Themen, die für auf dem Betrieb Beschäftigte wichtig sind, beschränkt und untersucht, in welchem Mass sie von Indikatorensets von sieben Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools abgedeckt werden. Da die Mehrheit der Schweizer Landwirtschaftsbetriebe Familienbetriebe sind (BFS, 2014), sind die auf dem Betrieb Beschäftigten vor allem die Betriebsleitenden und ihre Familien.

Unsere Analyse hat ergeben, dass die Themen sozialer Nachhaltigkeit, die wir aus bestehender Literatur für Betriebsleiterinnen bzw. Betriebsleiter und ihre Familien als relevant identifiziert haben, in einem der sieben betrachteten Nachhaltigkeitsbewertungstools enthalten sind. Die anderen Indikatorensets beinhalten einige, aber nicht alle der identifizierten Themen. Dies kann damit gerechtfertigt werden, dass die Anzahl der Indikatoren aus Gründen der Praktikabilität auf das Nötigste beschränkt werden sollte und dass sowohl die Anteile der Nennung eines Themas an der Anzahl der Gesamtnennungen als auch die Bewertung verschiedener Themen hinsichtlich ihres Belastungsgrads für Frauen in der Landwirtschaft zeigten, dass die Themen «Work-Life-Balance» und «Beziehungen» für Familienbetriebe wichtiger sind als die Entscheidungsfreiheit, die Hofnachfolge oder die Verfügbarkeit von Arbeitskräften. Weiterhin sind für alle identifizierten Themen Indikatoren mit bereits entwickelten Bewertungsskalen in der Literatur oder eine Dokumentation der Nachhaltigkeitsbewertungs-Tools vorhanden. Der Fokus hier lag auf Indikatoren, die auf Betriebsebene verwendet werden können.

Die Daten für die Indikatoren der sozialen Nachhaltigkeit müssen in der Regel von den Betrieben erhoben bzw. zusätzlich von den Betriebsleitenden eingegeben werden, was mit erhöhtem Aufwand verbunden ist. Die Wichtigkeit des Themas «Beziehungen» zeigt, dass eine aussagekräftige Nachhaltigkeitsbewertung nicht ohne zusätzlichen Aufwand für Datenerhebung/-eigabe auskommen wird. Eine Ausnahme bildet der Nachhaltigkeitsindikator Arbeit, der das Potenzial zu einer automatisierten Berechnung hat, falls Programme zur Arbeitszeiterfassung mit Informationen zum Betrieb verknüpft werden und in ein Berechnungsprogramm überführt werden können. Daran anknüpfend sind zudem die anderen Indikatoren zu den durchschnittlichen Wochenarbeitsstunden und Ferien potenziell automatisiert berechenbar, wenn Programme zur Arbeitszeiterfassung mit einem entsprechenden Berechnungsprogramm verknüpft werden können.

Landwirtschaftsbetriebe werden nur selten von Frauen geführt. Im Jahr 2013 waren es weniger als 10 % der Betriebe (BFS, 2014; BLW, 2022), und es ist nicht zu erwarten, dass sich diese Zahl seither deutlich verändert hat. Jedoch gehen wir davon aus, dass Themen, die für Frauen in der Landwirtschaft von Bedeutung sind, in unserer Analyse nicht unterrepräsentiert sind. Denn von den vier Studien, die Informationen zu den für die Betriebsleitenden und deren Familien wichtigen sozialen Nachhaltigkeitsthemen lieferten, richtete eine ihre Befragung an Betriebsleitende (Saleh & Ehlers, 2023), eine Studie enthielt keine detaillierten Informationen zur Geschlechtsverteilung und richtete sich an Landwirtinnen und Landwirte (Baccar *et al.*, 2020), während die zwei anderen Studien Frauen explizit mitberücksichtigten, indem die Bauernfamilien (Contzen & Häberli, 2021) oder sowohl männliche als auch weibliche Personen an der Studie teilnahmen (fast 40 % Frauen in Yamaguchi *et al.*, 2020). Zudem flossen die Erkenntnisse der Studie des BLW (2022) zur Situation der Frauen in der Landwirtschaft mit in die Analyse ein.

3.3 Ökonomische Indikatoren

Autorin: Manika Rödiger

3.3.1 Verwendete Indikatoren

Die Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit von landwirtschaftlichen Betrieben zielt auf eine Aussage über deren langfristige Existenzfähigkeit ab (Latruffe *et al.*, 2016; Spicka *et al.*, 2019). Dafür spielt die wirtschaftliche Lage des Betriebs eine wichtige Rolle, aber auch dessen Fähigkeit ökonomisch risikoreiche und veränderungsvolle Zeiten zu überstehen. Denn die Existenzfähigkeit eines Betriebes hängt teilweise von externen Faktoren ab, beispielsweise von Preisschwankungen, schwankenden Ernteerträgen oder sich ändernden politischen Rahmenbedingungen (Latruffe *et al.*, 2016; Bathaei & Štreimikiene, 2023). Kann ein Betrieb Schwankungen von relevanten externen Faktoren überstehen und seine Wirtschaftlichkeit aufrechterhalten, ist er ökonomisch resilient (Slijper *et al.*, 2022). Daher werden im Folgenden nicht nur Indikatoren zu Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit, sondern erweiternd auch Indikatoren der ökonomischen Resilienz eines Betriebes vorgestellt. Die Auswahl basiert zum einen auf den Indikatoren aus dem Projektbericht «Umfassende Beurteilung der Nachhaltigkeit von Landwirtschaftsbetrieben» (Roesch *et al.*, 2016, 2017), da diese Auswahl für den schweizerischen Kontext erstellt wurde. Zum anderen erfolgte die Auswahl weiterer Indikatoren auf einer Literatursuche, in der wissenschaftliche Zeitschriftenartikel zu dem Thema herangezogen wurden. Sowohl die momentane ökonomische Lage eines Betriebs als auch seine langfristige Existenzfähigkeit und Resilienz können auf der Ebene des gesamten Betriebs oder auch auf der Ebene von Betriebszweigen analysiert werden.

Im Bericht «Umfassende Beurteilung der Nachhaltigkeit von Landwirtschaftsbetrieben» (Roesch *et al.*, 2016, 2017) werden je zwei Kennzahlen aus den Bereichen Rentabilität, Liquidität und Stabilität beschrieben (Tab. 11). Ein Blick in die wissenschaftliche Literatur über ökonomische Nachhaltigkeitsindikatoren für Landwirtschaftsbetriebe der letzten zehn Jahre bringt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, folgende weitere ökonomische Indikatoren hervor: die Produktivität, die Autonomie oder Marktorientierung, die Diversifikation und die Wahrscheinlichkeit der Hofübergabe (Alaoui *et al.*, 2022; Latruffe *et al.*, 2016; Lynch *et al.*, 2019ab; Paracchini *et al.*, 2015; Spicka *et al.*, 2019). Mit der Produktivität wird gemessen, ob der Betrieb in der Lage ist mit den Produktionsfaktoren Output herzustellen (Latruffe *et al.*, 2016). Die Autonomie oder der Abhängigkeitsgrad kann durch den Anteil der erhaltenen Direktzahlungen am Betriebseinkommen gemessen werden (Dillon *et al.*, 2010; Latruffe *et al.*, 2016; Spicka *et al.*, 2019). Die Marktorientierung misst das Gegenteil, also den Anteil des Einkommens, der nicht durch Direktzahlungen generiert wird (Lynch *et al.*, 2019a). Mit Diversifikation kann die Erweiterung um weitere Betriebszweige und/oder Vermarktungskanäle gemeint sein (Alaoui *et al.*, 2022; Slijper *et al.*, 2022). Beides reduziert das Einkommensrisiko. Bestehende Nachhaltigkeitsbewertungstools weiten teilweise den engen Fokus auf die wirtschaftliche Lage des Betriebs durch Indikatoren zu den Themen Rückverfolgbarkeit, Lebensmittelsicherheit, Investition in die nachhaltige Entwicklung der jeweiligen Gemeinde, die Wirkung des Betriebs auf die lokale Wirtschaft und ökonomisches Risiko durch den Verlust von Land durch beispielsweise Entwaldung, Erosion oder Waldbrände (Alaoui *et al.*, 2022).

Für die Bewertung der ökonomischen Resilienz landwirtschaftlicher Betriebe gibt es Indikatoren mit einem offensichtlichen Bezug zur wirtschaftlichen Lage eines Betriebs, wie z. B. Erholung der Rentabilität nach einem ökonomischen Schock oder der ökonomische Ertrag pro Grossvieheinheit (GVE) oder pro Hektar (ha). Andererseits gibt es auch Indikatoren mit einem weniger offensichtlichen Bezug zur wirtschaftlichen Betriebslage, wie die Änderung des Anteils an betriebseigenem Futter oder des Anteils der bewässerten Fläche (Meuwissen *et al.*, 2019; Slijper *et al.*, 2022). Beide Beispiele messen die Fähigkeit eines Betriebs zur Anpassung an neue ökonomische Bedingungen. Das gleiche gilt auch für die Indikatoren, Änderung in der Vielfalt der angebauten Feldfrüchte und Änderungen in den Kosten für Dünger, Pflanzenschutzprodukte und Energie (Slijper *et al.*, 2022). Einige Indikatoren werden in der wissenschaftlichen Literatur sowohl für die Messung der Nachhaltigkeit als auch für die Messung der Resilienz verwendet.

3.3.2 Resultate und Diskussion

In Tabelle 11 sind Indikatoren der ökonomischen Nachhaltigkeits- und Resilienzbewertung aufgeführt, die auf Basis der durch die Zentrale Auswertung von Buchhaltungsdaten (ZA-BH) erhobenen Informationen berechnet werden können. Wie aus Tabelle 11 ersichtlich wird, lassen sich eine recht grosse Anzahl an Indikatoren auf Basis der Erhebung der ZA-BH berechnen. Die geschichtete Zufallsstichprobe der ZA-BH umfasst mehr als 2000 Betriebe in

der Schweiz (Renner *et al.*, 2018). Sicherlich gibt es eine deutlich grössere Anzahl an Betrieben, welche die für die Berechnung der Indikatoren nötigen Informationen im Rahmen ihrer Buchhaltung zusammenstellen. Es ist jedoch nicht bekannt, ob diese Daten digital und in einer für eine Nachhaltigkeitsbewertungssoftware nötigen Form vorliegen. Dies zu klären, wäre eine Aufgabe für zukünftige Forschung. Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem in der Erstellung von betriebstypspezifischen Referenzwerten, die beispielsweise durch ein Benchmarking errechnet werden könnten.

Tab. 11: Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit und Resilienz (basierend auf Meuwissen *et al.*, 2019; Sau *et al.*, 2023; Slijper *et al.*, 2022 und Zorn *et al.*; 2016).

Indikatorthema	Indikatorbestandteile
Rentabilität	Arbeitsverdienst je Familien-Arbeitskraft
	Gesamtkapitalrentabilität
Liquidität	Cashflow-Umsatzrate
	Dynamischer Verschuldungsgrad
Stabilität	Anlagenintensität
	Anlagendeckung
Autonomie	Anteil Direktzahlungen am Betriebseinkommen
Marktorientierung	Anteil des Betriebseinkommens, das nicht aus Direktzahlungen stammt
Diversifikation	Anzahl verschiedener Feldfrüchte
	Anzahl Betriebszweige (Ackerbau, Futterbau, Milchviehhaltung, Schweinehaltung, Geflügelhaltung, Waldbewirtschaftung, etc.)
Effizienz	Kosten pro Grossvieheinheit
	Kosten für Pflanzenbau pro Hektar
	Ökonomischer Ertrag pro Hektar / Grossvieheinheit
Widerstandsfähigkeit	Robustheit (Prozentuale Reduktion der normalisierten Rentabilität)
	Erholung der Rentabilität ein Jahr nach ökonomischem Schock
	Anteil des Einkommens aus der Landwirtschaft
Anpassungsfähigkeit	Änderung in der Feldfruchtdiversität
	Änderung in den Grossvieheinheiten pro Hektar
	Änderung der Jahresarbeitseinheiten
Transformation	Änderung von konventionellem zu ökologischem Anbau
	Änderung des Betriebstypen

Es stellt sich bei der Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit von Landwirtschaftsbetrieben die Frage, ob, falls vorhanden, das ausserlandwirtschaftliche Einkommen miteinbezogen werden kann und soll. Denn das letztendliche Ziel der ökonomischen Nachhaltigkeit ist, dass der landwirtschaftliche Haushalt seine Bedürfnisse finanziell abdecken kann und, dass zukünftige Generationen über den Betrieb ebenfalls zumindest teilweise ihre Bedürfnisse finanziell abdecken können (Finger & El Benni, 2022). Daher wäre für die Bewertung das gesamte Haushaltseinkommen, also das landwirtschaftliche und ausserlandwirtschaftliche Einkommen, relevant (Dillon *et al.*, 2010; Hennessey *et al.*, 2008; Finger & El Benni, 2021, 2022). Allerdings ist diese Information sensibel und in vielen europäischen Ländern oft für die Bewertung nicht verfügbar. Dies ist in der Schweiz anders, denn hier wird das ausserlandwirtschaftliche Einkommen im Rahmen des landwirtschaftlichen Einkommensmonitorings, das von der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten (ZA-BH) durchgeführt wird, seit mehr als 30 Jahren systematisch erhoben. Im Rahmen der jährlichen Auswertungen der ZA-BH zur Einkommenssituation in der Landwirtschaft (z. B. Jan *et al.*, 2023) wird die ökonomische Nachhaltigkeit nicht nur auf Betriebsebene (landwirtschaftliches Einkommen) sondern auf Haushaltsebene (Gesamteinkommen, das aus dem landwirtschaftlichen und ausserlandwirtschaftlichen Einkommen besteht) bewertet.

Bei der Beurteilung der einkommenspolitischen Zielerreichung, die derzeit auf den Landwirtschaftsbetrieb fokussiert, plant der Bundesrat die Perspektive auf den gesamten landwirtschaftlichen Haushalt im Sinne eines Sozialmonitoring zu erweitern. Im Rahmen dieses Sozialmonitoring soll die Entwicklung des Haushaltseinkommens der landwirtschaftlichen Haushalte im Vergleich zur Gesamtbevölkerung beobachtet werden (Bundesrat, 2024).

3.3.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine breite Basis an entwickelten Indikatoren für die Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit und Resilienz von landwirtschaftlichen Betrieben vorhanden ist. Das Indikatorenset von Zorn *et al.* (2016) wurde bereits auf zehn Betrieben getestet (Roesch *et al.*, 2018) und die Anwendbarkeit damit unter Beweis gestellt. Allerdings sollten für die Anwendbarkeit für Betriebsleiter und politische sowie nicht-politische Organisationen Referenzwerte zur Beurteilung der Ergebnisse erarbeitet werden. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten des Ansatzes von Zorn *et al.* (2016) sind ebenfalls in der Aggregation der einzelnen Indikatorbestandteile vorhanden, um den Anwendern einen schnelleren Überblick zu erleichtern. Das Indikatorenset von Zorn *et al.* (2016) enthält einen Indikator zur Resilienz (Stabilität). Das Thema ökonomische Resilienz könnte durch Hinzuziehen weiterer Resilienzindikatoren, beispielsweise Rentabilitätsentwertung nach Schock, stärker abgedeckt werden. Je nach Interessenslage können die Indikatoren um weitere ergänzt und so weitere Nachhaltigkeitsthemen abgedeckt werden.

3.4 Nutzen von Indikatoren zur Nachhaltigkeitsbewertung

Autoren: Stefan Mann, Thomas Nemecek, Andreas Roesch

3.4.1 Einleitung

Für eine umfassende quantitativ ausgerichtete Nachhaltigkeitsbewertung auf Betriebsebene werden sauber definierte Indikatoren sowie deren Bewertungsskalen benötigt. Natürlich ist bei der Auswahl der Bewertungskontext zu berücksichtigen. In diesem Abschnitt sollen einige Anmerkungen zusammengefasst werden, die wichtig sind, wenn mit den Indikatoren in einem Bewertungszusammenhang gearbeitet wird.

3.4.2 Zum geographisch-organisatorischen Bezugsrahmen

Der Fokus des Forschungsprogramms Indicate liegt auf dem landwirtschaftlichen Betrieb. Der Betrieb ist eine sinnvolle Einheit, weil das Management hauptsächlich auf dieser Ebene erfolgt und auch die meisten Direktzahlungen und agrarpolitischen Massnahmen hier ansetzen. Der Betrieb ist am besten geeignet, um die Wirkungen auf die soziale und ökonomische Nachhaltigkeit zu beschreiben. Betriebswirtschaftliche Entscheide werden auf Betriebsebene gefällt und die soziale Dimension ist eng mit den Arbeitskräften auf dem Betrieb verknüpft.

Bei den Indikatoren für die Auswirkungen auf die Umwelt verhält es sich hingegen meist anders: viele sind relevant auf der Ebene des Schlags oder der Kultur, was beispielsweise auf Indikatoren für den Boden, die Düngung oder den Pflanzenschutz in besonderem Masse zutrifft. Bei Indikatoren für Biodiversität ist wiederum der landschaftliche Kontext von grosser Bedeutung. Nicht-arrundierte Betriebe sind für diese Aspekte als Bezugsgrössen eher ungeeignet. Für Umweltaspekte der Tierhaltung hat der Betrieb eine grosse Bedeutung, weil die Tiere auf einem Betrieb gehalten werden und nur im Fall von Beweidung zeitweise einem bestimmten Schlag zugeordnet werden können. Aber auch hier ist die Abgrenzung des Betriebs nicht immer eindeutig, z. B. bei Sömmerungsweide oder bei Aufzuchtverträgen.

Im SALCA-Konzept beispielsweise erfolgt die Analyse der landwirtschaftlichen Betriebe auf vier Ebenen: Parzelle, Kultur, Tiergruppe und gesamter Betrieb (Nemecek *et al.*, 2024). Aus Sicht der Wertschöpfungskette und der Abnehmer landwirtschaftlicher Produkte sind Produktgruppen geeignetere Einheiten als die Betriebe (Pedolin *et al.*, 2021). Es gibt kaum einen Betrieb mit nur einem Produkt. Es ist daher wichtig, den geeigneten Bezugsrahmen je nach Zielsetzung und Dimension der Nachhaltigkeit zu wählen; der Betrieb ist nur teilweise geeignet, um die relevanten Aspekte abzubilden.

3.4.3 Einordnung im DPSIR-System

Seit die Unterscheidung zwischen Triebkräften, Belastung, Zustand, Auswirkung und Massnahmen durch die Einführung des DPSIR-Rahmens quasi institutionalisiert wurde (Vandermeulen, 1998), wurde dieser Rahmen oft zur Strukturierung ökologischer Kausalketten verwendet (siehe auch Kapitel 3.1). Es kann gezeigt werden, dass auf jeder einzelnen Stufe des DPSIR-Modells aussagekräftige Indikatoren bereitgestellt werden können (Mangi *et al.*, 2007).

Die Bedrohungen, denen unser Ökosystem ausgesetzt ist, können unter anderem durch physikalische, chemische oder biologische Zustandsgrößen wie etwa dem Nitratgehalt im Trinkwasser beschrieben werden. Wenn der Umfang bzw. die Schwere eines Problems interessiert, sind Indikatoren zu bevorzugen, die möglichst weit hinten in der Wirkungskette Triebkräfte → Belastung → Zustand → Auswirkung stehen. Statt der ausgebrachten Düngermenge, ein Druckindikator, ist es deutlich aussagekräftiger, die Wirkung auf das Wasserökosystem zu beschreiben (z. B. «Verlust der Biodiversität» infolge Algenblüte und induzierten Sauerstoffmangels). Sinngemäss gilt für soziale Indikatoren dasselbe. So ist der Indikator «Erhöhung der Lebenserwartung» (z. B. verursacht durch weniger Unfälle) aussagekräftiger als ein entsprechender Indikator am Anfang der Wirkungskette, z. B. «in die präventive Ausbildung investiertes Geld». Zustandsindikatoren können wichtige Anhaltspunkte über die Höhe der Wirkung geben. So liegt es nahe, dass bei einer hohen Pestizidbelastung im Grundwasser (ein Zustandsindikator) die Lebenserwartung der betroffenen Bevölkerung (ein Wirkungsindikator) abnimmt. Es kommt aber auch immer wieder vor, dass Indikatoren, die als Triebkräfte für oder Reaktion auf solche Zustandsvariable zu betrachten sind, mit den Zustandsvariablen nur unvollständig korrelieren (vgl. z. B. Raymond *et al.*, 2012) und daher als Nachhaltigkeitsindikatoren nur bedingt geeignet sind.

Oft ist es der Datenverfügbarkeit geschuldet, dass man sich trotzdem häufig für Indikatoren entscheidet, die Triebkräfte oder Massnahmen beschreiben. Es ist leichter zu bestimmen, wieviel Kilogramm Stickstoffdünger ein Landwirt bzw. eine Landwirtin ausgebracht hat (ein typischer Druck-Indikator), als die Konzentration von Nitrat im Grundwasser abzuschätzen (was ein Zustand-Indikator ist). Zudem können diese Indikatoren direkt mit bestimmten Handlungsoptionen verknüpft und sind dadurch direkt für einzelne Entscheidungsträger relevant. Wichtig ist jedoch festzuhalten: je weiter hinten die verwendeten Indikatoren in der Wirkungskette liegen, desto verlässlicher geben sie Auskunft über relevante Aspekte der Nachhaltigkeit.

3.4.4 Nutzen für verschiedene Zielgruppen

Für die verschiedenen Zielgruppen sind jeweils unterschiedliche Indikatoren relevant. Als Entscheidungshilfe sind Indikatoren besonders nützlich, wenn sie sich in konkrete Handlungsoptionen übersetzen lassen.

Auf Betriebsebene lassen sich die Bewirtschaftungsmassnahmen meist recht kurzfristig ändern. Strukturelle Anpassungen, beispielsweise der Bau eines neuen Milchviehstalls oder die Aufgabe der Milchproduktion, bedürfen langer Zeiträume. Der Standort eines Betriebs ist hingegen gegeben, er beeinflusst jedoch viele Nachhaltigkeitsindikatoren stark. Einen kausalen Zusammenhang zwischen Triebkräften wie Düngung und Zustandsindikatoren wie Nitratgehalt in einem Grundwasserleiter herzustellen, ist sehr schwierig. Deshalb beziehen sich typische Indikatoren für Betriebe oft auf Triebkräfte.

Für die Agrarpolitik gibt es weitere Entscheidungsräume: Welche Produktion in welcher Region angesiedelt werden soll oder welche Produkte aus inländischer Landwirtschaft stammen bzw. importiert werden sollen, lässt sich bis zu einem gewissen Grad mittels verschiedener agrarpolitischer Elemente beeinflussen. Hier gewinnen Zustandsindikatoren stark an Bedeutung.

Ähnliche Fragen stellen sich für Akteure der Wertschöpfungskette wie Verarbeiter oder Handel. Durch die Wahl der Produzenten für ein bestimmtes Produkt können sie die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit steuern, vorausgesetzt, sie verfügen über die notwendigen Informationen.

3.4.5 Zu Risiken und Nebenwirkungen

Indikatoren werden nicht nur für Vergleiche von Betrieben untereinander verwendet, sondern vor allem auch, damit Marktpartner und Regierungen sie verwenden können, im ersteren Fall für die Markenkommunikation, im zweiten Fall für die Ausrichtung von Direktzahlungen.

Da Indikatoren aus unterschiedlichen Gründen (z. B. fehlende Datengrundlage) ein (politisch) festgelegtes Ziel nur beschränkt umfassend beschreiben können, besteht die Gefahr, dass deren Anwendung eine Eigendynamik auslösen kann, in deren Rahmen zwar Indikatoren «erfüllt» werden, aber dies nicht wirklich zu einer Systemverbesserung führt. Entsprechende Schwachstellen wurden teilweise bereits benannt und sowohl für agrarsozialpolitische (Hagedorn, 1986) als auch agrarökologische (Mann, 2010) Fördertatbestände beschrieben.

Sobald Indikatoren in hierarchischen Settings, also zur Qualifikation von Betrieben und ihren Produkten mit staatlichen Stellen oder dem Detailhandel, verwendet werden, ist nicht mehr nur die Aussagekraft des Indikators zu

beachten, sondern auch Aspekte wie Kontrollierbarkeit und Missbrauchsanfälligkeit. Daher werden sich Indikatoren-sets zum internen Benchmarking von Betrieben stets von Indikatorensets von Label- oder Direktzahlungsprogrammen unterscheiden.

4 Datenflüsse und Farm Management Informations-Systeme

Die Entwicklung von Farm-Management-Informationssystemen (FMIS) startete vor über 30 Jahren mit ersten spezifischen Applikationen wie Feldkalendern, Kuh- und Sauenplanern, Fütterungsprogrammen, Düngungsplanern und Buchhaltungsprogrammen. Schritt für Schritt entwickelten sich die verschiedenen Applikationen weiter und wuchsen langsam zu umfassenderen Systemen zusammen, die von den Zulieferern bis hin zu den Abnehmern landwirtschaftlicher Produkte reichen (Abb. 19) (Eckelmann, 2020; Schulze Schwering *et al.*, 2022). Beispielsweise gleichen digitale Feldkalender heute automatisch ihre Grunddaten mit Pflanzenschutz- und Düngemitteldatenbanken ab und geben Daten oft weiter für die automatische Berechnung der Suisse-Bilanz. Des Weiteren werden Daten der Tierverkehrsdatenbank automatisch mit Herdenmanagementsoftware abgeglichen.

Nach wie vor bestehen im Bereich der Interoperabilität jedoch grosse Lücken. Viele einzelne Applikationen können ihre Daten nicht mit anderen Systemen verknüpfen und stellen somit Insellösungen dar. Doch es besteht das Potenzial, dass aus der grossen Fülle der Daten und deren Verbindungen wertvolle Informationen für das Management und das Monitoring der Betriebe gewonnen werden könnten. Wie die ökonomische Bewertung mittels Buchhaltungsprogrammen (Poppe *et al.*, 2023) könnte künftig auch die ökologische Bewertung ein Bestandteil der FMIS werden. Der Weg hin zu einem interoperablen, voll funktionsfähigen System ist in der Schweiz nach wie vor sehr weit. Neben der Gewinnung zusätzlicher Informationen gilt es gleichzeitig, den administrativen Aufwand zu reduzieren. Zurzeit muss die Praxis im Zuge von Kontrollen (z. B. Direktzahlungskontrollen der Kantone, Kontrollen von Labels) viele Einzeldaten teils mehrfach erfassen. Neben der digitalisierten und automatisierten Erhebung der Daten müsste deshalb das Generieren nützlicher Informationen und das Schaffen von interessantem Mehrwert für das Management und die Nachhaltigkeitsbewertung der Betriebe im Zentrum stehen. Dass nicht nur rein produktionstechnisch basierte Daten für die Ernährungswirtschaft relevant sind, zeigen beispielsweise das Projekt Klimastar Milch (www.klimastar-milch.ch), das die Treibhausgasbilanz der Milchproduktion berechnet, das Punktesystem «Klima- und Ressourcenschutz» von IP-Suisse (www.ipsuisse.ch/produzenten/anforderungen/#klima) oder das Agrarumweltmonitoring (www.agrarumweltmonitoring.ch). Der wachsende Bedarf solcher Betriebsinformationen wird sich nur durch ein hohes Mass an Digitalisierung effizient umsetzen lassen.

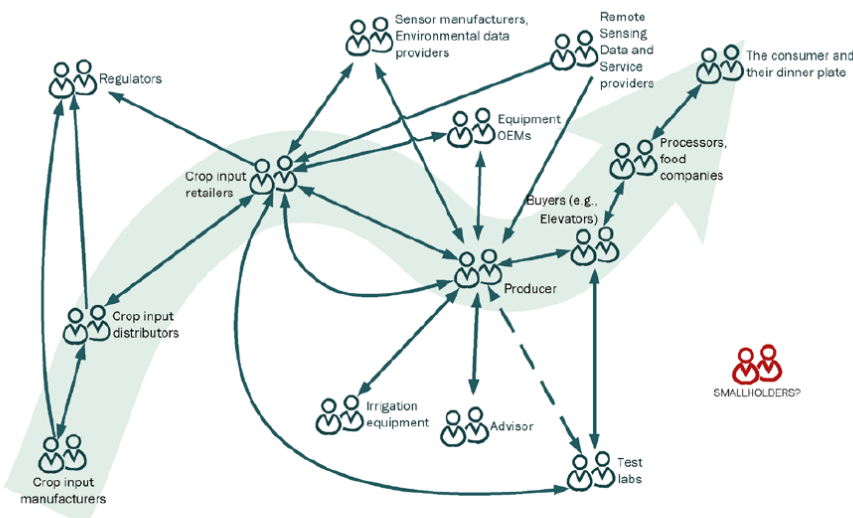


Figure 1: An example of stakeholders and data flows in an agrifood system. Very small producers (i.e., smallholders) are shown apart from the system to highlight the challenges associated with making the promise of smart farming and data-driven agrifood systems in general apply to them too.

Abb. 19: Netz der Interaktionen unterschiedlicher Player im System der Ernährungswirtschaft (Quelle: ISO, 2023).

4.1 Eignung für das betriebliche Management

Autorinnen und Autoren: Thomas Anken, Margret Keck, Anina Gilgen

4.1.1 Aktueller Stand des Datenmanagements auf Betrieben

Gemischtwirtschaftliche Landwirtschaftsbetriebe umfassen sehr vielfältige und unterschiedliche Produktionssysteme, die mit unterschiedlichsten Hilfsmitteln verwaltet und betrieben werden. Neben digitalen Hilfsmitteln zur Entscheidungsfindung, Steuerung und Dokumentation der Betriebsabläufe wie Fütterungsprogramme, Herdenmanagementsysteme oder Feldkalender, erfolgt in der Schweiz nach wie vor sehr viel auf analoge Weise. Bei der Nutzung digitaler Technologien ergab sich je nach Betriebszweig ein sehr heterogenes Bild (Groher *et al.*, 2020): Im Bereich Pflanzenbau nutzten Bergbetriebe diese im Vergleich zu Talbetrieben weniger, wie auch kleine Betriebe sowie Betriebszweige mit Wein- und Obstbau. Im Bereich der Tierhaltung ist die Nutzung in grösseren Beständen sowie vor allem in der Milchviehhaltung häufiger. Selbst auf digitalisierten Betrieben präsentiert sich in der Schweiz somit eine Datenlandschaft, die sehr heterogen durch unterschiedlichste Insellösungen geprägt ist. Die Durchgängigkeit der Datenflüsse ist gering. Die Umsetzung in die Praxis ist in vollem Gange, doch ist der Weg hin zu vollständigen interoperablen Systemen noch weit. Das Grundprinzip von «once only» (Wimer, 2021), das besagt, dass jeder Datensatz nur einmal erfasst und dann für alle weiteren Nutzungen zur Verfügung steht, ist noch längst nicht umgesetzt.

Die wichtigsten Hindernisse eines umfassenden digitalen Datenmanagements in der Landwirtschaft sind:

- Landwirtschaftliche Produktionssysteme sind komplex und werden von unterschiedlichsten natürlichen und technischen Parametern geprägt. Das Abbilden dieser sehr unterschiedlichen Systeme ist sehr anspruchsvoll und zeichnet sich durch viele betriebspezifische Gegebenheiten aus.
- Die Wertschöpfungsketten von den Zulieferern unterschiedlicher Maschinen, Betriebsmittel und Hilfsstoffe bis hin zu den Abnehmern landwirtschaftlicher Produkte sind vielfältig, uneinheitlich und dementsprechend anspruchsvoll zu managen.
- Es existieren viele Inselsysteme, die Interoperabilität weist grosse Lücken auf (Bundesrat, 2022; Boillat *et al.*, 2024).
- Die Semantik und Terminologie von Grundparametern wie Pflanzenschutz-, Dünge- und Futtermitteln ist nicht vereinheitlicht und erschwert den Datenaustausch (ISO, 2023).
- Kantonal spezifische Anforderungen und Förderprogramme erschweren eine Harmonisierung auf nationaler Ebene.
- Die Motivation der Betriebe, digitale Datenerfassungssysteme zu nutzen, um die landwirtschaftlichen Prozesse präziser und umfassender zu erfassen, kann nicht per se vorausgesetzt werden. Die Furcht, Daten preiszugeben, die als betriebseigene Daten angesehen werden, ist ein viel diskutiertes Thema (Bühlmann, 2024; Melzer *et al.*, 2023; Schulze Schwering *et al.*, 2022). Weiter bedeutet die Nutzung eines FMIS eine klare Initialinvestition und eine Veränderung der Datenerfassungsprozesse, was eine entsprechende Bereitschaft voraussetzt. Es stellt sich für die Betriebe die Frage, ob der zusätzliche Aufwand auch durch einen effektiven Mehrwert aufgewogen wird.
- Veränderungen in einzelnen Teilbereichen von komplexen vernetzten Gesamtsystemen (System im System) haben wiederum Auswirkungen auf andere Teilbereiche. Diese Interaktionen erschweren damit auch die Flexibilität und Offenheit für weitere Neuerungen oder schaffen Abhängigkeiten von den jeweiligen Anbietern.

4.1.2 Vision eines integralen Datensystems für Management und Nachweispflichten

Ein integrales, umfassendes Datenerfassungssystem sollte Daten möglichst zeitnah und während der Ausführung der Arbeiten/einzelnen Aktivitäten erfassen und den aktuellen Zustand des Betriebes und der ablaufenden Prozesse abbilden. Es soll das Management der Betriebe durch eine hohe Transparenz und verbesserte Entscheidungsgrundlagen unterstützen und die verschiedensten Nachweispflichten möglichst automatisch erfüllen.

Das Ziel dieser Vision lässt sich nur mittels einer durchgängigen Digitalisierung umsetzen, da ansonsten der administrative Aufwand stark steigen würde. Da dieselben Daten sowohl für das Management als auch für die

unterschiedlichsten Nachweispflichten dienen, können integrale Datenerfassungssysteme einen interessanten Mehrwert ohne administrativen Mehraufwand generieren:

- Dank einer besseren und schnell zugänglichen Dokumentation der unterschiedlichsten Daten resultieren Vereinfachungen und ein verbessertes datenbasiertes Management. Leistungsdaten von Tieren, Parzellenerträge, eingesetzte Hilfsstoffe, Futter- und Düngemittel können mit wenigen Klicks im Büro wie in Feld und Stall abgerufen werden und unterstützen die Betriebsleitenden bei ihren täglichen Entscheiden.
- Die Einbindung von Entscheidungsunterstützungssystemen in der Tierhaltung und im Pflanzenbau ermöglicht bis zu einem gewissen Grad eine Automatisierung von Kontrollaufgaben, d. h. ob Regelungen in Sachen Pflanzenschutz, Gewässerschutz, Fütterung etc. eingehalten werden.
- Nachweispflichten gegenüber Bund, Kantonen und Labels basieren überwiegend auf Standarddaten, lassen sich damit weitgehend automatisch erfüllen und können die administrative Last deutlich vermindern, vorausgesetzt, dass während des Produktionsprozesses die Daten vollständig erfasst wurden. Doch mit Standarddaten als Vorgabewerte kommen betriebsspezifische Besonderheiten eher ungenügend und damit auch kaum ein Optimierungspotenzial zum Tragen.
- Zusätzlich zu den bisher üblichen Auswertungen können mit den erfassten Daten Aussagen zu ökonomischen und ökologischen Aspekten der Betriebe gemacht werden.
- Durch das Einbinden von Sensoren und Maschinendaten lassen sich zusätzlich wertvolle Daten mit geringem Aufwand integrieren. Diese Daten können z. B. dazu verwendet werden, Pflanzenschutzmittel einzusparen, was einen ökonomischen und ökologischen Mehrwert hat.
- Mit einer Anbindung von meteorologischen Prognosemodellen, mit Standortinformationen und mit Einbezug von aktuellen Meteodaten können Entwicklungsstadien von Pflanzenbeständen, Zeitfenster von Bearbeitungs-, Pflanzenschutzmassnahmen und Erntetermine differenzierter geplant werden.

4.1.3 Datenerfassungssysteme

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlichster Datenerfassungssysteme, die sich laufend weiterentwickeln. Neben der eigentlichen Datenerfassung vor Ort ist auch die Übertragung der Daten via unterschiedliche Kommunikationsnetze wichtig.

- **Papier:** Händische Erfassung unterschiedlichster Produktionsparameter ist nach wie vor die dominante Form der Datenerfassung auf landwirtschaftlichen Betrieben. All diese Daten werden anschliessend in unterschiedlichste Applikationen eingetippt. Verlorene Zettel, vergessene Aufzeichnungen, die Ordnungshaltung und die Fehleranfälligkeit sind grosse Nachteile dieses Systems.
- **PC:** Viele Daten werden am Personal Computer in unterschiedlichsten Systemen wie Feldkalender, GIS-Systemen der Kantone, Buchhaltungsprogramme etc. erfasst.
- **Smartphone:** Das Smartphone mausert sich immer mehr zu einer zentralen Drehscheibe für das Datenmanagement auf den Betrieben. Feldkalender, Herdenmanager sowie unzählige Apps werden heute über das Smartphone bedient, was den grossen Vorteil hat, dass Daten während der Arbeit vor Ort erfasst werden können. Diese Art der Datenerfassung vor Ort bietet ein riesiges Potenzial, erfordert aber von den Nutzenden ein Umstellen ihrer Gewohnheiten.
- **Maschinenterminals:** Viele Maschinen wie Traktoren, Melksysteme, Fütterungscomputer und Erntemaschinen erfassen heute unzählige Daten, die leider für das Management des Betriebes nur unvollständig zur Verfügung stehen und häufig nicht mit anderen Systemen kompatibel sind.

4.1.4 Standardisierung der Daten

Wie eine strategische Arbeitsgruppe der ISO festhält (ISO, 2023), stellt die Normung von Agrardaten eine riesige Hürde dar. International werden grundsätzlich dieselben Futtermittel, Pflanzenschutz- und Düngemittel verwendet, doch bestehen dafür keine einheitlichen Taxonomien. Die verschiedenen Systeme verwenden für dieselben Dinge unterschiedliche Namen. Die Vereinheitlichung der Terminologie wird in der Schweiz durch die Organisation e-ch (www.ech.ch/de/der-verein/fachgruppen/agrardaten) vorangetrieben, was eine wichtige Grundvoraussetzung der Interoperabilität sein wird.

4.1.5 Verzahnung der vielen Insellösungen

Die Agricultural Industry Electronics Foundation (www.aef-online.org) ist daran, die Interoperabilität der technischen Systeme zu verbessern und zu standardisieren. Ein Beispiel ist das Funktionalitätenkonzept des «AEF ISOBUS», das Vereinheitlichungen für die Datenübermittlung per Bussystem erarbeitet. Leider ist die Maschinenlandschaft noch weit von einer einheitlichen Umsetzung der Datenstandards entfernt. Weitere Initiativen wie der «Agrirouter» (www.agrirouter.com), die sich als Antwort auf die proprietären Systeme grosser Hersteller sehen, belegen das Bestreben nach einheitlichen Standards, die für die Landwirtschaft sehr wichtig wären.

Eine grosse Herausforderung stellt die Integration der Buchhaltungssoftwares in FMIS dar. In der Schweiz gibt es über 30 unterschiedliche Softwares für die Führung der Buchhaltungen, was aufzeigt, wie zersplittert diese Landschaft ist. Ohne die Integration der Buchhaltungsdaten in die FMIS lassen sich Doppelerfassungen für Lagerbestände, Kosten und Erträge etc. nicht vermeiden. Die Ermittlung von Deckungsbeiträgen und Auswertungen, die ökonomische Parameter mit dem Management oder der Nachhaltigkeit verbinden, sind so nur erschwert möglich. Da die ökonomischen Indikatoren für ein Unternehmen von zentraler Bedeutung sind, stellt dies eine grosse Lücke dar.

4.1.6 Fallbeispiel «Datenfluss zwischen Tierhaltung und Pflanzenbau»

Auf der Swiss Future Farm in Tänikon wurden im Rahmen des Indicate-Projekts zur Plausibilisierung und Validierung von «Nährstoffmanagement Hofdünger» (vgl. Kap. 2.4) bei der Gülleausbringung Proben zu verschiedenen Zeitpunkten und an verschiedenen Orten im vielseitigen Betrieb gezogen und analysiert. Es resultierte eine grosse Streuung der Trockensubstanzgehalte zwischen 10 und 72 g/kg Gülle, was auf unterschiedlichen Eintrag von Meteor- und Prozesswasser in Gülle zurückzuführen ist. Die Variation zeigte sich im zeitlichen Verlauf wie auch zwischen verschiedenen Lagerorten. Parallel zum Trockensubstanzgehalt variieren auch die Nährstoffgehalte (z. B. Stickstoff). Während Richtwerte aus den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) (Carlen *et al.*, 2017) die Ausscheidungen bei Milchvieh als Hofdünger- und Nährstoffmengen pro Tierkategorie mit Jahresmilchleistung aufnehmen, werden die zusätzlichen Abwassermengen in der Vollzugshilfe baulicher Umweltschutz (BAFU & BLW, 2011) nur mit Blick auf die erforderlichen Lagerkapazitäten in Planungssituationen thematisiert. In der demgegenüber vereinfachten Suisse-Bilanz (Agridea & BLW, 2023) kann die Landwirtin und der Landwirt auf Jahresebene bei Verschiebung von Hofdüngern nur zwischen der Gülleverdünnung 1:1 oder 1:0.5 wählen. Hinzu kommt die einzelbetriebliche Konstellation je nach Fest-Flüssig-Trennung und Einstreumengen. Für eine datenbasierte, differenzierte Düngungsplanung fehlen den Betrieben wichtige Informationen oder einfache Hilfsmittel.

Im Folgenden werden Ansätze aufgezeigt, wie diese wichtigen betriebsspezifischen Daten für einen gezielteren Hofdüngereinsatz ermittelt oder zumindest besser abgeschätzt werden können.

- Datenerfassung des Prozesswasserverbrauchs als Hinweis auf den zusätzlichen Wassereintrag (Stallreinigung und Tierpflege, Reinigung von Melkanlagen, Milchtank, Melkstand und Warteraum, Haushaltsabwasser)
- Niederschlagsmengen und Meteorwassereintrag von Flächen (nicht überdachter Laufhof und Betonplatte von Gülle- und Mistlager)
- Füllstandssensor im Güllelager, um anhand der Zeit seit dem letzten Ausbringungstermin und den Niederschlagsmengen eine Korrektur bei der tatsächlichen Güllemenge unter Berücksichtigung der jeweiligen Verdünnung vorzunehmen

Innerhalb dieses Programms wurde in den Projekten «Nährstoffflüsse abbilden», «Nährstoffmanagement Hofdünger» und «Farm-Management-Informationssysteme» intensiv an der Erfassung der Nährstoffflüsse gearbeitet. Während des Nährstoffimports von Mineraldüngern und deren Ausbringung auf dem Feld einfach zu erfassen ist, stellt die Erfassung der Nährstoffflüsse über die Hofdüngerkette viel grössere Herausforderungen (Abb. 20).

Stofffluss und Kreislauf der Nährstoffe im Betrieb liessen sich künftig weitgehend automatisiert berechnen, wenn die auf verschiedenen Ebenen bereits erfassten Daten verknüpft würden: Die Futterrationsplanung mit Massen und Gehalten wird ergänzt mit den vorgelegten Futtermassen, erfasst über Waagen im Futtermischwagen, und mit Angaben von der Kraftfutterabrufstation vom Herdenmanagementprogramm. Die Anzahl Tiere kann aus der Tier-

verkehrsdatenbank bezogen werden. Die Ausscheidungen der Kühe lassen sich basierend auf den Resultaten von «Nährstoffmanagement Hofdünger» unter Berücksichtigung der Milchleistung modellieren. Als nächster Schritt muss noch die Gülleverdünnung korrigiert werden, da die Gülle durch Prozesswasser und häufig auch Meteorwasser zusätzlich verdünnt wird. Je nach Witterung und Jahreszeit kann die Verdünnung bis um einen Faktor 2–3 variieren. Mit der Ausbringung aufs Feld per Güllefass resultiert als nächster Schritt die Zuordnung von Mengen und Gehalten zu den einzelnen Parzellen. Im Vergleich zur aktuell gültigen Suisse-Bilanz, die eine vereinfachte und auf den Vollzug angepasste Anfalls-Bedarfs-Bilanz des gesamten Betriebes darstellt, wäre eine parzellenscharfe Düngebedarfsplanung und -bemessung ein grosser Fortschritt. Diese würde die Realität deutlich besser abbilden, da in der Praxis immer einzelne Parzellen für sich gedüngt werden und eine Verfeinerung der Düngeplanung somit gängige Praxis umsetzen würde. Methoden wie die korrigierte Düngungsnorm (Sinaj *et al.*, 2017) erlauben es, die parzellenspezifische Düngung in Abhängigkeit von Bodenbedingungen, klimatischen Bedingungen sowie der Bewirtschaftung anzupassen. Die hierfür benötigten Daten sind in FMIS bereits vorhanden oder könnten über Georeferenzierung verknüpft werden.



Abb. 20: Darstellung des Kreislaufs von Fütterung – Kuh Ausscheidung – Gülle (inkl. Verdünnung) zum Ausbringzeitpunkt – Feld – Futterlager.

4.1.7 Wie lässt sich Mehrwert für die Praxis generieren?

Die Oberziele des Prinzipes von «once only» und die Schaffung einer guten Interoperabilität unterschiedlicher Systeme ist unbestritten. Niemand mag es, dieselben Daten immer wieder für unterschiedliche Zwecke neu einzugeben. Ist ein Datensatz eines Feldes vollständig, so sollen sich daraus Nährstoffbilanzen, Pflanzenschutzindikatoren, Einhaltung der Fruchtfolge etc. automatisch berechnen lassen. Sowohl der Schweizerische Bauernverband (Boillat *et al.*, 2024) als auch der Bund (Bundesrat, 2022) unterstützen diese Ziele grundsätzlich. Die aktuell laufenden Diskussionen im Projekt Digiflux zeigen jedoch in aller Deutlichkeit, wie lange der zu gehende Weg noch ist, da teilweise die Bereitschaft nicht gegeben ist, Daten für die betriebliche Nährstoffbilanz (Suisse-Bilanz) jährlich an einen zentralen Server weiterzugeben (Bühlmann, 2024). Es stellt sich deshalb die wichtige Frage, wie sich für die Praxis Mehrwert generieren lässt und der Dokumentationszwang in den Hintergrund rückt.

Die beiden erfolgreichen Beispiele Agrarmonitor (www.agrarmonitor.de) und Gallo Support (www.ufarevue.ch/nutztiere/per-smartphone-das-gefluegel-managen) könnten als Vorbilder dienen. Die Software Agrarmonitor stellt Lohnunternehmern ein integrales System von der Auftragsaufnahme, Arbeitsplanung, Dokumentation der Ausführung bis hin zur Abrechnung zur Verfügung. Der gesamte Datenfluss wird durchgehend elektronisch abgewickelt. Trotz bedeutender Kosten hat sich dieses System in der Schweiz bei den Lohnunternehmern schnell durchgesetzt. Ein anderes Beispiel ist die App Gallo Support der fenaco, bei der die Eierproduzenten täglich die Anzahl produzierte Eier und die Abgänge an Geflügel erfassen, womit sie in Zusammenarbeit mit ihren Beratern die Produktion besser steuern und zu tätige Massnahmen ableiten können. Bei diesen beiden Applikationen ist es eine Selbstver-

ständigkeit, dass die Daten zentral gespeichert werden. Offenbar ist bei diesen Applikationen der Mehrwert so bedeutend, dass Bedenken bezüglich zentraler Datenablage in den Hintergrund getreten sind.

Im Bereich der Nährstoffe könnte der Weg eines umfassenden Düngemanagements einen solchen Mehrwert generieren. Dazu müsste die Düngung im Pflanzenbau in den Vordergrund treten und auch den Hofdüngerwert vollwertig mit einbeziehen, anstatt nur bei der Verschiebung zwischen Betrieben mit Konventionenwerten. Dabei ist es wichtig, den Schritt von der gesamtbetrieblichen Anfalls-Bedarfs-Bilanz hin zu parzellenspezifischen Bilanzen zu nehmen. Damit könnte der Praxis wertvolle Unterstützung bei der Düngung der einzelnen Parzellen geliefert werden und gleichzeitig könnten die Suisse-Bilanzen weitgehend automatisch berechnet werden. Dabei sollten auch Ertragspotenziale und ökonomische Parameter (Düngekosten) miteinfließen, damit die Attraktivität dieser Systeme auch für die betriebliche Entscheidungsfindung interessant wird. Die aktuelle Diskussion im Kontext von Digiflux (Salzmann, 2024) zeigt, dass die Herausforderungen gross sind und der unmittelbare Nutzen für die Landwirte und Landwirtinnen bisher nicht ausreichend integriert ist (im Gegensatz zum öffentlichen Anliegen Monitoring). Die Entfremdung der verschiedenen Akteure ist bedauerlich, da der sorgfältige Umgang mit Nährstoffen und deren ökonomischer Einsatz bei gleichzeitiger Reduktion der Umweltrisiken auch für die Praxis erstrebenswerte Ziele sind.

4.2 Eignung für das Agrar-Umwelt-Monitoring

Autorinnen und Autoren: Anina Gilgen, Thomas Anken, Silvio Blaser, Jérôme Schneuwly

4.2.1 Das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz

Das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) beruht auf der Verordnung über die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Landwirtschaft (SR 919.118) und erfasst, wie sich die Landwirtschaft auf die Umwelt über die Zeit auswirkt. Dabei wird die Umweltwirkung nicht direkt gemessen, sondern als potenzielle Wirkung anhand von Agrarumweltindikatoren, z. B. Treibhausgasemissionen oder Erosionsrisiko, berechnet. In die Berechnung der verschiedenen Agrarumweltindikatoren fliessen einzelbetriebliche Struktur- und Managementdaten ein (z. B. Tierbestand, Pflanzenschutzmitteleinsatz). Die Resultate werden pro Region oder Produktionssystem aggregiert. Das MAUS löst die Zentrale Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) ab, mit der zwischen 2009 und 2022 Daten erhoben worden sind. Der Übergang von ZA-AUI zu MAUS und die Unterschiede der beiden Systeme sind in Abbildung 21 dargestellt.

Das MAUS hat zum Ziel, soweit möglich bestehende Daten für die Berechnung der Indikatoren zu verwenden (Once-Only-Prinzip). Dadurch werden Mehrfacherfassungen reduziert, mit denen sich Landwirtschaftsbetriebe heutzutage konfrontiert sehen. Datenerhebungen werden gezielt durchgeführt, um Lücken zu schliessen. Des Weiteren werden bei der Erhebung von Daten vielfältige Methoden benutzt, um die passende Erhebungsmethode für die jeweilige Variable zu verwenden. Dabei werden explizit auch zukunftssträchtige Erhebungsmethoden berücksichtigt. Konkret werden im Rahmen von MAUS Online-Umfragen durchgeführt, Satellitendaten verarbeitet und Daten aus FMIS erhoben.

Die Indikatoren, die in MAUS berechnet werden, lassen sich aufgrund ihrer Umweltwirkung der lokalen, regionalen oder globalen Ebene zuordnen (Tab. 12). Insbesondere Bodenindikatoren, z. B. die Schwermetallbilanz, sind der lokalen Ebene zugeordnet, weil sie in erster Linie einen räumlich stark begrenzten Einfluss auf den betroffenen Boden haben. Indikatoren, die beispielsweise mit Nährstoffen oder Pflanzenschutzmitteln zusammenhängen, werden in vielen Fällen über Wasser oder Luft in andere Biotope (z. B. Gewässer) transportiert und führen innerhalb einer Region (z. B. Einzugsgebiet) zu Umweltproblemen wie Eutrophierung. Aus diesem Grund haben wir diese Indikatoren primär der regionalen Ebene zugeordnet. Die Trennung ist nicht scharf, denn beispielsweise kann Erosion auch zum Transport von Nährstoffen in Gewässer führen und so auch auf regionaler Ebene wirken. Der globalen Ebene sind Treibhausgase zugeordnet, die sich in der Atmosphäre verteilen und zu einem globalen Temperaturanstieg führen, sowie der Energiebedarf, der mit dem Abbau von weltweit begrenzten, nicht-erneuerbaren Ressourcen zusammenhängt.

Tab. 12: Übersicht der Agrarumweltindikatoren, die im MAUS berechnet werden. Die Indikatoren sind nach der primären räumlichen Skala ihrer Umweltwirkung gruppiert. Beispielsweise hat die Schwermetallbilanz primär einen lokalen Effekt auf den betroffenen Boden, während sich Treibhausgase in der Atmosphäre verteilen zu einem globalen Temperaturanstieg führen.

Lokal	Regional	Global
Humusbilanz Schwermetallbilanz Erosionsrisiko	Ammoniakemissionen Stickstoff-Bilanz Phosphor-Bilanz Nitratauswaschung Einsatz von Pflanzenschutzmitteln Risiken von Pflanzenschutzmitteln Biodiversität Nahrungsmittel- und Flächenkonkurrenz	Treibhausgasemissionen Energiebedarf

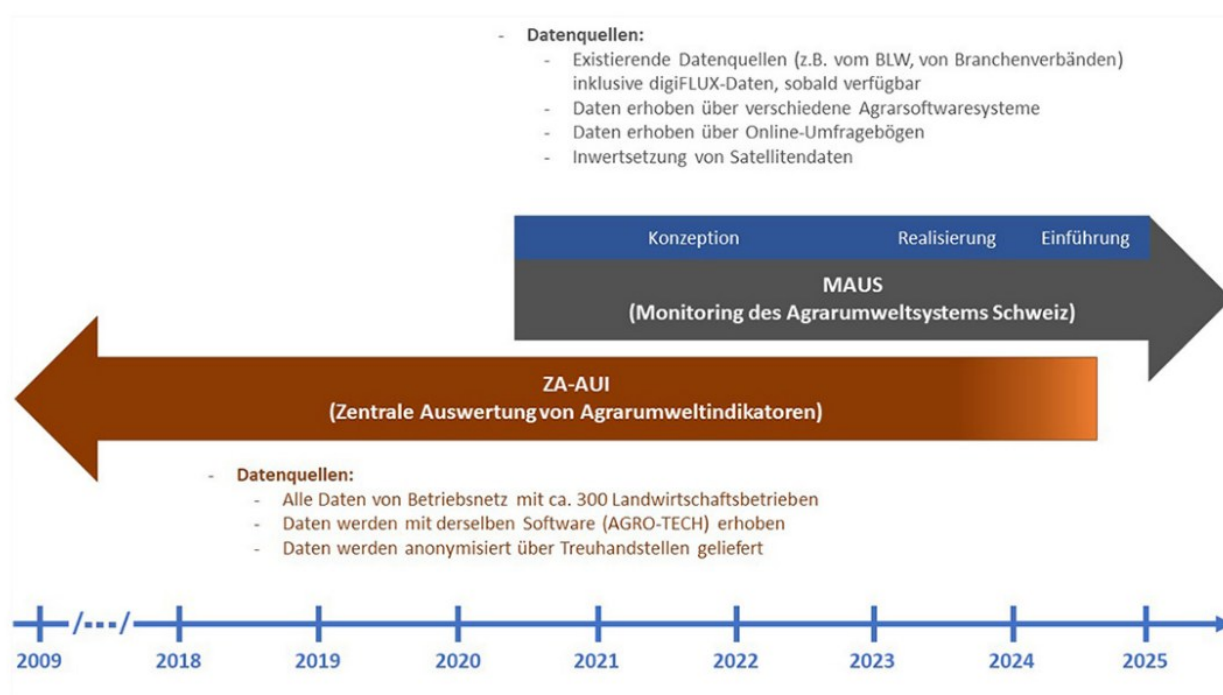


Abb. 21: Übergang von der Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) zum Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS). Beide Systeme haben zum Ziel, die Umweltwirkung der Schweizer Landwirtschaft für Regionen und Betriebstypen über die Zeit darzustellen.

4.2.2 Potenzial von Daten aus FMIS für das Monitoring Agrarumweltsystem Schweiz (MAUS)

FMIS sind insbesondere relevant, um Daten zu erheben, die räumlich und zeitlich hoch aufgelöst vorliegen müssen. Beispielsweise ist für die Berechnung des Risikos von Pflanzenschutzmitteln entscheidend, wann welches Produkt in welcher Menge mit welcher Methode auf welcher Parzelle ausgebracht wird. All dies beeinflusst den Pflanzenschutzmitteleintrag in empfindliche Ökosysteme. Ohne solch räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Daten wäre die Aussagekraft von MAUS stark eingeschränkt, weil entweder stark vereinfachte Indikatoren verwendet oder in der Berechnung komplexer Indikatoren sehr viele Annahmen getroffen werden müssten.

Im Bereich des Pflanzenbaus sind insbesondere digitale Feldkalenderdaten für MAUS von hoher Bedeutung. Im Feldkalender werden auf allen Schlägen alle durchgeführten Massnahmen mit Datum dokumentiert. Am wichtigsten für die Berechnung der Indikatoren sind Massnahmen zur Bodenaufbereitung und Saat, zur Düngung, zum Pflanzenschutzmitteleinsatz und zur Ernte. Je vollständiger die Massnahmen erfasst sind, desto verlässlichere Ergebnisse liefern die Modellberechnungen. Mindestens müssen die Mengen (z. B. eingesetzte Düngemenge,

geerntetes Produkt) erfasst werden und Angaben zu den Produkten vorliegen (z. B. W-Nummer bei Pflanzenschutzmitteln, Nährstoffgehalte von Düngemitteln). Georeferenzierte Feldkalenderdaten sind für MAUS wertvoller als nicht-georeferenzierte, weil sie mit anderen räumlichen Datenquellen verschnitten werden können. Dadurch können für jede Parzelle weitere Parameter wie die Hangneigung, der Abstand von einem Gewässer oder das vorherrschende Klima ermittelt werden. Diese Informationen werden beispielsweise für die Berechnung des Erosionsrisikos, des Pflanzenschutzmittlerisikos oder der Ammoniakemissionen benötigt.

Im Bereich der Tierhaltung sind verschiedene Daten, die in FMIS (potenziell) erfasst werden, für MAUS von Bedeutung. Das Auslauf- und Wiesenjournal liefert wertvolle Informationen, die beispielsweise für den Biodiversitätsindikator oder die Ammoniakemissionen relevant sind. Hierbei ist nicht nur relevant, an welchen Tagen Tiere auf der Weide waren, sondern auch die Anzahl Weidestunden sowie die Anzahl Tiere jeder Tierkategorie pro Weidefläche. In der Praxis kann die manuelle Erfassung dieser Daten insbesondere bei Weidesystemen wie Portionsweide sehr schwierig sein. Das Tracking der Tiere mittels GPS-Sensoren und die automatische Erfassung in den FMIS könnte in Zukunft Abhilfe schaffen. Auch Informationen zur Fütterung fliessen in die MAUS-Berechnungen ein. Der Zukauf von Futtermitteln ist beispielsweise für die Nährstoff-Bodenbilanzen wichtig. Des Weiteren lassen sich mit genauen Angaben zu den Rationen Nährstoffkonzentrationen im Hofdünger besser bestimmen, die in vielen Indikatoren benötigt werden.

4.2.3 Herausforderungen bei der Nutzung von FMIS-Daten für MAUS

Die Daten, die Betriebe in FMIS erfassen, gehören den Betrieben und liegen üblicherweise auf deren Computer, in der Cloud der FMIS-Anbieterin o. Ä. Agroscope kann somit aus technischer wie rechtlicher Sicht nicht auf bestehende FMIS-Daten zugreifen. Stattdessen müssen die Betriebe sich damit einverstanden erklären, Daten für MAUS zur Verfügung zu stellen. Dabei ist es wichtig, dass die Betriebe darüber informiert werden, für welchen Zweck die gelieferten Daten von wem verwendet werden dürfen. Ist ein Betrieb mit einer Datenlieferung an MAUS einverstanden, müssen die Daten aus externen Systemen in das Bundesnetz integriert werden.

Die Bereitstellung von FMIS-Daten für MAUS ist alles andere als trivial, weil die Daten in verschiedenen FMIS grösstenteils nicht standardisiert sind und in unterschiedlicher Form vorliegen. In MAUS müssen die Daten jedoch automatisiert verarbeitet werden können.

Des Weiteren werden in vielen FMIS noch nicht alle Daten erfasst, die für MAUS benötigt werden; manche Systeme lassen bei der Datenerfassung bewusst grosse Flexibilität zu und erlauben es Betrieben, nur die Angaben zu erfassen, die sie für nötig befinden. Die fehlenden Daten extra für MAUS zu erfassen, stellt einen Arbeitsaufwand für die Betriebe dar.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass auch FMIS-Datenerfassungen unvollständig und fehlerhaft sein können. Die meisten Einträge in FMIS werden zurzeit manuell gemacht, wodurch beispielsweise bei Mengenangaben Einheitenfehler passieren können.

Zurzeit ist es eine Herausforderung, eine genügend grosse Stichprobe von FMIS-Daten zu erheben, um verlässliche Datenauswertungen machen zu können. Erstens verwendet die Mehrzahl der Schweizer Betriebe noch keine FMIS. Zweitens bedeutet es für die Betriebe, wie oben erwähnt, meist einen zusätzlichen Aufwand, die Daten für MAUS zur Verfügung zu stellen. Drittens fürchten manche Betriebe, dass ihre gelieferten Daten für andere Zwecke benutzt werden als in der Datennutzungsvereinbarung festgelegt (z. B. für Kontrolle von Direktzahlungen).

4.2.4 Konzept der Einbindung von FMIS-Daten ins MAUS

Konzept der Datenübermittlung

Agroscope hat sich zum Ziel gesetzt, nach Möglichkeit Daten aus verschiedenen FMIS zu integrieren. Dadurch kann eine grössere Stichprobe erreicht werden, weil es mehrere FMIS auf dem Schweizer Markt mit einer nennenswerten Anzahl Nutzenden gibt. Auch gibt es dadurch keinen Wettbewerbsvorteil für ein einzelnes FMIS, denn Datenlieferungen an MAUS können für manche Betriebe einen Grund darstellen, ein bestimmtes FMIS zu verwenden. Die Betriebe, die in erster Linie FMIS-Daten erfassen, um diese an MAUS zu liefern, können das FMIS wählen, über das sie Daten bevorzugt liefern möchten. Nicht zuletzt ist es für MAUS weniger riskant, auf mehrere, statt ein FMIS zu setzen, sollte ein FMIS irgendwann nicht weitergeführt werden.

Wie oben geschildert unterscheiden sich die vorliegenden Daten von FMIS zu FMIS. Um Daten möglichst vieler FMIS nutzen zu können, ist es nötig, einen einheitlichen Standard zu verwenden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen von MAUS erste Datenstandards erarbeitet. Diese legen fest, welche Daten in welchem Format an MAUS geliefert werden können. Über API-Schnittstellen können FMIS die Daten im verlangten Format für MAUS zur Verfügung stellen. Bei Schnittstellen für verschiedene Datenquellen – z. B. Feldkalenderdaten oder Fütterungsdaten – müssen nicht zwingend alle FMIS alle Daten liefern (Abb. 22).

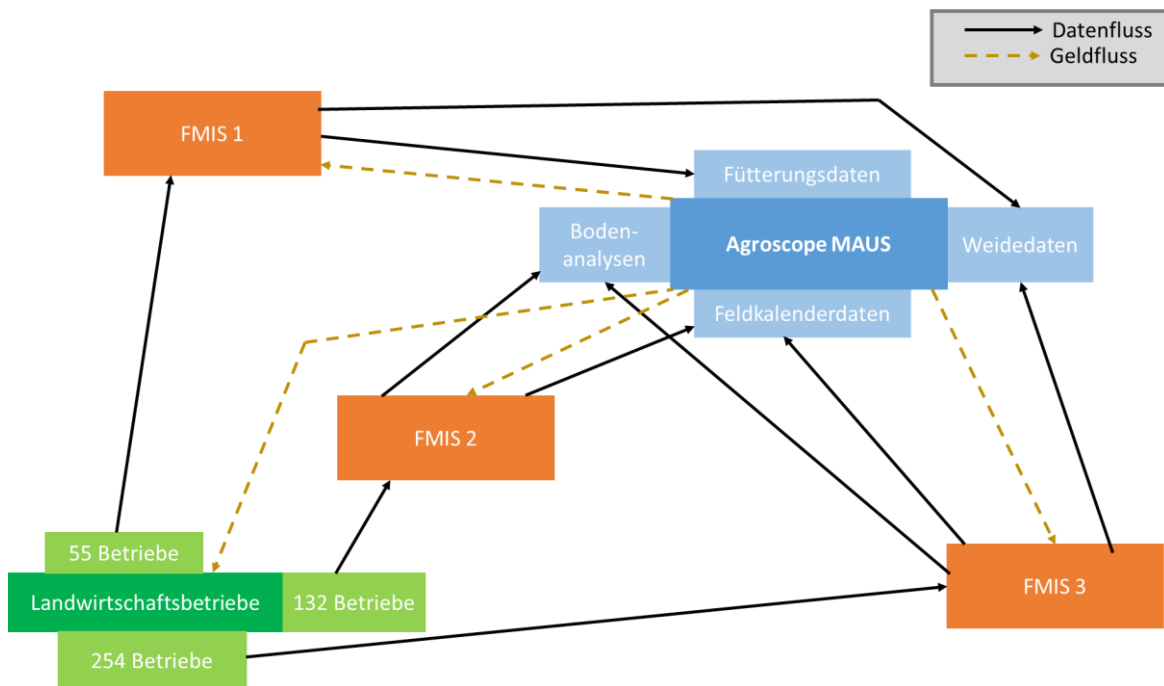


Abb. 22: Konzept, wie die Daten aus verschiedenen FMIS (Farm-Management-Informationssystemen) in Zukunft in das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) eingebunden werden könnten. Datenstandards und API-Schnittstellen ermöglichen es verschiedenen FMIS, die Daten in derselben Form an Agroscope liefern. Die Landwirtschaftsbetriebe können wählen, über welches FMIS sie Daten liefern wollen. Die Lieferung der Daten wird finanziell entschädigt.

Um über die API-Schnittstellen Daten liefern zu können, ist Programmierarbeit vonseiten der FMIS nötig. So müssen die bestehenden Daten in den geforderten Standard transformiert werden. Dazu zählen beispielsweise die Umrechnungen von Einheiten, Klassifizierungen von Produktionsmitteln (z. B. Düngertyp) oder Zuordnungen von Kulturen. Je nach FMIS müssen zusätzliche Datenerfassungen implementiert werden, um alle benötigten Daten an MAUS liefern zu können. Des Weiteren können bei den FMIS Kosten für automatisierte Datenqualitätskontrollen oder das Hosting von MAUS-spezifischen Modulen entstehen.

Konzept der Datenqualitätskontrollen

Die Erfahrung in der ZA-AUI hat gezeigt, dass Datenqualitätskontrollen für einzelbetriebliche Daten wichtig und aufwändig sind (Gilgen *et al.*, 2023a). Bei der Lieferung von FMIS-Daten an MAUS gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten, wie die Datenqualität kontrolliert werden kann:

- 1) Bei der Datenerfassung im FMIS können Einschränkungen oder Warnungen gemacht werden, um die Datenqualität zu verbessern. Beispielsweise kann beim Einsatz von Produktionsmitteln automatisiert überprüft werden, ob die eingesetzte Menge sich in einem realistischen Bereich befindet oder nicht. Auch bezüglich Datumsangaben von Massnahmen sowie Reihenfolgen von Aktivitäten auf dem Feld könnten Einschränkungen gemacht werden – beispielsweise, dass sich die Datumsangaben im Feldkalender auf das gelieferte Kulturjahr beschränken (Vermeidung Eintrag des falschen Jahres).
- 2) Die Mitarbeitenden von MAUS können die gelieferten FMIS-Daten mit standardisierten Tests sowie von Auge überprüfen und die Betriebe kontaktieren, wenn Lücken oder Fehler auftauchen.

In MAUS sollen soweit möglich Datenqualitätskontrollen direkt im FMIS angestrebt werden, da dies am effizientesten ist. Die Umsetzung von automatisierten Datenqualitätskontrollen in verschiedenen FMIS wie auch die Wartung sind jedoch komplex und zeitaufwändig. Eine nachfolgende visuelle Kontrolle der gelieferten Daten lässt sich somit kaum umgehen, um eine gute Datenqualität sicherzustellen.

Rechtliche Aspekte

Bevor die Betriebe Daten an MAUS schicken können, müssen sie sich mit der Datennutzung einverstanden erklären. Um das Once-Only-Prinzip durchzusetzen, werden die erhobenen Daten mit weiteren Daten des Bundes verknüpft (z. B. AGIS-Daten), die in der Verordnung über Informationssysteme im Bereich der Landwirtschaft (SR 919.117.71) festgelegt sind. Des Weiteren ist in der [Datennutzungsvereinbarung](#) festgelegt, dass die Daten in pseudonymisierter Form für Studien-, Forschungs- und Ausbildungszwecke an Hochschulen, Forschungsanstalten und Dritte, die im Auftrag des Bundes handeln, weitergegeben werden dürfen. Den Betrieben wird explizit zugesichert, dass ihre Daten nicht für einzelbetriebliche Kontrollzwecke verwendet (z. B. ÖLN-Kontrolle) und dass Ergebnisse nur in aggregierter und anonymisierter Form veröffentlicht werden dürfen.

4.2.5 Pilotprojekt mit barto

Um zu testen, ob das in Kapitel 4.2.4 skizzierte Konzept umsetzbar ist, wurde ein Pilotprojekt mit dem FMIS [barto](#) durchgeführt. Es testete, ob es möglich ist, Daten in einem vorher definierten Standard an Agroscope zu schicken. Für dieses Pilotprojekt hat man sich nur auf Feldkalenderdaten beschränkt, die für MAUS von grossem Nutzen sind.

Datenstandard

Im Datenstandard wurden Variablen auf drei Ebenen definiert: allgemeine Angaben über den Betrieb, Informationen zum Schlagregister sowie Massnahmen des Feldkalenders. In den allgemeinen Angaben sind das gelieferte Kulturland, die kantonale Betriebsnummer sowie Kontakt- und Zahlungsinformationen des Betriebs zu finden. Im Schlagregister sind insbesondere Informationen zur Geometrie der Schläge (Polygon, Fläche), zu den angebauten Kulturen und den Kulturlabels enthalten. Pro Schlag und Kultur gibt es im Schlagregister einen Eintrag. Werden beispielsweise auf demselben Schlag eine Hauptkultur und eine Zwischenkultur angebaut, gibt es zwei Einträge im Schlagregister; während die Schlaginformationen (z. B. Geometrie) in beiden Einträgen identisch sind, sind die Informationen zur Kultur unterschiedlich. Der Feldkalender enthält die meisten Informationen. Jede Massnahme, die auf dem Feld durchgeführt wurde, erhält einen eigenen Eintrag. Informationen, die für diese Art von Massnahme nicht relevant sind, werden leer gelassen. So sind bei der Lieferung einer Hofdüngerausbringung Informationen zum Schlag, zum Datum, zum Produkt und zur Ausbringungsmethode zwingend, während Variablen wie «Saat-Art» oder «W-Nummer-Pflanzenschutzmittel» leer gelassen werden, da nicht zutreffend. Ein stark gekürzter und vereinfachter Auszug aus dem Feldkalenderstandard ist in Tabelle 13 zu finden. Für jede Variable wurden Erläuterungen, die Einheit und das Format festgelegt (Tab. 13). Des Weiteren wurden konkrete Beispiele für die einzelnen Variablen gemacht.

Im Verlaufe des Pilotprojekts wurde festgestellt, dass der Datenstandard noch weiter verbessert werden musste. Im Folgenden werden ein paar Beispiele erläutert.

- 1) Die erste Version des Datenstandards hatte keine Variable «Einheit», weil vorgesehen war, soweit möglich alle Produktmengen in die Einheit «kg» umzurechnen. Da dies jedoch nicht in allen Fällen möglich war (beispielsweise Pheromone), musste eine neue Variable «Einheit» definiert werden.
- 2) Im ursprünglichen Datenstandard war die Lieferung von Mengenangaben für alle Erntemassnahmen Pflicht. Im Verlauf des Pilotprojekts wurde diese Vorgabe jedoch gelockert, weil die Mengenangaben für Graslanderträge in den meisten Fällen nicht bekannt sind. Aus diesem Grund wird nun je nach Kultur unterschieden, ob die Angabe der Ertragsmenge Pflicht ist oder nicht.
- 3) In Standard gibt es die Variable «Betriebs-ID», die sich auf die kantonale Betriebsnummer bezieht. Jedoch wurde anfänglich nicht spezifiziert, wie mit Subbetrieben umgegangen wird. Nachträglich wurde definiert, dass Datenlieferungen auch nur für Subbetriebe erfolgen dürfen und analog entschädigt werden.

Neben Präzisierungen des Datenstandards sind auch «Test Cases» wichtig, um korrekte Datenlieferungen zu ermöglichen. Beispielsweise ist die Zuordnung einer Kultur zum korrekten Kulturland nicht immer trivial, insbesondere im Fall von Kunstwiesen und Zwischenkulturen. Vordefinierte «Test Cases», aus denen ersichtlich wird, welche Kulturen einer Fruchtfolge welchem Kulturland zugeordnet werden sollen, helfen diesbezüglich.

Tab. 13: Stark gekürzter und vereinfachter Auszug aus dem festgelegten Standard, in dem FMIS Feldkalenderdaten für MAUS liefern können.

Merkmal	Betriebs-ID	Geometry	Datum der Massnahme	Produktmenge	Einheit	Massnahme	Saat-Art
Erläuterung	Ktidb (kantonale Betriebsnummer). Es dürfen auch Subbetriebe geliefert werden. Pro gelieferter Betrieb eine Zeile. Vorgabe oder Prüfung einbauen gemäss «Zusatzblatt_KTIDB».	Geometrie des Schlags als Polygon. Bezugsrahmen: LV95. Pro Schlag darf nur eine Kultur zeitgleich auf dem Feld stehen (Ausnahme: Untersaat).		Umrechnung in kg (für Flüssigkeiten m ³ = 1000 kg). Wenn Umrechnung auf kg nicht möglich ist (z. B. Pheromone), wird die ursprüngliche Zahl geliefert (mit anderer Einheit). Für Grünlandernten kann die Produktmenge leer gelassen werden.	Default: kg. Wenn es nicht möglich ist, in kg umzurechnen, liefert man 1:1 (z. B. Pheromone).	Auswahl. Weidemassnahmen müssen unter «Ernte» nicht pflichtmässig erfasst werden.	Auswahl
Einheit	–		–	kg. In Ausnahmefällen 1:1 Übernahme	–	–	–
Format	String	Polygon, Point, Linestring, Multipolygon	dd.mm.yyyy	Float	String, Auswahl	String, Auswahl	String, Auswahl
Optionen für «String, Auswahl»					«kg»	«Saat/Pflanzung»	«keine Saat/Pflanzung»
					Übernahme aus Produktliste des Systems	«Pflanzenschutzmitteleinsatz»	«Pflanzung»
						«Düngung»	«Direktsaat»
						«Bodenbearbeitung»	«Mulchsaat, wendende Bodenbearbeitung / Pflugeinsatz, Bearbeitungstiefe < 10 cm»
						«Bewässerung»	«Mulchsaat, nicht wendend, mit Zapfwelle, Bearbeitungstiefe < 10 cm»
						«Ernte»	«Mulchsaat, nicht wendend, ohne Zapfwelle, Bearbeitungstiefe < 10 cm»
						«Anderes»	«Streifensaart, weniger als 50 % der Fläche»
							«Saat nach Pflugeinsatz / wendende Bodenbearbeitung, Bearbeitungstiefe > 20 cm»

Merkmal	Betriebs-ID	Geometry	Datum der Massnahme	Produktmenge	Einheit	Massnahme	Saat-Art
Beispiele	ZH2542/ 1/ 1	POLYGON ((0 0 0,4 0 0,4 4 0,0 4 0,0 0 0),(1 1 0,2 1 0,2 2 0,1 2 0,1 1 0))	02.09.2022	100	kg	Saat/Pflanzung	Direktsaat
	ZH2542/ 1/ 1	POLYGON ((0 0 0,4 0 0,4 4 0,0 4 0,0 0 0),(1 1 0,2 1 0,2 2 0,1 2 0,1 1 0))	04.04.2023	0.4	kg	Pflanzenschutzmitteleinsatz	

Ablauf der Datenlieferung in barto

Im Pilotprojekt wurde folgender Ablauf der Datenlieferung erarbeitet: Ein Betrieb erfasst seine Daten im Feldkalenderbaustein von barto (helvetisierte Version von 365FarmNet), der gratis verfügbar ist. Anschliessend kann der Betrieb den MAUS-Baustein buchen, der ebenfalls kostenlos ist. Im MAUS-Baustein kann pro Feldkalenderjahr, für das Daten vorliegen, eine Lieferung gemacht werden. Die Lieferung muss vor der Sendung an Agroscope überarbeitet werden. Konkret müssen fehlende Angaben ergänzt werden. Nur, wenn die Lieferung vollständig ist, kann sie an Agroscope geschickt werden. Sind die Daten bereinigt und drückt ein Betrieb auf «Senden», muss der Betrieb nochmals explizit bestätigen, dass er sich mit der Ablieferung der Daten mit der Datennutzungsvereinbarung einverstanden erklärt. Diese Vereinbarung und die wichtigsten Punkte sind bereits in der Beschreibung des MAUS-Bausteins enthalten.

Funktionalität des MAUS-Bausteins in barto

Bei der Programmierung des MAUS-Bausteins wurde Wert daraufgelegt, die erfassten Angaben im Feldkalenderbaustein soweit wie möglich automatisiert in den bestehenden Standard zu transformieren. Beispielsweise werden im MAUS-Baustein Düngemittel der korrekten Kategorie zugeordnet, der Stickstoffgehalt des Düngers ins korrekte Format gebracht oder die Kulturen dem korrekten Kulturjahr zugeordnet.

Jedoch war dies nicht in allen Fällen möglich. Die Software 365FarmNet lässt dem Betrieb bewusst viel Freiheiten bei der Erfassung von Feldkalenderdaten. So sind die meisten Felder bei der Massnahmenerfassung (z. B. Produktmenge) nicht Pflicht. Für Kulturen, Pflanzenschutzmittel und Düngemittel sind vordefinierte Produktlisten hinterlegt, aus denen man die eingesetzten Produkte auswählen kann. Für Maschinen ist dies jedoch nicht der Fall.

Für standardisierte Datenlieferungen stellt das Konzept von 365FarmNet eine Herausforderung dar. Erstens muss sichergestellt werden, dass alle Pflichtangaben geliefert werden. Fehlen Informationen wie die Produktmenge im Feldkalender-Baustein, gibt es eine Fehlermeldung und der Betrieb muss diese Information im Feldkalenderbaustein nacherfassen. Zweitens ist es beispielsweise nicht möglich, aus den erfassten Daten die Bodenbearbeitungs- oder Hofdüngerausbringungsart automatisiert herauszuziehen, weil keine Maschinenliste hinterlegt ist, mit der sich z. B. Pflug- oder Schleppschlaucheinsätze bestimmen liessen. Aus den Freitext-Informationen der Betriebe kann diese Information nicht verlässlich herausgezogen werden. Somit war es nötig, im MAUS-Baustein von barto diese Informationen separat zu erheben. Hierfür wurden im MAUS-Baustein definierte Listen hinterlegt, aus denen die korrekte Bearbeitungsart (z. B. Schleppschlauch) ausgewählt werden kann. Um Zeit zu sparen, haben die Betriebe die Möglichkeit, die Präzisierung einer Massnahme auf andere Massnahmen zu übertragen.

Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt des MAUS-Bausteins. Der Benutzer befindet sich in der Lieferung für das Kulturjahr 2024, wie im Titel ersichtlich ist. Darunter befinden sich die drei Blätter «Betrieb», «Parzellen» und «Massnahmen», wo die Informationen für die Datenstandards «Allgemeine Angaben», «Schlagregister» und «Feldkalender» erfasst werden. Im Beispiel ist die Saatmassnahme des Winterrapses auf der Parzelle namens «Test_Getreide_Ernte» detailliert dargestellt. Die meisten Informationen dieser Massnahme wurden direkt aus dem Feldkalenderbaustein übernommen respektive davon abgeleitet (z. B. Produktmenge, Sorte, Hauptkultur). Falls es sich bei dieser Kultur um eine Untersaat handeln würde (was hier nicht der Fall ist), müsste das Kreuz «Untersaat» angeklickt werden. Ist das Saatgut gebeizt, muss das entsprechende Kreuz angewählt werden und das korrekte Beizmittel aus der Produktliste ausgewählt werden. Ist das Beizmittel unbekannt, kann die Option «Anderes» ausgewählt werden. Des Weiteren muss die Saatmethode mittels Drop-Down-Menü ergänzt werden.

▲	Saat/Pflanzung	10.10.2023	10.10.2023	Test_Getreide_Ernte	Winterraps	
	Name Winterraps		Sorte Visby	☐ Untersaat	☐ Saatgut gebeizt	Beizmittel
	Menge 100.00 kg	Bearbeitete Fläche 1.69 ha	Kulturtyp Hauptkultur			
▶	Ernte	28.02.2024	28.02.2024	Test_Getreide_Ernte	Winterraps	
▶	Saat/Pflanzung	04.08.2023	04.08.2023	Test_HK_KW_HK_ZwK_KW_HK	Kartoffel Düngung:	
▶	Ernte	23.02.2024	23.02.2024	Test_HK_KW_HK_ZwK_KW_HK	Kartoffel Düngung:	

Abb. 23: Auszug aus dem MAUS-Baustein, Blatt «Massnahmen». Als Beispiel wird eine Saatmassnahme von Winterraps im Detail gezeigt.

Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erwähnt, ist die Sicherstellung der Datenqualität relevant und herausfordernd. Im MAUS-Baustein wurde eine komplexere Datenqualitätskontrolle implementiert (Abb. 24): Die eingesetzte Menge eines Pflanzenschutzmittels wird mit den Aufwandmengen des Pflanzenschutzmittelverzeichnisses abgeglichen. Ist die angegebene Menge deutlich höher als die zugelassene Aufwandmenge gemäss Pflanzenschutzmittelverzeichnis, hat der Betrieb zwei Möglichkeiten: Handelt es sich um einen Fehler (z. B. Einheitenfehler), korrigiert der Betrieb die Menge im Feldkalenderbaustein und lädt den MAUS-Baustein neu. War die eingesetzte Menge tatsächlich höher, wird «Bestätigen» angekreuzt. Dies hat keine Konsequenzen für den Betrieb, da vertraglich garantiert wurde, die Daten nicht für einzelbetriebliche Kontrollzwecke zu verwenden. In Zukunft könnten weitere, ähnliche Datenqualitätskontrollen für andere Produktionsmittel durchgeführt werden.

Name Tak 50 Eg	Wirkstoff Lambda-Cyhalothrin
Menge 1.20 kg	Bearbeitete Fläche 1.33 ha
Name testta Die Aufwandmenge von 10.00 kg/ha scheint gemäss PSM-Verzeichnis zu hoch. Bitte korrigieren oder bestätigen.	
Wirkstoff Lambda-Cyhalotrinoooo	
Menge 13.29 kg	Bearbeitete Fläche 1.33 ha
☐ Bestätigen	

Abb. 24: Auszug aus dem MAUS-Baustein. Automatisierte Kontrolle der eingesetzten Pflanzenschutzmittelmengen.

Vom Pilotprojekt zur Anwendung

Im Pilotprojekt konnte gezeigt werden, dass eine standardisierte Datenlieferung von FMIS an MAUS möglich ist. Deswegen wurde der MAUS-Baustein im März 2024 auf barto freigeschaltet. Es wurde eine Anleitung für den MAUS-Baustein erstellt. In dieser wird erstens der MAUS-Baustein erläutert. Zweitens wird darauf hingewiesen, auf was bei der Erfassung im Feldkalenderbaustein zu achten ist, damit die Ablieferung möglichst problemlos verläuft. Es wurde ein Supportteam von Agroscope inklusive E-Mailadresse und Telefonnummer eingerichtet, um Betriebe bei Fragen zur Datenerfassung zu unterstützen. Zurzeit wird daran gearbeitet, auch in anderen FMIS Funktionalitäten umzusetzen, welche die Lieferung von standardisierten Feldkalenderdaten ermöglichen. In Zukunft könnten Datenlieferungen auf weitere Funktionalitäten wie z. B. Bodenanalysen ausgeweitet werden (Abb. 22).

5 Zusammenfassung: Beantwortung der Forschungsfragen

Autorinnen und Autoren: Nadja El Benni, Christian Flury

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus dem Agroscope Forschungsprogramm durch die Beantwortung übergeordneter Fragestellungen zusammenfassend präsentiert.

1. Auf Basis welcher Daten und Methoden lassen sich Indikatoren für die Bereiche Nährstoffflüsse, Boden und Biodiversität sowie zur Darstellung positiver Ökosystemleistungen auf Betriebsebene entwickeln und wie können sie für das Betriebsmanagement genutzt werden?

Nährstoffflüsse N und P

Mit den Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD) (Carlen *et al.*, 2017) steht den Betriebsleitenden eine Empfehlung für die gute Düngepraxis zur Verfügung. Die Empfehlungen in den GRUD sind geeignet, die Pflanzenkulturen und Wiesenbestände bedarfsgerecht und standortangepasst mit Stickstoff und Phosphor zu versorgen. Mit einer konsequenten Anwendung der aktuell bestehenden Düngebedarfsbemessungsmethoden können Stickstoff- und Phosphor-Überschüsse im Vergleich zu einer nicht angepassten Düngung reduziert werden. Die Richtwerte in den GRUD müssten in Zukunft mit der Verdünnung der Gülle gekoppelt werden, um eine einfache Abschätzung der auf dem Betrieb anfallenden Hofdüngermengen und Nährstoffgehalte zu ermöglichen.

Das im Projekt «Nährstoffmanagement Hofdünger» entwickelte Modell kann die produzierte Hofdüngermenge und deren Nährstoffgehalte betriebsspezifisch für den Milchviehbestand schätzen und ermöglicht damit eine effizientere Düngung mit betriebseigenem Hofdünger. Das Projekt «Nährstoffflüsse abbilden» hat aufgezeigt, wie aus der Suisse-Bilanz mit wenigen Anpassungen ein verlässlicher Indikator für ein nachhaltiges Stickstoffmanagement auf Betriebsebene generiert werden kann.

Boden

Im Projekt «Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung» wurden chemische, biologische und physikalische Bodenreferenzwerte aus der Literatur zusammengeführt, die Aussagen zu Ziel- und Grenzwerten oder Vergleichswerten für die Beurteilung von im Feld beobachteten Indikatorwerten zulassen. Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche wurde eine Methodik zur indikatorbasierten Beurteilung von produktionsrelevanten Bodenfunktionen entwickelt. Mit den entsprechenden Indikatoren können die Bodenfunktionen Wasserspeicherkapazität, Kohlenstoff-Speicherkapazität und Aktivität von Bodenorganismen approximiert und über eine Skala eingeordnet werden. Werte von ≤ 0.5 auf der Skala von 0–1 indizieren ein erhöhtes Risiko für den Verlust von Bodenfunktionen und weisen damit auf ein Verbesserungspotenzial spezifischer Bodenfunktionen hin. Der Wert 1 entspricht dem maximalen Potenzial (dem Optimum) der jeweiligen Bodenfunktion.

Im Projekt «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» wurden chemometrische Modelle zur Vorhersage von Bodenqualitätsindikatoren entwickelt, die Daten aus einem neuen Sensorsystem basierend auf Vis-NIR-Spektren nutzen. Mit diesen Modellen können die Bodenindikatoren Kationenaustauschkapazität (CEC), extrahierbares Magnesium, Tongehalt, pH-Wert, organischer Bodenkohlenstoff (SOC), Sandgehalt, Gesamtstickstoff (N_{tot}), das Verhältnis von Bodenkohlenstoff zu Tongehalt (SOC:clay ratio) und leicht oxidierbarer Kohlenstoff (POXC) geschätzt werden. Die Technologie liefert vor allem für die Indikatoren CEC, Textur, pH-Wert, SOC und N_{tot} gute Schätzergebnisse. Diese Indikatoren können vom Betriebsleitenden für das Bodenmonitoring genutzt werden, müssen aber in ihrem Zusammenspiel interpretiert werden, um Managemententscheide treffen zu können. So ist z. B. der Gehalt an organischem Bodenkohlenstoff eine Annäherung an die Bodenfruchtbarkeit und kann für ein Monitoring von Kohlenstoffanreicherungsmassnahmen genutzt werden. Gleichzeitig kann ein hoher oxidierbarer Kohlenstoffgehalt auf eine erhöhte Freisetzung von Bodenkohlenstoff durch Mikroorganismen hinweisen.

Weiter wurde eine Best-Practice-Methode zur Messung von Bodenspektren auf dem Feld entwickelt: pro Bodenprobe werden fünf vis-NIR-Spektren entlang eines 20 cm langen Bohrstocks aufgenommen und anschliessend gemittelt. Die Vis-NIR-Bodenspektroskopie in Kombination mit chemometrischen Modellen ist eine schnelle und

kostengünstige Methode zur Erfassung von Bodenqualitätsindikatoren und zeigt grosses Potenzial als zukünftige Bodenanalysetechnik.

Biodiversität und Ökosystemleistungen

Im Projekt «Indikatoren Biodiversität» wurde auf Basis einer systematischen Literaturrecherche eine Liste an Indikatoren erstellt, die für die Beurteilung der Biodiversität in Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Praktiken Düngung, Beweidung, Mähen, Bodenbearbeitung, Herbizidanwendung und Biolandbau genutzt werden kann. Häufige Indikatorarten sind Flora, Laufkäfer, Spinnen, Vögel, Bienen und Regenwürmer. Die derzeit am meisten verwendeten Diversitätsmasse sind Abundanz, Artenreichtum, Shannon-Index, Gleichmässigkeit und Zusammensetzung der Gemeinschaften. Die auf 36 Parzellen und neun Landwirtschaftsbetrieben erfassten Indikatorarten und Gemeinschaften variierten stark zwischen den Parzellen. In der Regel sind Habitat- und Artenvielfalt positiv miteinander korreliert, die Intensität der landwirtschaftlichen Produktion beeinflusst die Artenvielfalt negativ und die Anordnung der Parzellen hat eine Wirkung auf die Biodiversität auf Landschaftsebene. Der Einfluss der landwirtschaftlichen Produktion auf die Indikatorarten Amphibien, Reptilien, Schnecken, Tausendfüsser und Hundertfüsser ist bisher weitgehend unbekannt. Auch ist wenig darüber bekannt, welche Auswirkungen Massnahmen wie Zwischenfrüchte, Mulchsaat, Mischkulturen, Streifenanbau und Agroforst auf die verschiedenen Indikatorarten haben. Es bedarf deswegen noch an Forschung an der Schnittstelle zwischen Produktions- und Anbausystemen und Indikatoren der Biodiversität, die es den Betriebsleitenden erlauben, ihr Betriebsmanagement zielgerichtet zu verbessern.

Im Projekt «Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland» wurden, basierend auf einem Datensatz von 30 verschiedenen Ökosystemleistungen von Grasland, die auf knapp 90 Dauergraslandparzellen im Kanton Solothurn gemessen wurden, Indikatoren zur Beurteilung von Bündeln an Ökosystemleistungen entwickelt. Mit den Indikatoren können sowohl Synergien als auch Zielkonflikte zwischen den unterschiedlichen Ökosystemleistungen identifiziert werden. Gleichzeitig wird eine Darstellung der Multifunktionalität von Dauergrasland auf Parzellen-, Betriebs- und Landschaftsebene möglich. Dabei konnten zwei klar abgegrenzte Ökosystemleistungs-Bündel identifiziert werden, die nicht gleichzeitig auf einer Parzelle erreicht werden können: Eine extensive Bewirtschaftung als Biodiversitätsförderfläche fördert vor allem die nicht-produktionsbezogenen Ökosystemleistungen (z. B. regulierende oder unterstützende Ökosystemleistungen), während eine intensive (ÖLN-konforme) Bewirtschaftung die Ökosystemleistung Futterproduktion begünstigt. Für die Approximation der nicht mit der Futterproduktion zusammenhängenden Ökosystemleistungen kann auf die Pflanzenartenanzahl (positiver Zusammenhang) und Düngungsintensität (negativer Zusammenhang) als vereinfachte Indikatoren für die Abschätzung der Multifunktionalität zurückgegriffen werden. Dazu können gewisse Ökosystemleistungen auf Basis von Strukturdaten des Agrarpolitischen Informationssystems AGIS abgeschätzt werden, wobei der Verlust an Genauigkeit bedeutend ist. Mittels Modellierungen kann auf Basis von Primär- und Sekundärdaten ermittelt werden, wie viel extensiv bewirtschaftetes Grasland notwendig ist, um entweder einzelne Ökosystemleistungen oder die Multifunktionalität auf Betriebs- oder Landschaftsebene zu optimieren. Solche Modellierungen können bei der Landnutzungsplanung unterstützen, etwa bei der Frage, wie viel und wo Biodiversitätsförderflächen (BFF) angelegt werden sollten. Ebenso können sie bei der Festlegung von Indikatorzielwerten helfen, zum Beispiel, welcher Indikatorwert für eine bestimmte Ökosystemleistung oder die Multifunktionalität erreicht werden soll.

2. Mit welchen digitalen Tools können die Indikatoren heute und in Zukunft erhoben und für das Betriebsmanagement nutzbar gemacht werden?

Für alle im Forschungsprogramm Indicate analysierten Indikatoren gibt es noch Weiterentwicklungsbedarf, damit sie für das Betriebsmanagement genutzt werden können. Derzeit ist die Erhebung der Indikatoren meist mit einem grossen Aufwand verbunden und bedarf Expertenwissen, das auf einem Betrieb nicht zur Verfügung steht. Dies gilt auch für bereits genutzte Indikatoren, wie am Beispiel von Biodiversitätsindikatoren im Folgenden veranschaulicht wird. Im Biodiversitätsmonitoring haben sich die Erhebungsmethoden seit den 1980er Jahren kaum verändert und neue Methoden, z. B. basierend auf DNA-Analysen, sind erst in der Entwicklung und in der Praxis noch nicht einsetzbar. Aktuell werden Biodiversitätsindikatoren auf Parzellenebene erfasst und nicht auf der Ebene landwirtschaftlicher Betrieb, obwohl dies für Managemententscheide wichtig wäre. Um zuverlässige Biodiversitätsindikatoren auf Betriebsebene zu definieren, muss die Verortung der Parzellen des Betriebs in der Landschaft und damit der potenzielle Einfluss von benachbarten, auch betriebsfremden Flächen berücksichtigt werden. Im Projekt

«Indikatoren Biodiversität» wurden unter Berücksichtigung der Landnutzung von mehrheitlich halbnatürlichen Ökosystemen (z. B. Flächen zur Förderung der Biodiversität), der räumlichen Verteilung dieser Elemente (z. B. mit dem Index der parzellierten Kohäsion), ihrer Häufigkeit und Abundanz (z. B. Vielfalt der Kulturen, Dauergrünland, Parzellengrösse) sowie der Bewirtschaftung (z. B. Anbaupraktiken) verschiedene Indikatoren getestet. Dabei zeigte sich ein noch immer hoher Bedarf an Fachwissen und Ressourcen, um diese Indikatoren zu berechnen und wissenschaftlich zuverlässige Indikatorwerte zu erhalten. Es ist deswegen noch Forschung notwendig, um die Indikatoren automatisiert zu berechnen und sie den Betriebsleitenden für das Management zur Verfügung stellen zu können.

Neben dem Entwicklungsbedarf bei den Indikatoren sind auch die heute verfügbaren digitalen Tools noch nicht so ausgestaltet, dass sie von den Betriebsleitenden für das Management des ganzen Betriebs genutzt werden können. Obwohl die Entwicklung spezifischer Applikationen (z. B. Feldkalender, Fütterungsplaner, Düngerplaner, Buchhaltungsprogramme) schon vor mehr als 30 Jahren begann, sind diese bisher selten miteinander verknüpft und damit nur für spezifische Bereiche nutzbar. Auch zeigt eine Analyse aktuell verfügbarer Agrarsoftware und Farm-Management-Informationen-Systeme (FMIS) im Kontext Nährstoffmanagement, Umweltmonitoring und Vollzug, dass in der Schweiz die Verfügbarkeit und die Funktionalität niedriger sind als in anderen europäischen Ländern. Der Weg hin zu einem interoperablen, voll funktionsfähigen System ist in der Schweiz damit nach wie vor sehr weit.

Trotzdem konnten im Agroscope Forschungsprogramm Indicate Fortschritte in Bezug auf die Verknüpfung verschiedener Datenquellen gemacht werden, so dass ein nachhaltiges Nährstoffmanagement in Zukunft von den Betriebsleitenden umsetzbar sein sollte. Es wurden Grundlagen geschaffen, die es ermöglichen, Daten zu den Nährstoffflüssen von der Fütterung über den anfallenden Hofdünger bis hin zur parzellenscharfen Nährstoffbilanz auf Betriebsebene zu erheben bzw. zu schätzen. So wurde im Projekt «Nährstoffmanagement Hofdünger» ein Modell entwickelt, das betriebsspezifisch die Hofdüngermenge und deren Nährstoffgehalte ermitteln und in der Düngeplanung berücksichtigen kann. Für die Praxisanwendung sind aber Weiterentwicklungen notwendig, sowohl in Bezug auf die Modellierung von Nährstoffen auf Betriebsebene als auch von Tools für die automatisierte Anwendung.

Um der Vision einer automatisierten und praxistauglichen Datenerfassung und damit einem digitalen Betriebsmanagement näher zu kommen, sollten FMIS als zentrale Plattform weiterentwickelt werden. Separate Datenerfassungen, wie sie derzeit noch notwendig sind, werden immer weniger akzeptiert und erlauben kein umfassendes Betriebsmanagement.

Bereits auf Basis der heutigen Technologie, wie der Lokalisierung der Maschinen per GNSS verbunden mit deren technischen Parametern, wäre die Generierung neuer Indikatoren möglich. Mit «Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen» kann die Indikatormessung (für einige Indikatoren) günstiger und schneller durchgeführt werden. Beispielsweise könnte die Befahrungintensität für die Berechnung von Bodenindikatoren genutzt werden.

3. Welche Daten aus FMIS können für Umweltindikatoren und das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) erhoben werden?

Das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) basiert auf der Verordnung zur Nachhaltigkeitsbewertung der Landwirtschaft (SR 919.118) und analysiert die Umweltauswirkungen der Landwirtschaft über die Zeit mittels Agrarumweltindikatoren (z. B. Treibhausgasemissionen oder Erosionsrisiko). Die Agrarumweltindikatoren werden auf Basis von einzelbetrieblichen Daten (z. B. Tierbestand, Pflanzenschutzmitteleinsatz) berechnet und aggregiert auf Regions- oder Produktionssystemebene für Monitoringzwecke genutzt.

MAUS verfolgt das «Once-Only-Prinzip», um vorhandene Daten zu nutzen und Mehrfacherfassungen zu vermeiden. Datenlücken werden durch gezielte Erhebungen geschlossen, wobei Methoden wie Online-Umfragen oder die Nutzung von Satellitendaten und FMIS-Daten zum Einsatz kommen.

FMIS-Daten sind besonders wichtig für räumlich und zeitlich präzise Analysen, etwa zum Pflanzenschutzmitteleinsatz oder Erosionsrisiko. Digitale Feldkalender dokumentieren Massnahmen im Pflanzenbau wie Bodenbearbeitung und Saat, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte auf Schlagebene. Daraus können für das Monitoring relevante Informationen abgeleitet werden, z. B. zum Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in verschiedenen Kulturen und Regionen. Georeferenzierte Feldkalenderdaten sind besonders wertvoll, weil sie mit räumlichen Informationen (z. B. Hangneigung, Klima) kombiniert zur Berechnung von Indikatoren wie Erosionsrisiko, Pflanzenschutzmittelrisiko oder Ammoniakemissionen genutzt werden können. In der Tierhaltung können digital aufgezeichnete Auslaufjournale

und Fütterungsdaten wichtige Informationen liefern für die Berechnung verschiedener Indikatoren, z. B. der Ammoniakemissionen. So liessen sich auf Basis der Futtermittelrationen die Nährstoffkonzentrationen im Hofdünger besser bestimmen, die in vielen Indikatoren benötigt werden. Die Nutzung von GPS-Sensoren zum Tracking von Tieren und die automatische Erfassung in FMIS könnte zukünftige Datenerhebungen erleichtern.

Derzeit gibt es noch verschiedene Herausforderungen bei der Nutzung von Daten aus FMIS für die Berechnung von Agrarumweltindikatoren. So müssen rechtliche Aspekte zur Nutzung der Daten geklärt und einheitliche Datenstandards entwickelt und umgesetzt werden. Auch werden derzeit nicht alle für das Agrarumweltmonitoring benötigten Daten in allen FMIS erfasst, so dass zusätzliche Datenerhebungen notwendig sind. Zurzeit ist die Datenerhebung via FMIS eine Herausforderung, da viele Betriebe keine FMIS nutzen und einige Betriebe den Zusatzaufwand für die Datenlieferung im Rahmen von MAUS scheuen oder Bedenken haben, dass die Daten für andere Zwecke (z. B. für die Kontrolle von Direktzahlungen) genutzt werden könnten.

4. Wie lässt sich die ökonomische und soziale Nachhaltigkeit der Landwirtschaft messen?

Für die Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit auf Betriebsebene stehen bereits seit langer Zeit Indikatoren zur Verfügung. Diese werden auf Basis von Buchhaltungsdaten berechnet und können sowohl von Betriebsleitenden als auch von der Verwaltung für das Monitoring genutzt werden. Neben den bekannten ökonomischen Indikatoren wie zum Beispiel dem Arbeitsverdienst je Familienarbeitskraft (als Indikator für die Arbeitsproduktivität), können auch Indikatoren zur Resilienz eines Betriebs interessant sein, wie zum Beispiel die Robustheit (prozentuale Reduktion der Rentabilität nach einem Schock) als Indikator für die Widerstandsfähigkeit eines Betriebs.

Auch wenn Tools zur Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Praxis zur Verfügung stehen, zum Beispiel das Excel-basierte Tool AgriPerform von Agroscope, ist nicht bekannt, inwiefern Betriebsleitende diese Tools oder daraus berechnete Indikatoren für ihr Management nutzen. Auch hier wäre eine Erweiterung von FMIS um ökonomische Indikatoren, zum Beispiel die Kosten auf Betriebszweig- oder Feldebene, interessant. Die Kombination ökonomischer und ökologischer Indikatoren könnte dann auch für unterjährige Produktionsentscheide genutzt werden, zum Beispiel um eine Kosten-Nutzen-Abwägung der Düngegaben für Weizen zu machen.

Für die Bewertung der sozialen Nachhaltigkeit der Land- und Ernährungswirtschaft stehen international eine Reihe an Indikatoren zur Verfügung. Diese Indikatoren adressieren neben persönlichen Themen der Betriebsleiterin oder des Betriebsleiters sowie den familieneigenen oder angestellten Arbeitskräften (z. B. wahrgenommene Arbeitsbelastung, Gesundheitsschutz, angemessene Entlohnung) auch die Ebene des Betriebs (z. B. Hofnachfolge) bis hin zur lokalen und überlokalen Gesellschaft und Lieferketten (z. B. Partizipation in Organisationen, akzeptierte landwirtschaftliche Praxis, Landschaftsqualität).

In der Schweizer Landwirtschaft wird die soziale Dimension der Nachhaltigkeit bisher nicht systematisch erhoben und es steht kein Monitoring zur Verfügung. Für eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung auf Betriebs- und Sektorebene sollten daher Indikatoren ausgewählt und auf den Schweizer Kontext angepasst werden, die sowohl von den Bauernfamilien für das Management als auch von der Verwaltung für das Monitoring der agrarpolitischen Massnahmen und für die Verbesserung der agrarpolitischen Rahmenbedingungen genutzt werden können. Eine Umfrage unter Schweizer Landwirtinnen und Landwirten und eine Literaturrecherche zeigte, dass aus Sicht der Bauernfamilien vor allem die Work-Life-Balance, die soziale Absicherung, die Zufriedenheit mit dem Leben und der Arbeit sowie die Beziehungen innerhalb und ausserhalb der Familie und mit der Gesellschaft einen wichtigen Beitrag zur sozialen Nachhaltigkeit leisten. Diese Aspekte sollten bei der Indikatorwahl berücksichtigt werden.

5. Was für Arten von Indikatoren gibt es (z. B. Massnahmen- oder Resultate basierte Indikatoren) und was kann daraus für den Nutzen für das Betriebsmanagement oder die Verwaltung abgeleitet werden?

Das europaweit harmonisierte Drivers-Pressures-State-Impact-Response-Modell (DPSIR) zur Abbildung kausaler Zusammenhänge zwischen menschlichem Handeln und der Umwelt stellt ein geeignetes Rahmenwerk für die Einteilung von Indikatoren und deren Nutzen für das Betriebsmanagement oder das Monitoring dar. Das DPSIR-Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen den Faktoren a) menschliche Aktivitäten bzw. Treiber (Drivers), b) Druck bzw. Belastung auf die Umwelt (Pressures), c) Zustand bzw. Umweltqualität (State), d) Auswirkungen auf die Umwelt (Impact) und e) Massnahmen (Responses), wobei Indikatoren auf allen Stufen definiert werden.

Für eine Nachhaltigkeitsanalyse aussagekräftige Indikatoren im ökologischen Bereich stehen oft am Ende der kausalen Wirkungskette (z. B. Biodiversitätsverlust durch Algenblüte), während Druckindikatoren wie die Dünger-

menge weniger informativ sind. Auch im sozialen Bereich ist die Lebenserwartung (Auswirkung) ein aussagekräftiger Indikator als investiertes Geld (Triebkraft). Hier geht es jedoch im Kern um den Zustandsindikator «individuelles Wohlbefinden».

Für das Betriebsmanagement oder für den Vollzug der Agrarpolitik werden oft Indikatoren für Triebkräfte oder Massnahmen gewählt, weil diese einfacher zu erheben sind und direkt mit Handlungsoptionen verknüpft werden können. So ist es zum Beispiel schwierig einen kausalen Zusammenhang zwischen Triebkräften wie Düngung und Zustandsindikatoren wie Nitratgehalt im Boden nachzuweisen bzw. zu messen, sodass sich Indikatoren für das Betriebsmanagement oft auf Triebkräfte beschränken. Entsprechend waren auch in den Indicate-Projekten Massnahmenindikatoren weniger präsent. Der Schwerpunkt der meisten Indikatoren lag auf der kurz- und mittelfristigen Perspektive, während langfristige Überlegungen – mit Ausnahme der Ökobilanz – weitgehend fehlten.

In der Agrarpolitik können Zustandsindikatoren für Entscheide über Produktionsstandorte und Importstrategien genutzt werden. Auch Akteure der Wertschöpfungskette wie Verarbeiter oder der Handel beeinflussen die Nachhaltigkeit der Land- und Ernährungswirtschaft durch ihre Produzentenauswahl – vorausgesetzt, sie haben die nötigen Informationen. Werden die Indikatoren in staatlichen Programmen (z. B. Direktzahlungsprogrammen), oder für Nachweispflichten gegenüber Labelorganisationen oder Detailhändlern genutzt, spielt neben der Aussagekraft auch die Kontrollierbarkeit und Missbrauchsanfälligkeit eine Rolle. Auch deswegen unterscheiden sich Indikatorensets für internes Benchmarking und das Betriebsmanagement von solchen für Labels oder für Nachweispflichten im Zusammenhang mit den Direktzahlungsprogrammen.

6 Fazit

Autorinnen und Autoren: Nadja El Benni, Lutz Merbold, Christian Flury, Christoph Carlen, Joël Bérard

Das Agroscope Forschungsprogramm Indicate hat gezeigt, dass Indikatoren ziel- und kontextspezifisch entwickelt werden müssen. Ein ziel- und kontextspezifisches Indikatorenset sollte unterschiedliche Indikatoren, das heisst sowohl Wirkungsindikatoren als auch Zustands-, Treiber- oder Druckindikatoren enthalten. Dabei muss das Wissen aller Stakeholder einbezogen werden, aus der Forschung, der Praxis, der Beratung, der Verwaltung und der Industrie. Nur dann kann mit einem Indikator respektive mit einem Indikatorenset die beste Wirkung mit vertretbarem Erhebungs-, Auswertungs- und Interpretationsaufwand erzielt werden.

Das Agroscope Forschungsprogramm Indicate hat spezifisch für die Schweiz gezeigt, dass (bestehende) Indikatoren meist nur für die jeweilige Zielgruppe bzw. Anwendung geeignet sind, zum Beispiel für das Betriebsmanagement oder für Nachweispflichten in Zusammenhang mit Label- oder Direktzahlungsprogrammen. Die Resultate weisen darauf hin, dass heute kein Indikatorenset zur Anwendung kommt, welches für alle Zielgruppen gleichermassen einsetzbar ist und die Entwicklung und spätere Anwendung eines solchen als nicht realistisch erscheint. Diese Einschätzung wird auch von Schreefel *et al.* (2024) geteilt. Neben der Frage der Eignung sind zusätzlich die bestehenden Zielkonflikte zwischen einer einfach verständlichen Kommunikation eines Indikators und einer einfachen und kostengünstigen Erhebung und Kontrollierbarkeit relevant. Generell gilt, dass Indikatoren, welche auf die Erfassung der Wirkung ausgerichtet sind, verlässlichere Auskunft über Nachhaltigkeitsaspekte geben würden, jedoch schwieriger in ihrer Erhebung sind. Daher konzentrieren sich viele Indikatoren auf die Triebkräfte wie Düngung. Weiter ist und bleibt die Skalierung von Indikatoren von der Parzellen- auf die Betriebsebene oder von der Betriebsebene auf die regionale oder nationale Ebene trotz Fortschritten in der Forschung auch heute noch eine Herausforderung.

Das Potenzial, Daten aus FMIS für die Berechnung von Indikatoren zu nutzen, ist noch nicht ausgeschöpft. Zur Unterstützung im Betriebsmanagement sollten sich Weiterentwicklungen der Software auf die Verbesserung des Datenflusses zwischen verschiedenen Tools fokussieren. Auch für das Agrarumweltmonitoring sind die in den derzeitigen FMIS vorhandenen Daten nicht ausreichend und müssen über Zusatzerhebungen ergänzt werden. Die zukünftige Forschung zu Indikatoren sollte demzufolge noch stärker darauf fokussieren, Daten aus verschiedensten Quellen zu verschneiden und zu verbinden. Dabei werden in Zukunft unter anderem frei verfügbare Nah- und Fernerkundungsdaten eine beachtliche Rolle spielen, weil diese sowohl räumlich explizit als auch zeitlich kontinuierlich verfügbar sind und mehrere Indikatoren daraus abgeleitet werden können.

7 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Auflage, Hannover. 438 S.
- Agridea (2022). Frauen in der Landwirtschaft – Bericht zur Studie 2022. Agridea, Lindau.
https://www.agridea.ch/fileadmin/AGRIDEA/Theme/Gestion_d_entreprise_famille/Pilotage_courant_developpement_entreprise/Femme_et_Homme_sur_la_ferme/Frauen_in_der_Landwirtschaft_Studie2022_AGRIDEA.pdf
- Agridea, BLW (2023). Wegleitung Suisse-Bilanz. Version 1.18, August 2023. www.blw.admin.ch/de/oekologischer-leistungsnachweis
- Agristat (2023). Statistische Erhebungen und Schätzungen 2022. Kapitel 1: Betriebsverhältnisse. Agristat, Brugg.
https://www.sbv-usp.ch/fileadmin/user_upload/01_SES2022_Betriebsverhaeltnisse.pdf
- Agroscope (2021). Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer. <https://www.agroscope.ch/gruenes-buch>
- Alaoui A., Barão L., Ferreira C.S.S., Hessel R. (2022). An Overview of Sustainability Assessment Frameworks in Agriculture. Land 11, 537. <https://doi.org/10.3390/land11040537>
- Allan E., Manning P., Alt F., Binkenstein J., Blaser S., Blüthgen N., Böhm S., Grassein F., Hölzel N. & Klaus V.H. (2015). Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition. Ecology Letters, 18(8), 834–843.
- Anderson T.-H. (2003). Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. Agriculture, Ecosystems & Environment 98, 285–293. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4)
- Anderson T.-H., Domsch K.H. (2010). Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. Soil Biology and Biochemistry 42: 2039–2043. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.06.026>
- Altman D.G., Bland J.M. (1999). Statistics notes Variables and parameters. BMJ 318(7199), 1667.
<https://doi.org/10.1136/bmj.318.7199.1667>
- Argento F., Liebisch F., Simmler M., Ringger C., Hatt M., Walter A. & Anken T. (2022). Linking soil N dynamics and plant N uptake by means of sensor support. European Journal of Agronomy 134, 126462.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126462>
- Baccar M., Bouaziz A., Dugué P., Gafsi M., Le Gal P.-Y. (2020). Sustainability Viewed from Farmers' Perspectives in a Resource-Constrained Environment. Sustainability 12, 8671. <https://doi.org/10.3390/su12208671>
- Bagnall D.K., Rieke E.L., Morgan C.L.S., Liptzin D.L., Cappellazzi S.B., Honeycutt C.W. (2023). A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture. Soil Security 10, 100084.
<https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100084>
- Barra I., Haefele S.M., Sakrabani R. & Kebede F. (2021). Soil spectroscopy with the use of chemometrics, machine learning and pre-processing techniques in soil diagnosis: Recent advances—a review. TrAC - Trends Anal. Chem., 135, 116166. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116166>
- Bathaei A., Štreimikiene D. (2023). A Systematic Review of Agricultural Sustainability Indicators. Agriculture 13, 241, <https://doi.org/10.3390/agriculture13020241>
- Baumgartner S., Spiess E., Liebisch F., Gilgen A. (2024). Regionale Stickstoffbilanzen: Erste Ergebnisse von MAUS (Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz). Agroscope Science, 185.
<https://doi.org/10.34776/as185g>
- Bergez J.-E., Bethinger A., Bockstaller C., Cederberg C., Ceschia E., Guilpart N., Lange S., Müller F., Reidsma P., Riviere C. (2022). Integrating agri-environmental indicators, ecosystem services assessment, life cycle assessment and yield gap analysis to assess the environmental sustainability of agriculture. Ecological Indicators 141, 109107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109107>
- Bevans R. (2022). Types of Variables in Research & Statistics | Examples. Scribbr.
<https://www.scribbr.com/methodology/types-of-variables/> (12.12.2024)

- BFS (2014). Die Familie nach wie vor Eckpfeiler der Schweizer Landwirtschaft. Medienmitteilung. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuenburg. <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/39078>
- BFS (2023). Stickstoffbilanz der Landwirtschaft. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuenburg. [Link](#)
- BFS (2024). Landwirtschaftliche Nutzfläche – Ohne Sömmerungsflächen 2023 – In %. Bundesamt für Statistik (BFS), Neuenburg. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/publikationen.assetdetail.31847010.html>
- Billeter R. *et al.* (2008). Indicators for biodiversity in agricultural landscapes: a pan-European study. *Journal of Applied Ecology*, 45(1), 141–150. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01393.x>
- BLW (2013). Agrarbericht 2013. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H.M. (1997). Use of agri-ecological indicators for the evaluation of farming. *European Journal of Agronomy* 7, 261–270. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00041-5)
- Bockstaller C., Guichard L., Makowski D., Aveline A., Girardin P., Plantureux S. (2008). Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 139–149.
- Bockstaller C., Feschet P., Angevin F. (2015). Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids* 22(1), D102. <https://doi.org/10.1051/ocle/2014052>
- Bockstaller C. *et al.* (2021). Apports de la télédétection au calcul d'indicateurs agri-environnementaux au service de la PAC, des agriculteurs et porteurs d'enjeu. *Innovations Agronomiques*, 83, 43–59. <https://hal.inrae.fr/hal-03190579v1/document>
- Boillat V., Egger F., Forni A., Ramseyer N., Ruckli G., Trottmann N., Zürcher-Egloff J. (2024). Bericht über die Digitalisierung der Landwirtschaft. Schweizerischer Bauernverband, Brugg, 14 S. https://www.sbv-usb.ch/fileadmin/user_upload/Digitalisierungsbericht_SBV.pdf
- Bosshard C., Spiess, E., Richner, W. (2012). Überprüfung der Methode Suisse Bilanz: Schlussbericht. Bericht zu Handen des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW), Bern.
- Büchi L., Georges F., Walder F., Banerjee S., Keller T., Six J., van der Heijden M., Charles R. (2019). Potential of indicators to unveil the hidden side of cropping system classification: Differences and similarities in cropping practices between conventional, no-till and organic systems. *European Journal of Agronomy* 109, 125920. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125920>
- Bühlmann R. (2024). Bund will Nährstoffbilanzen bei sich. *Schweizer Bauer*, 18.05.2024.
- Bundesrat (2022). Digitalisierung im Agrarsektor. Rolle des Bundes - Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 19.3988, Jacques Bourgeois. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern. 88 S. <https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2019/20193988/Bericht%20BR%20D.pdf>
- Bundesrat (2024). Einkommen der Bauernfamilien – Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 21.4585 Bulliard. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern. <https://www.seco.admin.ch/seco/de/home/seco/nsb-news.msg-id-100256.html>
- Carlen C., Flisch R., Gilli C., Huguenin-Elie O., Kuster T., Latsch A. J., Mayer J., Neuweiler R., Richner W., Sinaj S., Spring J.-L. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8(6), 1–280. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/52563>
- Chavas J.-P. (2004). Risk analysis in theory and practice. Elsevier Academic Press.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G. (2012). Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology* 49, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.003>

- Contzen S., Häberli I. (2021). Exploring dairy farmers' quality of life perceptions – A Swiss case study. *Journal of Rural Studies* 88, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.11.007>
- Csardi G., Nepusz T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems* 1695.
- CSIRO (2007). Nutrient requirements of domesticated ruminants. CSIRO Publishing.
- de Olde E.M., Bokkers E.A., de Boer I.J. (2017a). The choice of the sustainability assessment tool matters: differences in thematic scope and assessment results. *Ecological Economics* 136, 77–85.
- de Olde E.M., Moller H., Marchand F., McDowell R.W., MacLeod C.J., Sautier M., Halloy S., Barber A., Benge J., Bockstaller C. (2017b). When experts disagree: the need to rethink indicator selection for assessing sustainability of agriculture. *Environment, Development and Sustainability* 19, 1327–1342.
- Desiderio E., García-Herrero L., Hall D., Segrè A., Vittuari M. (2022). Social sustainability tools and indicators for the food supply chain: A systematic literature review. *Sustainable Production and Consumption* 30, 527–540. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.015>
- Dillon E.J., Hennessy T., Hynes S. (2010). Assessing the sustainability of Irish agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability* 8(3), 131–147. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0044>
- DLG (2024). DLG-Standard «Nachhaltige Landwirtschaft». Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, Frankfurt. <https://www.dlg-nachhaltigkeit.info/de/dlg-standard> (17.10.2024)
- Eckelmann M. (2020). Marktübersicht deutschsprachiger Farmmanagement Informationssysteme (FMIS). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). <https://bit.ly/3xJwlqA> (16.06.2024)
- EEA (1999). Environmental indicators: Typology and overview. European Environmental Agency, Kopenhagen. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/tec25>
- Ehlers M.B., Roesch A., Douziech M. (2024) Reference values in social sustainability assessment: Approaches to tackling key challenges. *Social Indicators Research* (Manuskript eingereicht)
- EIP-AGRI Focus Group (2022). EIP-AGRI Focus Group Digital tools for sustainable nutrient management. Final Report. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/eip-agri_ws_digital-tools-nutrient-management_final-report_2022_en.pdf_0.pdf
- Elmiger N., Finger R., Ghazoul J., Schaub S. (2023). Biodiversity indicators for result-based agri-environmental schemes—Current state and prospects. *Agricultural Systems*, 204, 103538. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103538>
- Fabian Y., Bollmann K., Brang P., Heiri C., Olschewski R., Rigling A., Stofer S., Holderegger R. (2019). How to close the science-practice gap in nature conservation? Information sources of practitioners. *Biological Conservation* 235, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.04.011>
- Finger R., El Benni N. (2021). Farm income in European agriculture: new perspectives on measurement and implications for policy evaluation. *European Review of Agricultural Economics* 48(2), 253–265. <https://doi.org/10.1093/erae/jbab011>
- Finger R., El Benni N. (2022). Einkommen in der Landwirtschaft: neue Perspektiven und Implikationen für die Politikbewertung. *Agrarforschung Schweiz* 13, 17–25. <https://doi.org/10.34776/afs13-17>
- Gabrielsen P., Bosch, P. (2003) Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting. Internal Working Paper, European Environmental Agency, Kopenhagen.
- Gallmann J., Schüpbach B., Jacot K., Albrecht M., Winizki J., Kirchgessner N., Aasen H. (2022). Flower Mapping in Grasslands with Drones and Deep Learning. *Frontiers in Plant Sciences*, 12, 774965. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.774965>
- Garland G., Edlinger A., Banerjee S., Degrun F., García-Palacios P., Pescador D.S., Herzog C., Romdhane S., Saghai A., Spor A., Wagg C., Hallin S., Maestre F.T., Philippot L., Rillig M.C., van der Heijden M.G.A. (2021)

- Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food* 2, 28–37. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00210-8>
- GfE (2023). Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 12. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Milchkühen. DLG-Verlag, Frankfurt.
- Gilgen A., Blaser S., Schneuwly J., Liebisch F., Merbold L. (2023a). The Swiss agri-environmental data network (SAEDN): Description and critical review of the dataset. *Agricultural Systems* 205, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103576>
- Gilgen A., Felder R., Baumgartner S., Herzog F., Jeanneret P., Séchaud R., Paunovic S., Merbold L., Lucantoni D., Cluset R., Mottet A. (2023b). How to assess the agroecological status of Swiss farming systems? Application of the Tool for Agroecology Performance Evaluation (TAPE) and further development. *Agroecology Science* 172, 1–52. <https://doi.org/10.34776/as172e>
- Greiner L., Nussbaum M., Papritz A., Fraefel M., Zimmermann S., Schwab P., Grêt-Regamey A., Keller A. (2018). Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau. *Geoderma Regional* 14, e00181. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00181>
- Grenz J., Schoch M., Stämpfli A., Thalmann C. (2012). RISE-Handbuch. RISE-Version 2.0, 14.9.2012. Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen, CH.
- Groher T., Heitkämper K., Umstätter C. (2020). Nutzung digitaler Technologien in der Schweizer Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz* 11, 59–67. <https://doi.org/10.34776/afs11-59>
- Gross T., Müller M., Keller A., Meuli R.G., Gubler A. (2022). Long-term impact of farmyard manure on copper and zinc concentrations in Swiss grassland soils. In: *World Congress of Soil Science*. 4.8.2022, Hrsg. World Congress of Soil Science, Glasgow.
- Grossrieder J., Ringger C., Argento F., Grandgirard R., Anken T., Liebisch F. (2022). Standortangepasste Stickstoffdüngung: aktuelle Methoden und Erfahrungen. *Agrarforschung Schweiz* 13, 103–113. <https://doi.org/10.34776/afs13-103g>
- Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R.G., Keller A. (2015). Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009: Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. *BAFU Umwelt-Zustand*, 1507, 1–81.
- Guptill A., SARE Quality-of-Life working group (2021). SARE Brief: Understanding and measuring social sustainability. <https://www.sare.org/wp-content/uploads/Understanding-and-measuring-social-sustainability.pdf>
- INRA (2018). INRA Feeding System for Ruminants (P. Nozière, D. Sauvant, & L. Delaby, Eds.). Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-292-4>
- ISO (2023). Strategic Advisory Group Report on Smart Farming. Final Report with Recommendations. ISO/TMB/SAG SF – Strategic Advisory Group on Smart Farming. 174 S. <http://go.iso.org/SAG-SF-report>
- Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Baveye P.C., Boivin P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P. (2019). Soil structure quality indicators and their limit values. *Ecological Indicators* 104, 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.040>
- Hagedorn K. (1986). Probleme der Agrarsozialpolitik. *Sozialer Fortschritt* 35(8), 169–176.
- Heller O., Chervet A., Durand-Maniclas F., Guillaume T., Häfner F., Müller M., Wittwer R., Keller T. (2024). SoilManagerR – R package for deriving soil management indicators to foster agricultural practice assessment. submitted to *EJSS*. R package version 1.0, <https://gitlab.com/SoilManagerR/>.
- Herzog F. *et al.* (2017). European farm scale habitat descriptors for the evaluation of biodiversity. *Ecological Indicators* 77, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.010>

- Higgins S. *et al.* (2023). Stocktake study of current fertilisation recommendations across Europe and discussion towards a more harmonised approach. *European Journal of Soil Science* 74(5), e13422. <https://doi.org/10.1111/ejss.13422>
- Huber S., Prokop G., Arrouays D., Banko G., Bispo A., Jones R.J., Kibblewhite M., Lexer W., Möller A., Rickson R.J. (2008). Environmental assessment of soil for monitoring: Volume I indicators & criteria. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 339 S.
- Huber R., Le'Clec'h S., Buchmann N., Finger R. (2022). Economic value of three grassland ecosystem services when managed at the regional and farm scale. *Scientific Reports*, 12(1), 4194. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08198-w>
- Hug A.-S., Moll J., Gubler A. (2021). Monitoring Bodenbiologie: Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *Agroscope Science* 110, 1–35. <https://doi.org/10.34776/as110g>.
- Huguenin-Elie O., Delaby L., Le Clec'h S., Moreno G.M., Teixeira R.F.M., Schneider M.K. (2018). Optimising ecosystem services provided by grassland systems. *Grassland Science in Europe* 23, 520–534. <https://hal.science/hal-01918055>
- Jan P., Schmid D., Renner S., Schiltknecht P., Hoop D. (2023). Die wirtschaftliche Entwicklung der schweizerischen Landwirtschaft 2022. *Agroscope Transfer*, 506. Agroscope, Ettenhausen. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/54653>
- Janker J., Mann S., Rist S. (2019). Social sustainability in agriculture – A system-based framework. *Journal of Rural Studies* 65, 32–42. <https://doi.org.agros.swissconsortium.ch/10.1016/j.jrurstud.2018.12.010>
- Kaufmann M., Tobias S., Schulin R. (2010). Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173: 573–583. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900129>
- Kaur S.P. (2013). Variables in research. *Indian Journal of Research and Reports in Medical Sciences* 3(4), 36–38.
- Kestel J.H. *et al.* (2022). Applications of environmental DNA (eDNA) in agricultural systems: Current uses, limitations and future prospects. *Science of The Total Environment* 847, 157556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157556>
- Klages S. *et al.* (2020). Nitrogen Surplus—A Unified Indicator for Water Pollution in Europe? *Water* 2020, 12(4), 1197. <https://doi.org/10.3390/w12041197>
- Klaus V.H., Richter F., Reichmuth C., Jan P., El Benni N., Buchmann N., Lüscher A. (2022). How professional stakeholders perceive the current and future relevance of grassland ecosystem services in Switzerland. *Grassland Science in Europe* 27, 198–200.
- Klaus V.H., Bloor J.M.G., Cozzi G., Le Clec'h S., Peter S., Huguenin-Elie O. (2024a). Balancing competing ecosystem services requires stakeholder involvement and actions on different spatial scales. *Grassland Science in Europe* 80(1), 175–185.
- Klaus V.H., Richter F., Buchmann N., Hartmann M., Lüscher A., Huguenin-Elie O. (2024b). Indicators for assessing the multifunctionality of agriculturally used grasslands. *Ecological Indicators* 169, 112846. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112846>
- Klaus V.H., Lüscher A., Richter F.J., Huguenin-Elie O. (2024c). What information is needed for upscaling grassland ecosystem services to landscape scale? *Grassland Science in Europe* 29, 546–548.
- Klaus V.H., Schaub S., Séchaud R., Fabian Y., Jeanneret P., Lüscher A. & Huguenin-Elie O. (2024d). Upscaling of ecosystem service and biodiversity indicators from field to farm to inform agri-environmental decision-and policy-making. *Ecological Indicators* 163, 112104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112104>

- Latruffe L., Diazabakana A., Bockstaller C., Desjeux Y., Finn J., Kelly E., Ryan M., Uthes S. (2016). Measurement of sustainability in agriculture: a review of indicators. *Studies in Agricultural Economics* 118, 123–130. <http://dx.doi.org/10.7896/j.1624>
- Lebacqz T., Baret P.V., Stilmant D. (2013). Sustainability indicators for livestock farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 311–327. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0121-x>
- Le Clec'h S. *et al.* (2018). Mapping ecosystem services at the regional scale: the validity of an upscaling approach. *International Journal of Geographical Information Science* 32, 1593–1610. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1445256>
- Le Clec'h S. *et al.* (2019). Assessment of spatial variability of multiple ecosystem services in grasslands of different intensities. *Journal of Environmental Management* 251, 109372. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109372>
- Li Y. *et al.* (2017). Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landscape Ecology* 32, 1181–1199. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0527-6>
- Liegeois M. *et al.* (in Vorbereitung). Biodiversity indicators at the field and the farm scales: local habitat, intensity of farming practices and landscape influence them.
- Linders T.E., Schaffner U., Alamirew T., Allan E., Choge S.K., Eschen R., Shiferaw H., Manning P. (2021). Stakeholder priorities determine the impact of an alien tree invasion on ecosystem multifunctionality. *People and Nature* 3(3), 658–672.
- Liptzin D. *et al.* (2022). An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. *Soil Biology and Biochemistry* 172, 108708. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108708>
- Lorenz F., Liebisch F., Lohr D., Olfs H.-W. (2023). *Vor-Ort-Methoden zur Bodenuntersuchung*, VDLUFA-Verlag.
- Löw P. *et al.* (2021). Comparison of regulatory approaches for determining application limits for nitrogen fertilizer use in Germany. *Environmental Research Letters* 16, 055009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf3de>
- Ludwig B., Murugan R., Parama V.R.R., Vohland M. (2019). Accuracy of estimating soil properties with mid-infrared spectroscopy: Implications of different Chemometric approaches and software packages related to calibration sample size. *Soil Science Society of America Journal* 83, 1542–1552. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.11.0413>
- Lynch J., Hennessy T., Buckley C., Dillon E., Donnellan T., Hanrahan K., Moran B., Ryan M. (2019a). Teagasc National Farm Survey 2015 Sustainability Report. Agricultural Economics and Farm Surveys Department, Rural Economy and Development Programme, Teagasc, Athenry, Co. Galway, Ireland. <https://teagasc.ie/wp-content/uploads/2025/05/2015-sustainability-report.pdf>
- Lynch J., Donnellan T., Finn J.A., Dillon E., Ryan M. (2019b). Potential development of Irish agricultural sustainability indicators for current and future policy evaluation needs. *Journal of Environmental Management* 230, 434–445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.070>
- Maas B. *et al.* (2021). Divergent farmer and scientist perceptions of agricultural biodiversity, ecosystem services and decision-making. *Biological Conservation* 256, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109065>
- Mangi S.C., Roberts C.M., Rodwell L.D. (2007). Reef fisheries management in Kenya: Preliminary approach using the driver–pressure–state–impacts–response (DPSIR) scheme of indicators. *Ocean & Coastal Management* 50(5-6), 463–480.
- Mann S. (2010). Eine Schwachstellenanalyse der Ökoqualitätsverordnung. *Agrarforschung Schweiz* 1(1), 24–29.
- Mann S., Rödiger M. (2024). A capability indicator for family farms in the Global North – concept and test from Switzerland. *Journal of Human Development and Capabilities* 26(1), 87–107. <https://doi.org/10.1080/19452829.2024.2412691>
- Mehaba N., Schrade S., Dohme-Meier F., Eggenschwiler L., Schlegel P. (2022). Prediction of total dry matter intake in lactating dairy cows: model performance. *Animal science proceedings* 13(4), 578–579. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.448>

- Mehaba N., Schrade S., Dohme-Meier F., Eggerschwiler L., Schlegel P. (2024a). Predictive modelling of dry matter intake in lactating dairy cows based on routinely available variables. Poster, EAAP conference.
<https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/57320>
- Mehaba N., Schrade S., Eggerschwiler L., Dohme-Meier F., Schlegel P. (2024b). Models for estimating dry matter intake of basal diet and total diet in lactating dairy cows. *Animal* (eingereicht).
- Mehaba N., Schrade S., Eggerschwiler L., Dohme-Meier F., Schlegel P. (2025). Accuracy and precision evaluation of dry matter intake prediction models for lactating dairy cows. *Animal* 19(7), 101535.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101535>
- Melzer M., Bellingrath-Kimura S., Gandorfer M. (2023). Commercial farm management information systems – A demand-oriented analysis of functions in practical use. *Smart Agricultural Technology* 4, 100203.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100203>.
- Metzger K., Bragazza L. (2024). Prediction of nitrogen, active carbon, and organic carbon-to-clay ratio in agricultural soils by in-situ spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 75(3), e13508.
<https://doi.org/10.1111/ejss.13508>
- Metzger K., Liebisch F., Herrera J. M., Guillaume T., Walder F., Bragazza L. (2024a). The use of visible and near-infrared spectroscopy for in-situ characterization of agricultural soil fertility: A proposition of best practice by comparing scanning positions and spectrometers. *Soil Use and Management*, 40, e12952.
<https://doi.org/10.1111/sum.12952>
- Metzger K., Liebisch F., Herrera J.M., Guillaume T., Bragazza L. (2024b). Prediction Accuracy of Soil Chemical Parameters by Field- and Laboratory-Obtained vis-NIR Spectra after External Parameter Orthogonalization. *Sensors* 24, 3556. <https://doi.org/10.3390/s24113556>
- Meul M., Van Passel S., Nevens F., Dessein J., Rogge E., Mulier A., Van Hauwermeiren A. (2008). MOTIFS: a monitoring tool for integrated farm sustainability. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 321–332.
<https://doi.org/10.1051/agro:2008001>
- Meuwissen M.P.M. *et al.* (2019). A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems* 176, 102656, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102656>.
- Meyer Y., Liebisch F. (2025). Software-Lösungen für die Düngeplanung Inklusive Prüfung einer Webanwendung der Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen (GRUD). *Agroscope Science* 224.
<https://doi.org/10.34776/as224g>
- Mills J., Chiswell H., Gaskell P., Courtney P., Brockett B., Cusworth G., Lobley M. (2021). Developing Farm-Level Social Indicators for Agri-Environment Schemes: A Focus on the Agents of Change. *Sustainability* 13(14), 7820.
<https://doi.org/10.3390/su13147820>
- Moldan B., Janoušková S., Hák T. (2012). How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological Indicators* 17, 4–13.
- Moxey A., Whitby M., Lowe P. (1998). Agri-environmental indicators: issues and choices. *Land Use Policy* 15(4), 265–269.
- NASEM (2021). Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition. The National Academies Press.
<https://doi.org/doi:10.17226/25806>
- Nemecek T., Roesch A., Bystricky M., Jeanneret P., Lansche L., Stüssi M., Gaillard G. (2024). Swiss Agricultural Life Cycle Assessment: A method to assess the emissions and environmental impacts of agricultural systems and products. *Int. J LCA* 29, 433–455. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02255-w>
- NRC (2001). Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition. The National Academies Press.
<https://doi.org/doi:10.17226/9825>
- Oberholzer H.-R., Rek J., Weisskopf P., Walther U. (1999). Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agrobiological Research* 52, 113–125.

- Oberholzer H.-R., Scheid S. (2007). Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt-Wissen Nr. 0723, Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/publikationen-studien/publikationen/bodenmikrobiologische-kennwerte.html>
- Oberholzer H.-R., Freiermuth Knuchel R., Weisskopf P., Gaillard G. (2012). A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 639–649. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0072-7>
- Obrist M.K., Duelli P. (2010). Rapid biodiversity assessment of arthropods for monitoring average local species richness and related ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 19(8), 2201–2220.
- OECD (1993). OECD core set of indicators for environmental performance reviews, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Olsson J.A., Bockstaller C., Stapleton L.M., Ewert F., Knapen R., Therond O., Geniaux G., Bellon S., Correia T.P., Turpin N. (2009). A goal-oriented indicator framework to support integrated assessment of new policies for agri-environmental systems. *Environmental Science & Policy* 12(5), 562–572.
- Organic Research Center (2024). Public Goods Tool v3.1. <https://www.organicresearchcentre.com/PG-Tool/> (11.07.2024).
- Paracchini M.L., Bulgheroni C., Borreani G., Tabacco E., Banterle A., Bertoni D., Rossi G., Parolo G., Origgi R., De Paola C. (2015). A diagnostic system to assess sustainability at a farm level: The SOSTARE model, *Agricultural Systems* 133, 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.10.004>
- Pedolin D., Six J., Nemecek, T. (2021). Assessing between and within product group variance of environmental efficiency of Swiss agriculture using life cycle assessment and data envelopment analysis. *Agronomy* 11(9), 1862. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091862>
- Pfiffner L. (2022). Earthworms: architects of fertile soils (FiBL Technical Guide). Technical guide |No 1629. FiBL, Frick, Switzerland. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6670157>
- Piccini C., Metzger K., Debaene G., Stenberg B., Götzinger S., Borůvka L., Sandén T., Bragazza L. Liebisch F., (2024). In-field soil spectroscopy in Vis–NIR range for fast and reliable soil analysis: A review. *European Journal of Soil Science* 75(2), e13481. <https://doi.org/10.1111/ejss.13481>
- Plantureux S., Bernués A., Huguenin-Elie O., Hovstad K., Isselstein J., McCracken D., Therond O., Vackar D. (2016). Ecosystem service indicators for grasslands in relation to ecoclimatique regions and land use systems. *Grassland Science in Europe* 21, 524–547.
- Pons P., Latapy M. (2005). Computing Communities in Large Networks Using Random Walks. In: Yolum, p., Güngör, T., Gürgen, F., Özturan, C. (Hrsg.) *Computer and Information Sciences - ISCIS 2005. Lecture Notes in Computer Science*, Band 3733. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11569596_31
- Pope J., Annandale D., Morrison-Saunders A. (2004). Conceptualising sustainability assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 24(6), 595–616. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.03.001>
- Poppe K., Vrolijk H., Bosloper I. (2023). Integration of farm financial accounting and Farm Management Information Systems for better sustainability reporting. *Electronics* 12, 1485. <https://doi.org/10.3390/electronics12061485>
- Rasouli A.H., Kumarasurinyar A. (2016). The social dimension of sustainability: towards some definitions and analysis. *Journal of Social Science Policy Implications* 4, 23–34.
- Raymond P.A., David M.B., Saiers J.E. (2012). The impact of fertilization and hydrology on nitrate fluxes from Mississippi watersheds. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4(2), 212–218.
- Redman C. L. (2014). Should sustainability and resilience be combined or remain distinct pursuits? *Ecology and Society* 19(2), 37. <http://www.jstor.org/stable/26269581>
- Rees H.L., Hyland J.L., Hylland K., Mercer Clarke C.S., Roff J.C., Ware S. (2008). Environmental indicators: utility in meeting regulatory needs. An overview. *ICES Journal of Marine Science* 65(8), 1381–1386.

- Renner S., Jan P., Hoop D., Schmid D., Dux D., Weber A., Lips M. (2018). Das Erhebungssystem ZA2015 der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten: Stichprobe Einkommenssituation und Stichprobe Betriebsführung. *Agroscope Science* 68, 1–105.
- Richter F., Jan P., El Benni N., Lüscher A., Buchmann N., Klaus V.H. (2021). A guide to assess and value ecosystem services of grasslands. *Ecosystem Services* 52, 101376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101376>
- Richter F.J., Suter M., Lüscher A., Buchmann N., El Benni N., Feola-Conz R., Hartmann M., Jan P., Klaus V.H. (2024). Effects of management practices on the ecosystem service multifunctionality of temperate grasslands. *Nature Communications*, 15, 3829. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48049-y>
- Ringger C., Epper C., Liebisch F. (2020). Möglichkeiten des Sensorsupports für die Nährstoffbilanzierung auf landwirtschaftlichen Betrieben: Skizziert am Beispiel der Suisse-Bilanz. Hrsg. Agroscope, Zürich. 34 S.
- Roces-Díaz J.V., Vayreda J., Banqué-Casanovas M., Díaz-Varela E., Bonet J.A., Brotons L., de-Miguel S., Herrando S., Martínez-Vilalta J. (2018). The spatial level of analysis affects the patterns of forest ecosystem services supply and their relationships. *Science of the Total Environment* 626, 1270–1283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.150>
- Roesch A., Gaillard G., Isenring J., Jurt C., Keil N., Nemecek T., Rufener C., Schüpbach B., Umstätter C., Waldvogel T., Walter T., Werner J., Zorn A. (2016). Umfassende Beurteilung der Nachhaltigkeit von Landwirtschaftsbetrieben. *Agroscope Science* 33, 1–278. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/35544>
- Roesch A., Gaillard G., Isenring J., Jurt C., Keil N., Nemecek T., Rufener C., Schüpbach B., Umstätter C., Waldvogel T., Walter T., Werner J., Zorn A. (2017). Comprehensive farm sustainability assessment. *Agroscope Science* 47, 1–248. <https://ira.agroscope.ch/en-US/publication/36452>
- Roesch A., Bystricky M., Nyfeler-Brunner A., Baas H. (2018). Assessment of sustainability indicators on farms under real-life conditions. In: 13th European IFSA Symposium. 1-5 July, Publ. IFSA, Chania, Greece, 1–20. <https://ira.agroscope.ch/en-US/publication/39467>
- Roesch A., Nyfeler-Brunner A., Gaillard G. (2021). Sustainability assessment of farms using SALCAsustain methodology. *Sustainable Production and Consumption* 27, 1392–1405. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.022>
- Roesch A., Flury C., Nemecek T., Mann S., Ritzel C., Gilgen A. (2023). Indicator-based agri-environmental direct payments: Assessment of three systems of different complexity levels. *Ecological Indicators* 147, 109886. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109886>
- Sagoo L., Dowers J., Lively F., Rankin J. (2020). Deliverable 5.1. Review of existing tools available for use on permanent grassland. Super G – Developing SUsustainable PERmanent Grassland systems and policies. https://www.super-g.eu/wp-content/uploads/2021/11/SUPER-G_Task_5.1_DST_Report_FINAL.pdf
- Saleh R., Ehlers M.H. (2023). Exploring farmers' perceptions of social sustainability. *Environment, Development and Sustainability* 27, 6371–6396. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04140-w>
- Salzmann D. (2024). Keine Meldungen an Digiflux. *Schweizer Bauer* (01.05.2024), S. 5.
- Sander A., Ghazoul J., Finger R., Schaub S. (2024). Participation in individual and collective agri-environmental schemes: A synthesis using the Theory of Planned Behaviour. *Journal of Rural Studies* 107, 103255. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103255>
- Sannou R.O., Kirschke S., Günther E. (2023). Integrating the social perspective into the sustainability assessment of agri-food systems: A review of indicators. *Sustainable Production and Consumption* 39, 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.014>.
- Sau P., Arru B., Cisilino F., Furesi R., Pulina P., Madau F.A. (2023). Economic and Environmental Sustainability Trade-Off Analysis in Sheep Farming Using the Farm Accountancy Data Network Database. *Sustainability* 15, 16621. <https://doi.org/10.3390/su152416621>

- Sauvenier X., Valckx J., Van Cauwenbergh N., Wauters E., Bachev H., Biala K., Biolders C., Brouckaert V., Garcia-Cidad V., Goyens S., Hermy M., Mathijs E., Muys B., Vanclooster M., Peeters A. (2005). Framework for assessing sustainability levels in Belgian agricultural systems – SAFE. Part 1: Sustainable production and consumption patterns of a Scientific Support Plan for a Sustainable Development Policy. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/99616/1/MPRA_paper_99616.pdf
- Schader C., Baumgart L., Landert J., Muller A., Ssebunya B., Blockeel J., Weissshaidinger R., Petrasek R., Mészáros D., Padel S., Gerrard C., Smith L., Lindenthal T., Niggli U., Stolze M. (2016). Using the Sustainability Monitoring and Assessment Routine (SMART) for the Systematic Analysis of Trade-Offs and Synergies between Sustainability Dimensions and Themes at Farm Level. *Sustainability* 8(3), 274. <https://doi.org/10.3390/su8030274>
- Schaub S., Ghazoul J., Huber R., Zhang W., Sander A., Rees C., Banerjee S., Finger R. (2023). The role of behavioural factors and opportunity costs in farmers' participation in voluntary agri-environmental schemes: A systematic review. *Journal of Agricultural Economics* 74(3), 617-660. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12538>
- Schaub S., El Benni N. (2024). How do price (risk) changes influence farmers' preferences to reduce fertilizer application? *Agricultural Economics* 55(2), 365–383. <https://doi.org/10.1111/agec.12824>
- Schaub S., El Benni N., Jan P., Huguenin-Elie O., Richter F., Klaus V.H. (2025). Optimizing land-use strategies to improve grassland multifunctionality, *Land Use Policy* 153, 107548, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107548>
- Schils R.L. *et al.* (2022). Permanent grasslands in Europe: Land use change and intensification decrease their multifunctionality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 330, 107891. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107891>
- Schreefel L., Creamer R.E., van Zanten, H.H.E., de Olde E.M., Koppelmäki K., Debernardini M., de Boer I.J.M., Schulte R.P.O. (2024). How to monitor the 'success' of agricultural sustainability: A perspective. *Global Food Security*, Volume 43, 100810. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2024.100810>
- Schulze Schwing D., Bergmann L., Sonntag W. (2022). How to encourage farmers to digitize? A study on user typologies and motivations of farm management information systems, *Computers and Electronics in Agriculture* 199, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107133>
- Sinaj S., Charles R., Baux A., Dupuis B., Hiltbrunner J., Levy Häner L., Pellet D., Blanchet G. und Jeangros B. (2017). 8/ Düngung von Ackerkulturen. In: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). Agrarforschung Schweiz 8(6), 1–46. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/36799>
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241, 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Slijper T., de Mey Y., Poortvliet P.M., Meuwissen M.P.M. (2022). Quantifying the resilience of European farms using FADN. *European Review of Agricultural Economics* 49(1), 121–150. <https://doi.org/10.1093/erae/jbab042>
- Soulé E., Michonneau P., Michel N., Bockstaller C. (2021). Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *Journal of Cleaner Production* 325, 129291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129291>
- Spicka J., Hlavsa T., Soukupova K., Stolbova M. (2019). Approaches to estimation the farm-level economic viability and sustainability in agriculture: A literature review. *Agricultural Economics – Czech*, 65(6), 289–297. <https://doi.org/10.17221/269/2018-AGRICECON>
- Spiess E., Liebisch F. (2020). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2018. *Agroscope Science* 100, 1–30. <https://doi.org/10.34776/as100g>
- Spiess E., Liebisch F. (2022). Entwicklung der Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft bis 2020. *Agroscope Science* 149, 1–23. <https://doi.org/10.34776/as149g>
- Spiess E., Liebisch F. (2023). Nährstoffbilanz der schweizerischen Landwirtschaft für die Jahre 1975 bis 2021. *Agroscope Science* 170, 1–22. <https://doi.org/10.34776/as170g>

- Stähli R., Suter E., Cuendet G. (1997). Die Regenwurm-Fauna von Dauergrünland des Schweizer Mittellandes: Synthesebericht. Vergleichswerte als Interpretationsgrundlage für Regenwurmerhebungen. Dokumentationsdienst, BUWAL.
- Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J. (2010). Chapter Five – Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. *Advances in Agronomy* 107, 163–215. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Sutter M., Reidy B. (2021). Teilevaluation «Nationale Suisse-Bilanz – Fokus Selbstdeklaration» mit ergänzenden Validierungsarbeiten für die Erträge Futterbau. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=67604>
- Talukder B., Blay-Palmer A. (2017). Comparison of Methods to Assess Agricultural Sustainability. In: Lichtfouse E. (Hrsg.). *Sustainable Agricultural Reviews* 25, 149–168. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58679-3_5
- Tanner E., Liebisch F., Bretscher D. (2024). N-Düngereinsparungen mittels der korrigierten Normen: Erfahrungen aus dem Projekt AgroCO₂nccept. *Agrarforschung Schweiz* 15, 304–312. <https://doi.org/10.34776/afs15-304g>
- Thiele-Bruhn S., Schloter M., Wilke B.M., Beaudette L.A., Martin-Laurent F., Cheviron N., Mougin C., Römbke J. (2020). Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment. *Soil* 6, 17–34. <https://doi.org/10.5194/soil-6-17-2020>
- Triquet C., Perennes M., Séchaud R., van der Meer M., Fabian Y., Jeanneret P. (2024). What evidence exists on the effect of the main European lowland crop and grassland management practices on biodiversity indicator species groups? A systematic map. *Environmental Evidence* 13(20), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13750-024-00347-0>
- Umstätter C., Mann S., Werner J. (2022). A simple measure for workload as a social sustainability indicator for family farms. *Environmental and Sustainability Indicators* 14, 100180. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100180>
- Van Cauwenbergh N., Biala K., Biolders C., Brouckaert V., Franchois L., Garcia Ciudad V., Hermey M., Mathijs E., Muys B., Reijnders J., Sauvenier X., Valckx J., Vanclooster M., Van der Veken B., Wauters E., Peeters A. (2007). SAFE—A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 120, 229–242. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.006>
- Vandermeulen H. (1998). The development of marine indicators for coastal zone management. *Ocean & Coastal Management* 39(1), 63–71.
- VBB/BSA (2009). Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. Arbeitsgruppe «Vollzug Bodenbiologie VBB», Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, Frick.
- Vogel H.-J., Eberhardt E., Franko U., Lang B., Liess M., Weller U., Wiesmeier M., Wollschläger U. (2019). Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Frontiers in Environmental Science* 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- Volkov A., Morkunas M., Balezentis T., Streimikiene D. (2022). Are agricultural sustainability and resilience complementary notions? Evidence from the North European agriculture. *Land Use Policy* 112, 105791. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105791>
- White P.J.C., Lee M.A., Roberts D.J., Cole L.J. (2019). Routes to achieving sustainable intensification in simulated dairy farms: The importance of production efficiency and complimentary land uses. *Journal of Applied Ecology*, 1–12. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13347>
- Wimmer, M.A. (2021). Once-Only Principle Good Practices in Europe. In: Krimmer, R., Prentza, A., Mamrot, S. (eds) *The Once-Only Principle. Lecture Notes in Computer Science()*, vol 12621. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79851-2_4
- Yamaguchi C.K., Stefenon S.F., Ramos N.K., Silva dos Santos V., Forbici F., Klaar C.R., Silva Ferreira F.C., Cassol A., Marietto M.L., Yamaguchi S.K.F., de Borba M.L. (2020). Young People's Perceptions about the Difficulties of Entrepreneurship and Developing Rural Properties in Family Agriculture. *Sustainability* 12(21), 8783. <https://doi.org/10.3390/su12218783>

- Zahm F., Viaux P., Vilain L., Girardin P., Mouchet C. (2008). Assessing Farm Sustainability with the IDEA Method – from the Concept of Agriculture Sustainability to Case Studies on Farms. *Sustainable Development* 16, 271–281. <https://doi.org/10.1002/sd.380>
- Zahm F., Alonso Ugaglia A., Barbier J.-M., Carayon D., Del'homme B., Gafsi M., Gasselin P., Gestin C., Girard S., Guichard L., Loyce C., Manneville V., Redlingshöfer B., Rodrigues I. (2024). Assessing farm sustainability: the IDEA4 method, a conceptual framework combining dimensions and properties of sustainability. *Cahiers Agricultures* 33, 10. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024001>
- Zangiabadi S., Zaremaivan H., Brotons L., Mostafavi H., Ranjbar H. (2021). Using climatic variables alone overestimate climate change impacts on predicting distribution of an endemic species. *PLoS One*, 16(9), e0256918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256918>
- Zorn A., Weber A., Lips M. (2016). Wirtschaftliche Indikatoren. In: Roesch A. *et al.* (Hrsg.). *Umfassende Beurteilung der Nachhaltigkeit von Landwirtschaftsbetrieben*. *Agroscope Science* 33, 120–132. <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/35544>
- Zorn A., Esteves M., Baur I., Lips M. (2018). Financial Ratios as Indicators of Economic Sustainability: A quantitative analysis for Swiss dairy farms. *Sustainability* 10, 2942. <https://doi.org/10.3390/su10082942>

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bezugsebenen der in Indicate entwickelten Indikatoren.....	10
Abb. 2: Die Präzisionsnährstoffbilanzierung könnte auf dem Zusammenspiel mehrerer, sich ergänzender Tools basieren. Ein mögliches Szenario illustriert am Beispiel der Suisse-Bilanz (aus dem Bericht von Ringger <i>et al.</i> , 2020).....	13
Abb. 3: Die Präzisionsnährstoffbilanzierung könnte auf dem Zusammenspiel mehrerer, sich ergänzender Tools basieren. Ein mögliches Szenario illustriert am Beispiel der Suisse-Bilanz (aus dem Bericht von Ringger <i>et al.</i> , 2020).....	15
Abb. 4: Gesamtverzehr (links) und Grundfuttermittelverzehr (rechts) einer mehrlaktierenden Kuh (8500 kg Jahresmilchleistung) über Laktation und Galtphase. Jeweils nach der bisher genutzten (Agroscope, 2021) und der neu entwickelten Regressionsgleichung (Mehaba <i>et al.</i> , 2024).....	19
Abb. 5: Trockensubstanzgehalte (g/kg) der Gülleanalysen zu den einzelnen Ausbringzeitpunkten von den beiden Stallabteilen A und B des Emissionsversuchsstalls, entnommen aus den getrennten Güllelagern nach Homogenisieren, im Verlauf der drei Erhebungszeiträume.....	20
Abb. 6: Schematik der In-situ Scankonfigurationen an der Seite des Erdbohrers (a), auf der unveränderten Bodenoberfläche (b) und der geglätteten Bodenoberfläche (c).	22
Abb. 7: Mittelwert des SOC:Ton-Verhältnisses aus vier Behandlungen im DOK-Langzeit-Versuch. Die Vis-NIR-Werte wurden anhand von In-situ-Spektren unter Anwendung des Proximal-Sensing-Modells vorhergesagt. Die Begriffe «Dry Combustion» und «Wet Oxidation» beziehen sich auf zwei verschiedene Laborprotokolle zur SOC-Bestimmung.	25
Abb. 8: Beispiel für eine Grenzwert basierte Beurteilungskurve (scoring curves) zur Normalisierung von Indikatoren für die Strukturqualität (Werte aus Tab. 3). Score 1 = optimal bzw. nicht limitierend (grün), zwischen 1 und 0.5 = Verbesserungspotenzial (gelb), suboptimal, 0.5 = Grenzwert; < 0.5 potenziell limitierend (rot). C _{org} :Ton-Verhältnis hier vereinfacht als Ton:C _{org} dargestellt mit Grenzwert bei 13:1.	27
Abb. 9: Beispiele für einzelne Indikatoren und ihre Beurteilung anhand von Ziel- und Grenzwerten (Tab. 3).	32
Abb. 10: Bodenfunktionsbewertungen (Scores) für die beprobten Bewirtschaftungsvarianten aus den Langzeitversuchen (LTEs) DOK, FAST, SSO und ZOF, mit 3–4 Wiederholungen je Variante.....	33
Abb. 11: Methodenvergleich für organischen Kohlenstoff (C _{org}) bzw. das Verhältnis C _{org} zu Ton im DOK-Versuch. Bei der Verbrennungsmethode wurde der Karbonat-C-Gehalt, der durch die Scheibler-Methode bestimmt wurde, abgezogen. Nasschemische Oxidation mit Kaliumdichromat; Modellierung anhand vis-NIR Spektren	35
Abb. 12: Zusammenhang zwischen nicht produktiver Multifunktionalität und der Anzahl der Gefässpflanzenarten auf der Graslandfläche.	42
Abb. 13: Das von der EEA (1999) übernommene DPSIR-Modell.	48
Abb. 14: Mapping und Clustering des Indikatorensystems.	51
Abb. 15: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1b) und Zielpublikum (D3).....	52
Abb. 16: Indikatorabdeckung auf Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltfragen (D1b) und Ursache-Wirkungs-Kette (DPSIR) (D2).....	53
Abb. 17: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1b) und Zielpublikum (D3).....	54
Abb. 18: Kategorisierung von Interessensgruppen sozialer Nachhaltigkeitsaspekte in der Landwirtschaft (konzeptuell teilweise basierend auf Guptill und SARE Quality-of-Life working group 2021).....	59

Abb. 19: Netz der Interaktionen unterschiedlicher Player im System der Ernährungswirtschaft (Quelle: ISO, 2023).	72
Abb. 20: Darstellung des Kreislaufs von Fütterung – Kuh Ausscheidung – Gülle (inkl. Verdünnung) zum Ausbringzeitpunkt – Feld – Futterlager.....	76
Abb. 21: Übergang von der Zentralen Auswertung von Agrarumweltindikatoren (ZA-AUI) zum Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS). Beide Systeme haben zum Ziel, die Umweltwirkung der Schweizer Landwirtschaft für Regionen und Betriebstypen über die Zeit darzustellen.	78
Abb. 22: Konzept, wie die Daten aus verschiedenen FMIS (Farm-Management-Informationssystemen) in Zukunft in das Monitoring des Agrarumweltsystems Schweiz (MAUS) eingebunden werden könnten. Datenstandards und API-Schnittstellen ermöglichen es verschiedenen FMIS, die Daten in derselben Form an Agroscope liefern. Die Landwirtschaftsbetriebe können wählen, über welches FMIS sie Daten liefern wollen. Die Lieferung der Daten wird finanziell entschädigt.	80
Abb. 23: Auszug aus dem MAUS-Baustein, Blatt «Massnahmen». Als Beispiel wird eine Saatmassnahme von Winterraps im Detail gezeigt.....	85
Abb. 24: Auszug aus dem MAUS-Baustein. Automatisierte Kontrolle der eingesetzten Pflanzenschutzmittelmenge.	85

8.1 Übersetzung der englischen Grafikbeschriftungen

Englisch	Deutsch
Abiotic resource use	Nutzung abiotischer Ressourcen
Aesthetics	Ästhetik
Agr Productivity	Landwirtschaftliche Produktivität
Air	Luft
Air capacity	Luftkapazität
Ammonia emissions	Ammoniakemissionen
AMR (Antimicrobial Resistance)	Antimikrobielle Resistenz
Animal production	Tierproduktion
Aquatic Ecotoxicity Risk	Aquatische Ökotoxizität
Atmosphere	Atmosphäre
Basal respiration	Basalatmung
Base saturation (CEC)	Basensättigung (KAK)
Biodiversity	Biodiversität
CEC	Basensättigung (KAK)
CEENE (Cumulative exergy extraction from the natural environment)	CEENE (kumulative Exergieentnahme aus der Umwelt)
Clay content	Tongehalt
Climate	Klima
Climate change (Potential)	(Potentielle) Klimaveränderung
Climate regulation (N ₂ O)	Klimaregulation (N ₂ O)
Climate regulation (SOC)	Klimaregulierung (organischer Kohlenstoff im Boden)
Compaction	Verdichtung
Concentrate feed	Kraffutter
Contaminated drinking water	Kontaminiertes Trinkwasser
C _{org} (or SOC)	Organischer Kohlenstoff im Boden (SOC)
Crop fertilisation intensity	Intensiver Düngemittleinsatz
Crop production	Pflanzenproduktion

Englisch	Deutsch
Cultural significance	Kulturelle Bedeutung
Drinking water	Trinkwasser
Driver	Ursachen
Driving force	Triebkräfte
Dry matter intake (concentrate feed)	Trockensubstanzaufnahme (Kraftfutter)
Dry matter intake (roughage)	Trockensubstanzaufnahme (Raufutter)
Earthworm biomass	Regenwürmer-Biomasse
EcoTox – freshwater	Süßwasser-Ökotoxizität
EcoTox – terrestrial	Terrestrische Ökotoxizität
Edible plants	Essbare Pflanzen
Effective storage density	Effektive Speicherdichte
Emerging issues	Neu auftretende Probleme
Energy demand	Energiebedarf
Energy efficiency	Energieeffizienz
Equitable index	Gleichverteilungsindex
Erosion	Erosion
Erosion control	Erosionsschutz
Erosion risk	Erosionsrisiko
Eutrophication	Eutrophierung
Eutrophication freshwater	Eutrophierung von Süßwasser
Eutrophication marine	Eutrophierung von Meeresökosystemen
Eutrophication terrestrial	Eutrophierung von Landökosystemen
Exchangeable Mg	Austauschbares Mg
Excretion volume	Ausscheidungsvolumen
Farm	Landwirtschaftsbetrieb
Farm shape	Betriebsform
Fertiliser use restrictions	Beschränkungen des Düngemittleinsatzes
Fertility	Fruchtbarkeit
Field capacity	Feldkapazität
Fodder quality	Futterqualität
Fossil	Fossile Energie
Freshwater ecosystems	Süßwasser-Ökosysteme
Functional diversity	Funktionelle Diversität
Genetic diversity	Genetische Diversität
GHG emissions	Treibhausgasemissionen
Ground-dwelling arthropods	Bodenarthropoden
Habitat & biodiversity (abundance)	Lebensraum und Biodiversität (Häufigkeit)
Habitat & biodiversity (diversity)	Lebensraum und Biodiversität (Vielfalt)
Habitat diversity	Habitatvielfalt
Habitat richness	Vielfalt der Habitattypen
Heavy metal balance (Cu, Zn)	Schwermetallbilanz (Cu, Zn)
Heavy metal excretion (Cu, Zn)	Schwermetall-Ausscheidung (Cu, Zn)
Heavy metal intake	Schwermetall-Aufnahme
Human health	Menschliche Gesundheit
Human toxicity	Toxizität für den Menschen
Humus balance	Humusbilanz
Hydrosphere	Hydrosphäre
Iconic fungi	Charakteristische Pilze

Englisch	Deutsch
Impact	Auswirkung
ISG Earthworms	Indikatorartengruppe Regenwürmer
ISG Ground-dwelling arthropods	Indikatorartengruppe Bodenarthropoden
ISG vascular plants	Indikatorartengruppe Gefäßpflanzen
Land occupation	Landnutzung
Land transformation (deforestation)	Landnutzungsänderung (Entwaldung)
Land use biodiversity (SALCA)	Landnutzung - Biodiversität (SALCA)
Landscape	Landschaft
Livestock presence	Viehbestand
Microbial biomass (quotient)	Mikrobielle Biomasse (Quotient)
(Microbial) Respiration	(Mikrobielle) Atmung
Minerals	Mineralien
N ₂ fixation	N ₂ -Fixierung
Natural resources	Natürliche Ressourcen
N-Balance (OECD, Suisse Bilanz)	N-Bilanz (OECD, Suisse Bilanz)
N-content in water	N-Konzentration im Wasser
Nectar availability	Nektarverfügbarkeit
Non-renewable energy use	Nutzung nicht erneuerbarer Energien
Nutrient efficiency	Nährstoffeffizienz
Nutrient emissions	Nährstoffemissionen
Nutrient excretion (Ca, K, N, P)	Nährstoffausscheidung (Ca, K, N, P)
Nutrient intake	Nährstoffaufnahme
Ozone depletion	Ozonabbau
Particulate matter	Feinstaub
P-Balance (OECD, Suisse Bilanz)	P-Bilanz (OECD, Suisse Bilanz)
Pedosphere	Pedosphäre
Pest control	Schädlingsbekämpfung
Photochemical ozone formation	Photochemische Ozonbildung
Plastic pollution (micro nano)	Plastikverschmutzung (Mikro-/Nanopartikel)
Policy	Politik
Potential N loss	Potenzieller N-Verlust
POXC	POXC
PPP use	Pflanzenschutzmitteleinsatz
Precision farming	Präzisionslandwirtschaft
Presence of endosymbiotic fungi	Endosymbiotische Pilze
Presence of plant pathogenes	Pflanzenpathogene
Presence of weeds	Unkraut
Pressure	Belastung
Reduction of eutrophication	Reduktion der Eutrophierung
Reduction of heavy metal concentration	Reduktion Schwermetallkonzentration
Reduction of soil compaction risk	Reduktion des Bodenverdichtungsrisikos
Renewable energy use	Nutzung erneuerbarer Energien
Research	Forschung
Respiration	Atmung
Response	Massnahme
Roughage	Raufutter
SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment)	Ökobilanzmethode SALCA
SemiNat (semi-natural)	Anteil halbnatürlicher Habitate (SemiNat)

Englisch	Deutsch
SOC	Organischer Kohlenstoff im Boden (SOC)
SOC:clay	SOC:Ton-Verhältnis
SOC:clay ratio	SOC:Ton-Verhältnis
Soil cover	Bodenbedeckung
Soil pH	Boden-pH
Soil quality (SALCA)	Bodenqualität (SALCA)
Soil quality index (LANCA)	Bodenqualitätsindex (LANCA)
SPB = surface promoting biodiversity	Biodiversitäts-Förder-Flächen (BFF)
SPB Arable land	BFF Ackerland
SPB Grasslands	BFF Grasland
SPB Hedgerows	BFF Hecken
SPB Trees	BFF Bäume
Species & habitat diversity	Vielfalt der Arten und Lebensräume
Species loss potential	Artenverlustpotenzial
State	Zustand
Structural elements	Strukturelle Elemente
Terrestrial acidification	Bodenversauerung
Total N	Gesamtstickstoff
Vascular plants	Gefäßpflanzen
Water	Wasser
Water scarcity (AWA)RE (Available WAter Remaining)	Wasserknappheit (AWA)RE (Available WAter Remaining)
Water use	Wassernutzung
Yield	Ertrag

8.2 Projektabkürzungen in den Grafiken

Projekt	Abkürzung des Projekts in der Grafik
Nährstoffflüsse abbilden	ParzNF
Nährstoffmanagement Hofdünger	SIMHofdünger
Indikator Bodenfruchtbarkeit einfach messen	ProximalSensing
Indikatoren Bodenzustand und Bodenbewirtschaftung	Bodencockpit
Indikatoren Biodiversität	BioSerSys
Indikatoren von Ökosystemleistungen im Grasland	IndiGras
Indikatoren für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung	360i
Indikatoren für das Agrarumweltmanagement	AUM

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Trockensubstanz(TS)-Verzehr von laktierenden Milchkühen nach verschiedenen Verzehrsmoellen.	19
Tab. 2: Übersicht über die Modelleleistungsindikatoren zu den erfolgreich vorhergesagten Bodenparametern für den Scanner PSR+3500 und den Scanner NeoSpectra mit dem Determinationskoeffizient (R^2), der Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers der Vorhersage (RMSEP) und dem Verhältnis der Leistung zum Interquartilsabstand (RPIQ).	23
Tab. 3: Ausgewählte Indikatoren (chem = chemisch, phys = physikalisch, bio = biologisch) für die Bodenzustandsbewertung mit Referenzwerten- bzw. Gleichungen. Methode nach Agroscope FAL wenn nicht spezifiziert; Sc = Score/Bewertung (zwischen 0 und 1) für die lineare Bewertungskurve/Scoring curve.	28
Tab. 4: Berechnung der Bodenfunktionen anhand von Indikator-Proxies, Aggregierung und Betrachtung weiterer Bodendaten.	30
Tab. 5: Ergebnisse der schrittweisen linearen Regressionsmodellierung zur Bewertung der Kohlenstoffvorräte im Boden (als Beispiel). Das Modell wurde schrittweise um zusätzliche Datenquellen zur Schätzung der ÖSL erweitert (Modell 1 bezog die Datenquelle i ein, Modell 2 die Datenquellen i und ii, usw.), und die Entwicklung der Modellgüte wurde berechnet.	43
Tab. 6: Bestimmtheitsmasse der Modelle für die Futterqualität (Rohproteingehalt im ersten Schnitt), die Anzahl der Gefässpflanzenarten, das Nektarangebot und den ästhetischen Wert der Pflanzengemeinschaft. Wie in der Tab. 5, Modell 1 bezog die Datenquelle i ein, Modell 2 die Datenquellen i und ii, usw., bis zum Modell 6, das alle 6 Datensätze einbezog.	43
Tab. 7: Auswahl an Themen für die Evaluierung sozialer Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebe (Quellen: Alaoui <i>et al.</i> , 2022; Bathaei & Štreimikiene, 2023; Desiderio <i>et al.</i> , 2022; Lebacqz <i>et al.</i> , 2013; Mills <i>et al.</i> , 2021; Sannou <i>et al.</i> , 2023; Roesch <i>et al.</i> , 2016).	60
Tab. 8: Themen sozialer Nachhaltigkeit aus Sicht der Landwirtinnen und Landwirte (basierend auf Baccar <i>et al.</i> , 2020 ^a ; Contzen & Häberli, 2021 ^b ; Saleh & Ehlers, 2023 ^c ; Yamaguchi <i>et al.</i> , 2020 ^d).	62
Tab. 9: Abdeckung der für Landwirte und Landwirtinnen wichtigen Themen sozialer Nachhaltigkeit von sieben Nachhaltigkeitsbewertungstools (zwei Häkchen/ein Häkchen = vollständig/teilweise abgedeckt, grün/orange = explizit/implizit abgedeckt, s/o/u = subjektives/objektives/unbekanntes Mass).	63
Tab. 10: Indikatoren für Themen, die den Landwirtinnen und Landwirten wichtig sind, mit bereits getesteten Skalen.	65
Tab. 11: Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit und Resilienz (basierend auf Meuwissen <i>et al.</i> , 2019; Sau <i>et al.</i> , 2023; Slijper <i>et al.</i> , 2022 und Zorn <i>et al.</i> ; 2016).	69
Tab. 12: Übersicht der Agrarumweltindikatoren, die im MAUS berechnet werden. Die Indikatoren sind nach der primären räumlichen Skala ihrer Umweltwirkung gruppiert. Beispielsweise hat die Schwermetallbilanz primär einen lokalen Effekt auf den betroffenen Boden, während sich Treibhausgase in der Atmosphäre verteilen zu einem globalen Temperaturanstieg führen.	78
Tab. 13: Stark gekürzter und vereinfachter Auszug aus dem festgelegten Standard, in dem FMIS Feldkalenderdaten für MAUS liefern können.	82

10 Anhänge

Anhang A1 Kategorisierung der Indikatoren

Dimension 1 (D1) – Agrarumwelthemen und -fragen

Tab. A1: Für die Kategorisierung der Indikatoren verwendete Agrarumwelthemen und -fragen

1. Hydrosphäre	5. Biodiversität
1.1. Trinkwasser	5.1. Vielfalt der Arten und Lebensräume
1.2. Süsswasser-Ökosysteme	5.2. Genetische Diversität
2. Pedosphäre	5.3. Funktionelle Diversität
2.1. Bodenfruchtbarkeit	6. Neu auftretende Probleme
2.2. Bodenerosion	6.1. Antimikrobielle Resistenz (AMR)
2.3. Bodenverdichtung	6.2. Mikroplastik
3. Atmosphäre	6.3. Menschliche Gesundheit
3.1. Luft	7. Landwirtschaftliche Produktivität
3.2. Klima	7.1. Tierproduktion
4. Natürliche Ressourcen	7.2. Pflanzenproduktion
4.1. Wasser	8. Landschaft
4.2. Land	8.1. Kulturelle Bedeutung
4.3. Fossile Energie	8.2. Ästhetik
4.4. Mineralien	8.3. Strukturelle Elemente

D2 – Ursache-Wirkungs-Kette

Tab. A2: Ursache-Wirkungs-Kette: DPSIR-Modell (Drivers-Pressures-State-Impacts-Response)

Kategorie	Beschreibung
Driver (Ursachen)	Umfasst alle sozioökonomischen Faktoren, die den Verbrauch und die Produktion beeinflussen, die wiederum Druck auf die Umwelt ausüben. Ursachen-Indikatoren helfen, die Ursachen von Umweltproblemen zu verstehen. Es bestehen verschiedene Ursachen-Stufen. Die EEA (1999) identifiziert das Bevölkerungswachstum und die damit verbundene sozioökonomische Entwicklung als primäre Ursache, da er zu Veränderungen des Verbrauchs und zu entsprechenden Veränderungen der Produktion in einem bestimmten Kontext führt. Für das Mapping der Indikatoren betrachten wir die landwirtschaftlichen Praktiken als Ursachen, da sich das Indicate-Forschungsprogramm eher auf die betriebliche Ebene als auf höhere bzw. Meta-Ebenen konzentriert.
Pressure (Belastungen)	Faktoren, die natürliche Prozesse verändern oder Druck auf diese ausüben. Belastungs-Indikatoren geben Aufschluss über die Mechanismen, die zu Umweltveränderungen führen. Typische Beispiele sind Veränderungen bei den Emissionen (z. B. Schädlinge durch den Einsatz von Pestiziden) und die Nutzung von Ressourcen (einschliesslich Land), die sich aus menschlichen Aktivitäten ergeben. Je nach Analyseebene werden Emissionen und Ressourcennutzung im Allgemeinen als Belastungen betrachtet (Gabrielsen & Bosch, 2003).
State (Zustand)	Beschreibt quantitative und/oder qualitative Aspekte der Umwelt und ihrer physikalischen, biologischen und chemischen Komponenten an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt, z. B. die Temperatur, die Populationsgrösse einer bestimmten Art oder die CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre. Zustands-Indikatoren geben über einen Zeitverlauf Aufschluss zu Ausmass, räumlicher Verteilung und zeitlichen Trends von Umweltveränderungen.
Impact (Auswirkungen)	Auswirkungs-Indikatoren beschreiben die (positiven oder negativen, endgültigen oder vorübergehenden) Auswirkungen, die sich aus Veränderungen des Zustands der Umwelt und ihrer Komponenten ergeben und die letztlich Einfluss auf die menschlichen Aktivitäten oder auf Bevölkerungsgruppen ausüben. Sie entsprechen den durch die Umweltbelastung bewirkten Veränderungen der physikalischen, biologischen und/oder chemischen Bedingungen. Dabei kann es sich um isolierte Auswirkungen oder um eine Kaskade von Auswirkungen handeln. Beispiel: (1) Änderungen des Strahlungsantriebs führen zu (2) einem Anstieg der globalen Temperaturen, der wiederum zu (3) einem Anstieg des Meeresspiegels führt. Es ist zu beachten, dass das DPSIR-Modell nur Auswirkungen berücksichtigt, die <i>sich direkt auf menschliche Aktivitäten auswirken</i> und die auf eine Verringerung oder das Verschwinden früher verfügbarer Umweltfunktionen oder -eigenschaften zurückzuführen sind, die für die betreffenden menschlichen Aktivitäten genutzt werden.
Response (Massnahmen)	Bezieht sich auf Interventionen (Aktionen, Massnahmen), die bestimmte Akteure (Konsumenten, Produzenten, Behörden usw.) oder Einzelpersonen unternehmen können, um Umweltprobleme zu lösen (Milderung, Förderung oder Wiederherstellung von Funktionen usw.). Diese Massnahmen können auf jedes andere Element der Kausalkette abzielen. Massnahmen-Indikatoren geben also Rückmeldung zu Wirksamkeit, Effizienz und Eignung von Massnahmen.

D3 – Zielpublikum

Tab. A3: Zielgruppen

Gruppe	Beschreibung / Einschlusskriterien
Landwirt/innen	<u>Wer:</u> Leiterinnen und Leiter von Landwirtschaftsbetrieben und im weiteren Sinne auch landwirtschaftliche Beraterinnen und Berater. <u>Merkmale des Indikators:</u> - Leicht verständlich, relativ einfach in der Berechnung - Die vermittelten Informationen sind praktisch und relevant für die tägliche Arbeit in der Landwirtschaft
Politische Entscheidungsträger/innen	<u>Wer:</u> Regierungsbeamte und andere politische Akteure (z. B. Interessengruppen, Label-Organisationen). <u>Merkmale des Indikators:</u> - Gibt Einblicke in komplexe Themen, typischerweise über längere Zeiträume und über höhere räumliche Ebenen - Die vermittelten Informationen dienen der Entscheidungsfindung oder der Steuerung von Strategien, wobei ein gewisses Mass an Fachwissen (z. B. aus dem privaten Sektor) erforderlich ist
Forschende	<u>Wer:</u> Akademikerinnen und Akademiker, im weiteren Sinne nicht-akademische Forschungsinstitute <u>Merkmale des Indikators:</u> - In der Regel hochspezialisiert und ressourcenintensiv, z. B. durch die Verwendung detaillierter Daten, komplexer Methoden oder fortgeschrittener statistischer Analysen - Dienen der eingehenden Untersuchung komplexer Phänomene und der zugrunde liegenden Mechanismen - Interpretation erfordert fortgeschrittenes Expertenwissen

D4 – Räumliche Skala

Die räumliche Skala ist für die Bewertung der vom Indikator gelieferten Informationen relevant. Sie umfasst gegebenenfalls auch Upscaling/Downscaling-Ansätze.

Tab. A4: Für die Kategorisierung der Indikatoren verwendete räumliche Skala

Kategorien	
• Parzelle/Feld	• Region/Landschaft
• Kultur	• National
• Herde	• Sub-/kontinental
• Landwirtschaftsbetrieb	• Global

D5 – Zeitliche Skala

Zeitliche Skala des Gegenstands der Bewertung (Kompartimente, Prozesse, Mechanismen oder Phänomene). Wenn mehrere, in unterschiedlichen Zeiträumen auftretende Aspekte betroffen sind, wird der Indikator der relevantesten oder dominierenden Kategorie zugeordnet.

Tab. A5: Für die Kategorisierung der Indikatoren verwendete zeitliche Skala

Kategorie	Beschreibung
Kurzfristig	< 5 Jahre
Mittelfristig	5-25 Jahre
Langfristig	> 25 Jahre

D6 – Rahmen für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit

Dimension 6 beschreibt den Rahmen für die Umweltbewertung eines Indikatorensets bzw. des entsprechenden Projekts. Auf diese Weise können Bereiche mit potenziellen Synergien und Komplementaritäten zwischen verschiedenen Forschungsdisziplinen und ihren Konzepten für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit aufgezeigt werden (Tab. A6).

Tab. A6: Für die Kategorisierung der Indikatoren verwendeter Rahmen zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit

Kategorie	Beschreibung	Art der Bewertung
AUI	Agrarumweltindikatoren	Beobachtung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung des Beitrags der Landwirtschaft zu Umweltproblemen, in der Regel auf Sektorebene aus einer politikorientierten Perspektive.
LCA	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)	Standardisierter Ansatz (ISO14040/44) zur Bewertung <i>potenzieller negativer</i> Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit menschlichen Tätigkeiten; kann auf verschiedenen Ebenen durchgeführt werden (z. B. Produkt, Organisationsebene). Beruht jedoch in der Regel auf standardisierten/gemittelten Daten (so genannten Lebenszyklusinventaren) und verwendet eher komplexe Methoden, die sich auf die langfristigen Auswirkungen aus einer umweltorientierten Perspektive konzentrieren.
ESA	Bewertung von Ökosystemleistungen (Ecosystem Services Assessment)	Interdisziplinärer Ansatz zur Bewertung der <i>positiven</i> «Auswirkungen» von Ökosystemen auf das menschliche Wohlergehen (d. h. Ökosystemleistungen) und der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen gut funktionierenden Ökosystemen und menschlichen Aktivitäten. Beruht in der Regel auf einem menschenorientierten (anthropozentrischen) Ansatz.
Management	Betriebsführung	Bezieht sich auf Indikatoren zur Führung von Landwirtschaftsbetrieben, es handelt sich aber nicht um einen eigentlichen Bewertungsrahmen. Indikatoren für die Entscheidungsfindung und die Planung der täglichen landwirtschaftlichen Tätigkeiten

Anhang A2 Agrarumweltthemen (D1a) und Agrarumweltfragen (D1b)

Tab. A7: Kategorien von Agrarumweltthemen (D1a) und Agrarumweltfragen (D1b), Einschluss- und Ausschlusskriterien und Beziehungen zu Agrarumweltzielen

Themen (D1a) > Fragen (D1b)	Kurzbeschreibung	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien	Verwandte Ziele
1. Hydrosphäre	Aspekte im Zusammenhang mit der Wasserqualität (Oberflächen- und Grundwasser)	Alle Aspekte im Zusammenhang mit der Wasserqualität, die in den Punkten 1.1. und 1.2. enthalten sind.	Aspekte in direktem Zusammenhang mit AMR (implizit durch Interpretation oder explizit erwähnt)	UZL 7a-b; UZL 8; UZL 9a-c; UZL 12a-c
1.1. Trinkwasser	Aspekte im Zusammenhang mit der Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (einschliesslich industrieller Nutzung)	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) für die Trinkwasserqualität (einschliesslich Trinkwasserquellen wie Grundwasser), für die damit einhergehenden Risiken und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (Toxizität) und für die damit verbundenen Ursachen, d. h. Schadstoffe (stickstoffhaltige Düngemittel, Pflanzenschutzmittel) und Mechanismen des Schadstofftransports (Erosion, Oberflächenabfluss)	Schadstoffe auf Phosphorbasis; AMR-bezogene Themen; Bodenverdichtung (die damit verbundenen Auswirkungen auf das Wasser werden unter dem Thema Bodenerosion behandelt); Aspekte im Zusammenhang mit Süswasser-Ökosystemen (einschliesslich Funktionen, Lebensräume und Arten)	UZL 7a; UZL 9a; UZL 9c; UZL 10; UZL 12a; UZL 12c
1.2. Süswasser-Ökosysteme	Aspekte im Zusammenhang mit der Wasserqualität, die für die Erhaltung von Süswasserökosystemen und ihrer natürlichen Funktionen erforderlich sind	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) für Süswasserökosysteme (Flüsse, Seen, Sümpfe, Teiche usw.), für die damit einhergehenden Risiken und Auswirkungen auf Ökosysteme und ihre Funktionen (z. B. Eutrophierung) und für die damit verbundenen Ursachen, d. h. Schadstoffe (stickstoff- und phosphorhaltige Düngemittel, Pflanzenschutzmittel) und Mechanismen des Schadstofftransports (Erosion, Oberflächenabfluss)	Bodenverdichtung (die damit verbundenen Auswirkungen auf das Wasser werden unter dem Thema Bodenerosion behandelt); AMR-bezogene Themen; Vielfalt von an Land lebenden Arten (Ausnahme: Schlüsselindikatorarten, die üblicherweise als Proxy-Indikator für die Süswasserqualität verwendet werden); Zonenplanung und landnutzungsbezogene Aspekte (behandelt in UZL 3)	UZL 3; UZL 5; UZL 7b; UZL 8; UZL 9a; UZL 9c; UZL 10; UZL 12a; UZL 12c
2. Pedosphäre	Aspekte im Zusammenhang mit der Bodenqualität	Alle Aspekte im Zusammenhang mit den Punkten 2.1.-2.3.		UZL 5; UZL 7a-b; UZL 8; UZL 9c; UZL 10; UZL 11a-b; UZL 12a-c; UZL 13
2.1. Fruchtbarkeit	Prozesse und Probleme, die sich auf die Fähigkeit der Böden auswirken, die für das Pflanzenwachstum erforderlichen Nährstoffe bereitzustellen (mit Schwerpunkt auf Kulturpflanzen)	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) der Bodenfruchtbarkeit (einschliesslich biologischer, chemischer und physikalischer Aspekte) und von Prozessen, die sich direkt positiv oder negativ auf die Bodenfruchtbarkeit auswirken (organische und anorganische Schadstoffe, Düngemittel), sowie Deskriptoren der Pflanzenproduktivität (z. B. Ernteertrag)	Nachgelagerte Prozesse, die auf Überdüngung zurückzuführen sind (behandelt unter den Themen Bodenerosion und Bodenverdichtung); AMR-bezogene Themen	UZL 5; UZL 11a-b; UZL 12a-b; UZL 13

Themen (D1a) > Fragen (D1b)	Kurzbeschreibung	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien	Verwandte Ziele
2.2. Erosion	Prozesse und Mechanismen, die zur Bodenerosion beitragen oder von ihr betroffen sind	Deskriptoren der Bodenerosion und von damit verbundenen Prozessen		UZL 7a-b; UZL 8; UZL 9c; UZL 10; UZL 11a-b; UZL 12a-c; UZL 13
2.3. Verdichtung	Prozesse und Mechanismen, die zur Bodenverdichtung beitragen oder von ihr betroffen sind	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) der Bodenverdichtung und der Prozesse, die direkt zur Bodenverdichtung beitragen oder von ihr beeinflusst werden		UZL 12a; UZL 12c; UZL 13
3. Atmosphäre	Aspekte im Zusammenhang mit der Luftqualität und dem Klimawandel	Alle Aspekte im Zusammenhang mit den Punkten 3.1. und 3.2.		UZL 4-6
3.1. Luft	Schadstoffe und Prozesse, die die Luftqualität in der Nähe von Punktquellen oder in grösserer Entfernung beeinflussen	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) der Luftqualität und der schädlichen Auswirkungen auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit, z. B. Feinstaub, Smog	Aspekte des Klimawandels	UZL 5, UZL 6
3.2. Klima	Treibhausgasemissionen und Fragen im Zusammenhang mit dem Klimawandel	Emissionen von Treibhausgasen und Vorläufersubstanzen (Ammoniak, NOx, Nitrat)	Auswirkungen auf Menschen und Ökosysteme in direktem Zusammenhang mit dem Thema Luftqualität	UZL 4-6
4. Natürliche Ressourcen	Alle Aspekte im Zusammenhang mit Nutzung, Erschöpfung, Konflikten oder der konkurrierenden Nutzung natürlicher Ressourcen durch landwirtschaftliche Tätigkeiten (direkt oder indirekt)	Alle Aspekte im Zusammenhang mit den Themen 4.1.-4.4.	Aspekte im Zusammenhang mit der Qualität von Wasser, Boden und Luft	(keine expliziten)
4.1. Wasser	Aspekte im Zusammenhang mit Wassernutzung, -bewirtschaftung und -verfügbarkeit	Deskriptoren der Wassernutzung, -bewirtschaftung und -verfügbarkeit sowie der damit verbundenen Konflikte und konkurrierenden Nutzungen		UZL 3
4.2. Land	Aspekte im Zusammenhang mit der Flächennutzung, der Landnutzungsdauer und der Umstellung von oder auf Landwirtschaft	Fragen im Zusammenhang mit Landnutzungsdauer, Umstellung und Nutzungskonflikten. Einschliesslich Beeinträchtigung von Wasserläufen durch landwirtschaftliche Flächen		UZL 2a, UZL 2b, UZL 3
4.3. Fossile Energie	Fragen im Zusammenhang mit der Nutzung fossiler Ressourcen für Brenn- und Kraftstoffe oder Materialien im Rahmen landwirtschaftlicher Tätigkeiten	Direkter und indirekter Verbrauch fossiler Ressourcen (Brenn- und Kraftstoffe und aus Erdöl gewonnene Materialien wie Kunststoffe und mineralische N-Düngemittel)		UZL 4; UZL 6

Themen (D1a) > Fragen (D1b)	Kurzbeschreibung	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien	Verwandte Ziele
4.4. Mineralien	Jede mineralische Ressource, die direkt (z. B. Phosphorreserven für Mineraldünger) und indirekt (z. B. Metallbestandteile in Maschinen) genutzt wird, und Erschöpfung mineralischer Reserven	Verwendung von Mineraldünger auf Phosphorbasis und Nutzung anderer Mineralien, die in Materialien und Stoffen für landwirtschaftliche Tätigkeiten verwendet werden		Keine
5. Biodiversität	Aspekte im Zusammenhang mit der biologischen Vielfalt im weitesten Sinne und Interaktionen mit anderen Prozessen	Alle in den Themen 5.1.-5.3. abgedeckten Aspekte	Biologische Vielfalt im Wasser	UZL 1a, UZL 1b, UZL 1c, UZL 2b, UZL 5
5.1. Arten und Lebensräume	Domestizierte bzw. kultivierte oder wildlebende Pflanzen- und Tierarten und ihre Lebensräume auf landwirtschaftlichen Flächen oder in deren Umgebung	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) von Arten und Lebensräumen, von Prozessen, die sich auf Pflanzen- und Tierarten und ihre Lebensräume auswirken, von damit verbundenen Risiken und Auswirkungen (z. B. durch Schädlingsbekämpfungsmittel und Überdüngung), Massnahmen zum Schutz oder zur Förderung der Vielfalt von Arten und Lebensräumen	Arten und Lebensräume im Wasser	UZL 1a; UZL 2a; UZL 5
5.2. Genetische Diversität	Genetische Diversität innerhalb und zwischen den Arten der Fauna und Flora	Deskriptoren (direkt oder Proxy-Deskriptoren) der genetischen Diversität der Flora und Fauna von domestizierten bzw. kultivierten oder wildlebenden Arten, die auf landwirtschaftlichen Flächen oder in deren Umgebung natürlich vorkommen	Genetische Diversität im Wasser	UZL 1b
5.3. Funktionelle Vielfalt	Aspekte im Zusammenhang mit funktionierenden Agrarökosystemen	Deskriptoren (direkte oder Proxy-Deskriptoren) für Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen im Zusammenhang mit der Biodiversität	Ökosysteme im Wasser	UZL 1c; UZL 5; UZL 11a-b; UZL 12b; UZL 13
6. Neu auftretende Probleme	Neu auftretende und komplexe Probleme, die von landwirtschaftlichen Tätigkeiten betroffen sind oder mit diesen in Zusammenhang stehen	Alle Aspekte, die sich auf neuartige Problembereiche / Themen beziehen, die nicht von den anderen Themen und Fragen abgedeckt werden, einschliesslich der Aspekte, die sich auf die Themen 6.1. bis 6.3. beziehen.		keine expliziten
6.1. Antimikrobielle Resistenzen (AMR)	Die Entwicklung resistenter Stämme von Mikroorganismen, die eine Gefahr für die Gesundheit von Mensch, Tier und Boden darstellen	Indikatoren für AMR (d.h. resistente Stämme von Bakterien, Viren, Pilzen und Parasiten)		Implizit / durch Interpretation: UZL 9a-c; UZL 10

Themen (D1a) > Fragen (D1b)	Kurzbeschreibung	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien	Verwandte Ziele
6.2. Mikroplastik	Kunststoff-Mikropartikel (einschliesslich Nanopartikel)	Verschmutzung durch Kunststoffpartikel, verursacht direkt durch den Abbau von Kunststoffen (z. B. Isolierfolien, Kunststoffwasserleitungen für die Bewässerung) oder durch die Freisetzung von Mikropartikeln aus indirekten Quellen (Abnutzung von Geräten und Maschinen, biologisch nicht abbaubare Polymere in Mineraldüngern und anderen Mitteln, Bioakkumulation und Ausbreitung durch Hofdünger)		Keine
6.3. Menschliche Gesundheit	Themen im Zusammenhang mit der menschlichen Gesundheit	Prozesse und Vorläufersubstanzen, die negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, insbesondere toxische Wirkungen, und negative Gesundheitsauswirkungen durch den Einsatz von Dünge- und Schädlingsbekämpfungsmitteln, beeinträchtigte Luftqualität und den Klimawandel	AMR-bezogene Themen (abgedeckt in Thema 6.1.)	UZL 4-6; UZL 7a; UZL 9a-b; UZL 10; UZL 11a
7. Landwirtschaftliche Produktivität	Alle Aspekte, die in direktem Zusammenhang mit den täglichen landwirtschaftlichen Tätigkeiten stehen	Aspekte der Betriebsführung im Zusammenhang mit der Tier- und Pflanzenproduktion (Fragen 7.1.-7.2.)	End-of-Pipe-Themen	UZL 5
7.1. Tierproduktion	Im Zusammenhang mit der tierischen Produktion	Haltungsbedingungen, Hofdüngerbewirtschaftung	Düngeverfahren	UZL 5
7.2. Pflanzenproduktion	Im Zusammenhang mit der pflanzlichen Produktion	Düngemanagement	Hofdüngermanagement	UZL 5
8. Landschaft	Alle Aspekte im Zusammenhang mit strukturellen, visuellen und immateriellen Elementen der Landschaft, unabhängig davon, ob sie natürlicherweise vorhanden sind oder vom Menschen geschaffen wurden	Alle Aspekte im Zusammenhang mit der Landschaft, bei denen die Landwirtschaft eine Schlüsselrolle spielt (in den Punkten 8.1. bis 8.3. abgedeckte Themen)	Aspekte im Zusammenhang mit der Qualität von Boden, Wasser und Luft	UZL 2a, UZL 2b, UZL 2c, UZL 3
8.1. Kulturelle Bedeutung	Bezieht sich auf natürliche und menschliche Elemente, die für eine Region oder einen Landschaftstyp charakteristisch sind und die mit einem Gefühl der Zugehörigkeit und Identität verbunden sind	Kulturelle Ökosystemleistungen	Aspekte im Zusammenhang mit dem Funktionieren von Ökosystemen und der biologischen Vielfalt, die unter den Punkten 5.1-5.3. behandelt werden, ausser wenn sie üblicherweise als Proxy für die Messung der kulturellen Bedeutung verwendet werden	UZL 2a
8.2. Ästhetik	Bezieht sich auf Landschaftselemente, die zur visuellen Schönheit einer Landschaft beitragen	Kulturelle Ökosystemleistungen	Aspekte im Zusammenhang mit der kulturellen Bedeutung und dem Funktionieren des Ökosystems, die unter 5.1.-5.3. behandelt werden, ausser wenn sie üblicherweise als Proxy für die Messung der Landschaftsästhetik verwendet werden	UZL 2a-b

Themen (D1a) > Fragen (D1b)	Kurzbeschreibung	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien	Verwandte Ziele
8.3. Strukturelle Elemente	Bezieht sich auf Strukturelemente, die eine Rolle in Ökosystemen spielen	Landschaftselemente, die zur Vielfalt der Arten und Lebensräume und zu den Ökosystemfunktionen beitragen, sowie Prozesse, die diese Elemente negativ oder positiv beeinflussen	Aspekte, die unter 8.1.-8.2. behandelt werden, ausser strukturelle Elemente, die üblicherweise als Proxy für die kulturelle Bedeutung und die Ästhetik der Landschaft verwendet werden	UZL 3

Anhang A3 Beschreibung und Kategorien der Ursache-Wirkungs-Kette (D2)

Tab. A8: DPSIR-Einschlusskriterien

Kategorie	Einschlusskriterien
Driver (Ursache)	Indikatoren, die Bewirtschaftungspraktiken beschreiben, d. h. spezifische, zielgerichtete Bewirtschaftungsmassnahmen (z. B. Direktsaat) oder eine (breite) Gruppe von Massnahmen (z. B. biologischer Anbau)
Pressure (Belastung)	Indikatoren, die eine (positive oder negative) Veränderung infolge landwirtschaftlicher Tätigkeiten und Bewirtschaftungspraktiken beschreiben, d. h. Flüsse (in, out), wie z. B. Schadstoffe, Nährstoffe, Ressourcen oder die Einführung oder Entfernung physischer oder biologischer Elemente (z. B. Artensterben, Hecken)
State (Zustand)	Indikatoren, die den Umweltzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort beschreiben, z. B. Nährstoffkonzentration, Temperatur, Populationsgrösse einer bestimmten Art
Impact (Auswirkung)	Indikatoren, die Phänomene und ihre vorübergehenden und/oder abschliessenden Folgen (negative oder positive sozioökonomische Auswirkungen) beschreiben, z. B. Klimawandel -> Veränderungen der landwirtschaftlichen Produktivität und der landwirtschaftlichen Erträge oder Häufigkeit von Hitzewellen --> Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit
Response (Massnahme)	Indikatoren, die eine Bewertung der Leistung oder Angemessenheit von Interventionen (Massnahmen, Politiken, Strategien) ermöglichen. Dazu können auch andere Arten von Indikatoren (in der Regel staatliche) gehören, solange sie mit einem aussagekräftigen/akzeptierten Referenzwert verglichen werden können. Beispiele: Einführungsgeschwindigkeit einer bestimmten Technologie, Wasserverunreinigung mit oder ohne Überschreitung der in der Verordnung festgelegten Werte

Anhang A4 Indikatorabdeckung bezüglich verschiedener Dimensionen

Anhang A4.1 Aufschlüsselung der Indikatoren nach Ursache-Wirkungs-Ketten (DPSIR)

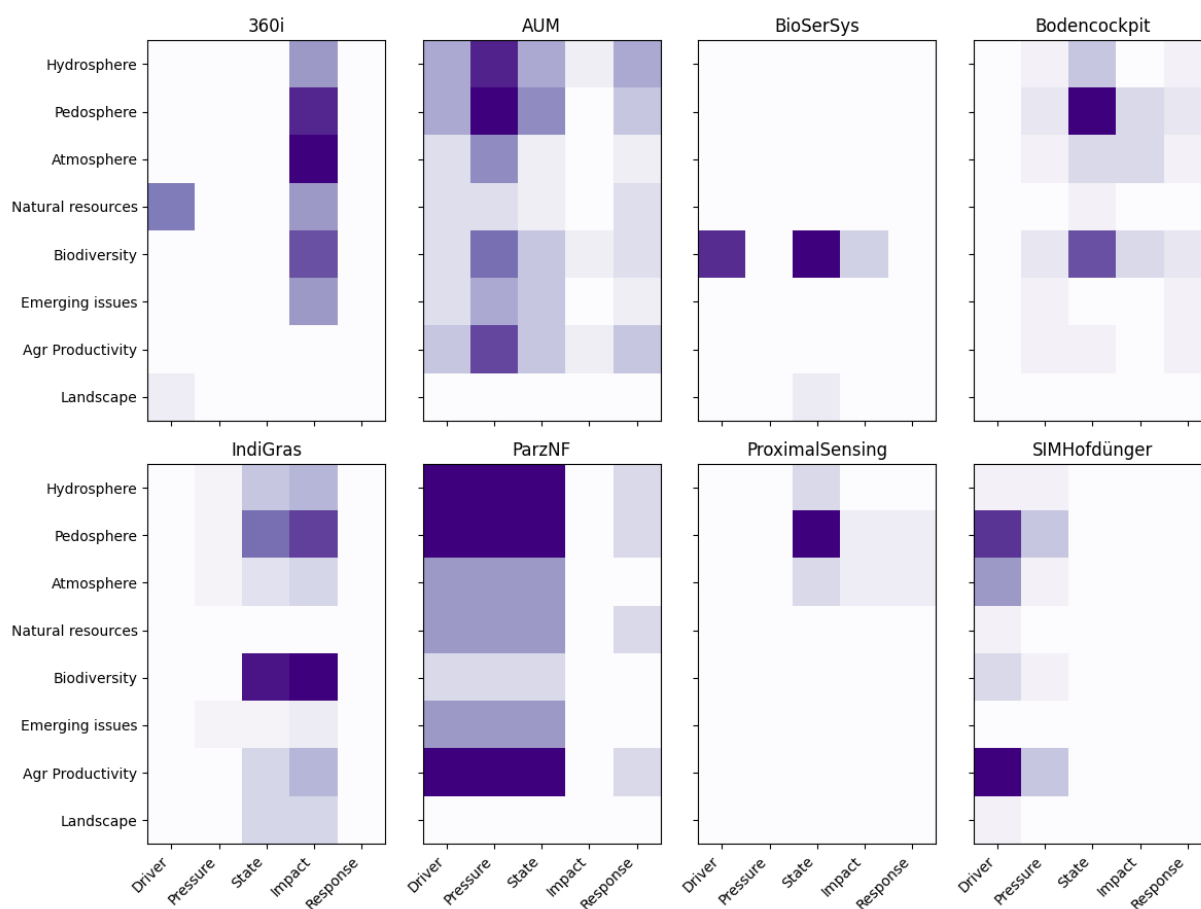


Abb. A1: Indikatorabdeckung auf Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1a) und Ursache-Wirkungs-Kette (DPSIR, D3).

Anhang A4.2 Aufschlüsselung der Indikatoren nach Zielpublikum

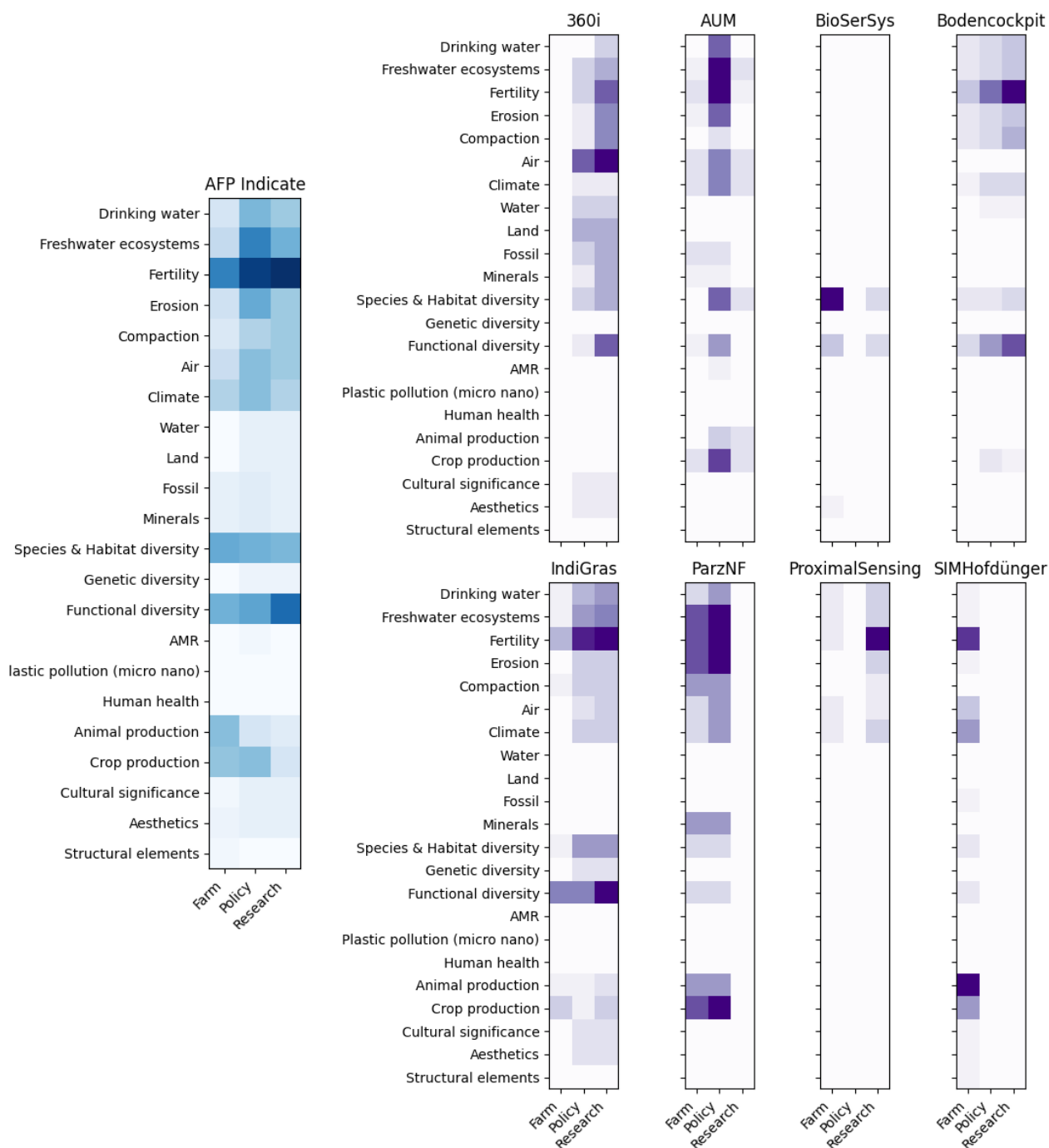


Abb. A2: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltfragen (D1b) und Zielpublikum (D3).

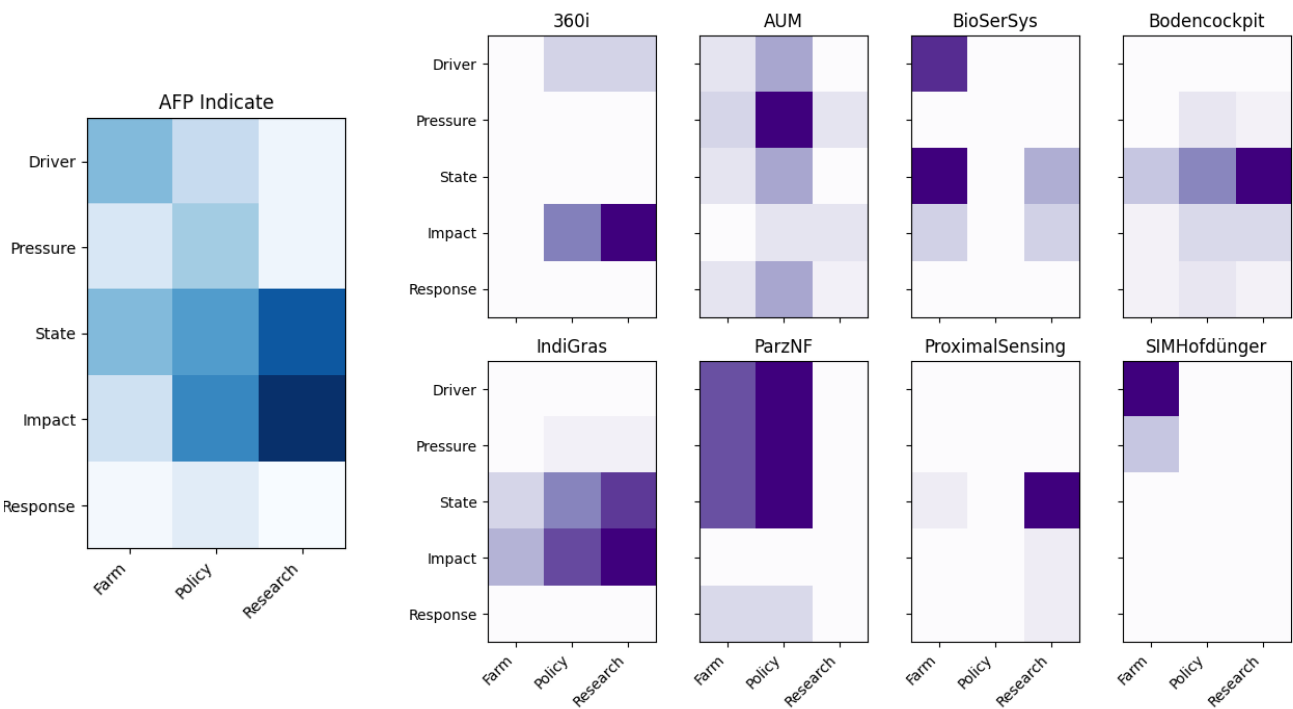


Abb. A3: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Ursache-Wirkungs-Kette (DPSIR, D2) und Zielpublikum (D3).

Anhang A4.3 Aufschlüsselung der Indikatoren nach räumlicher Skala

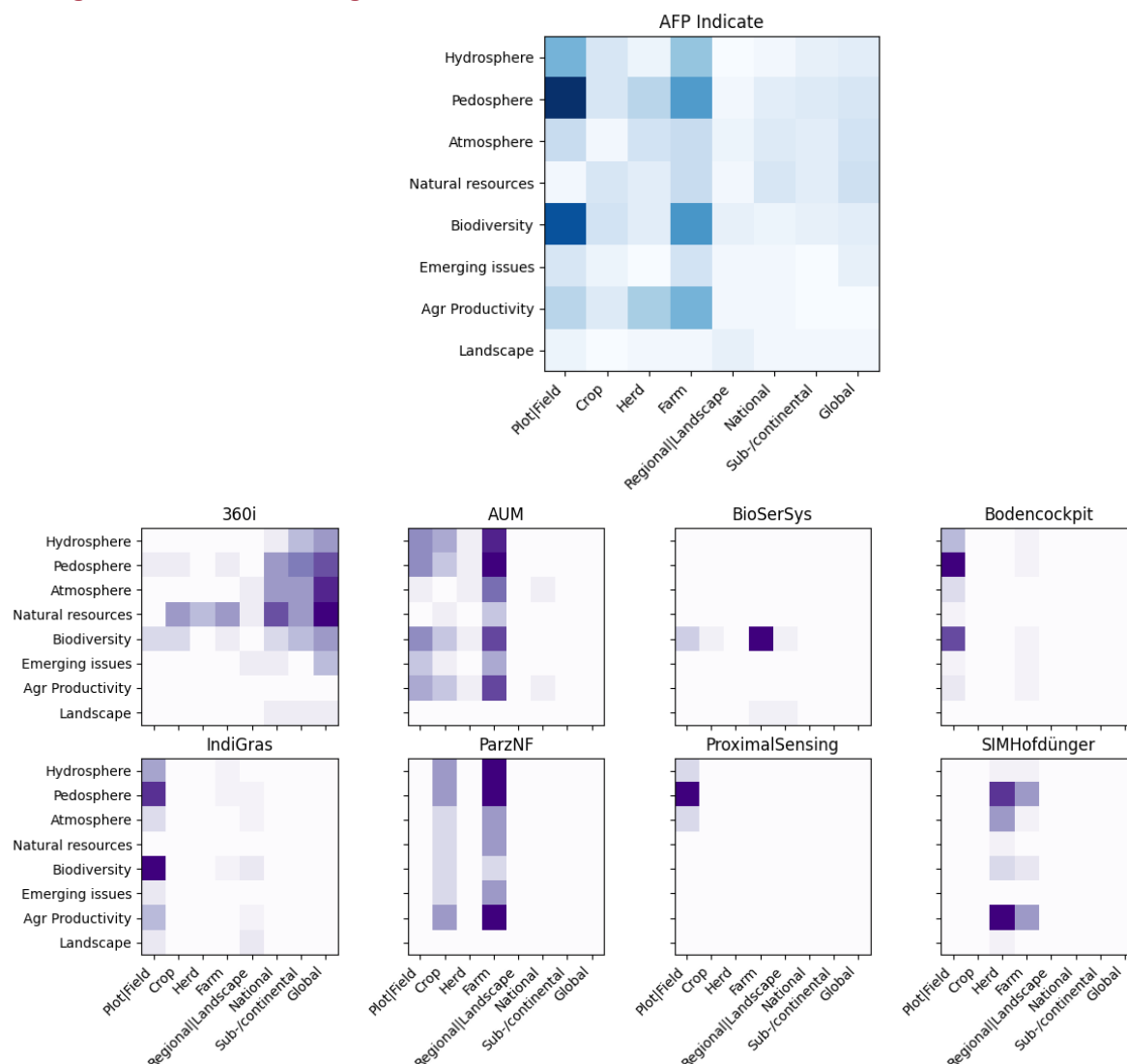


Abb. A4: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumwelthemen (D1a) und Räumliche Skala der Bewertung (D4a).

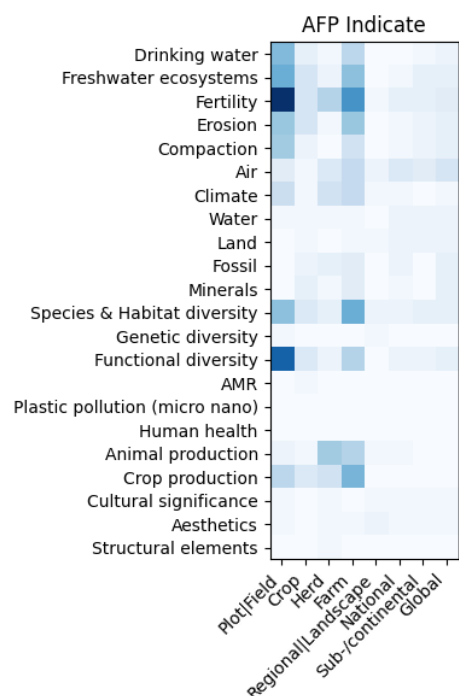


Abb. A5: Indikatorabdeckung auf Programmebene bezüglich der Dimensionen Agrarumwelthemen (D1b) und Räumliche Skala der Bewertung (D4a). AMR = Antimikrobielle Resistenz

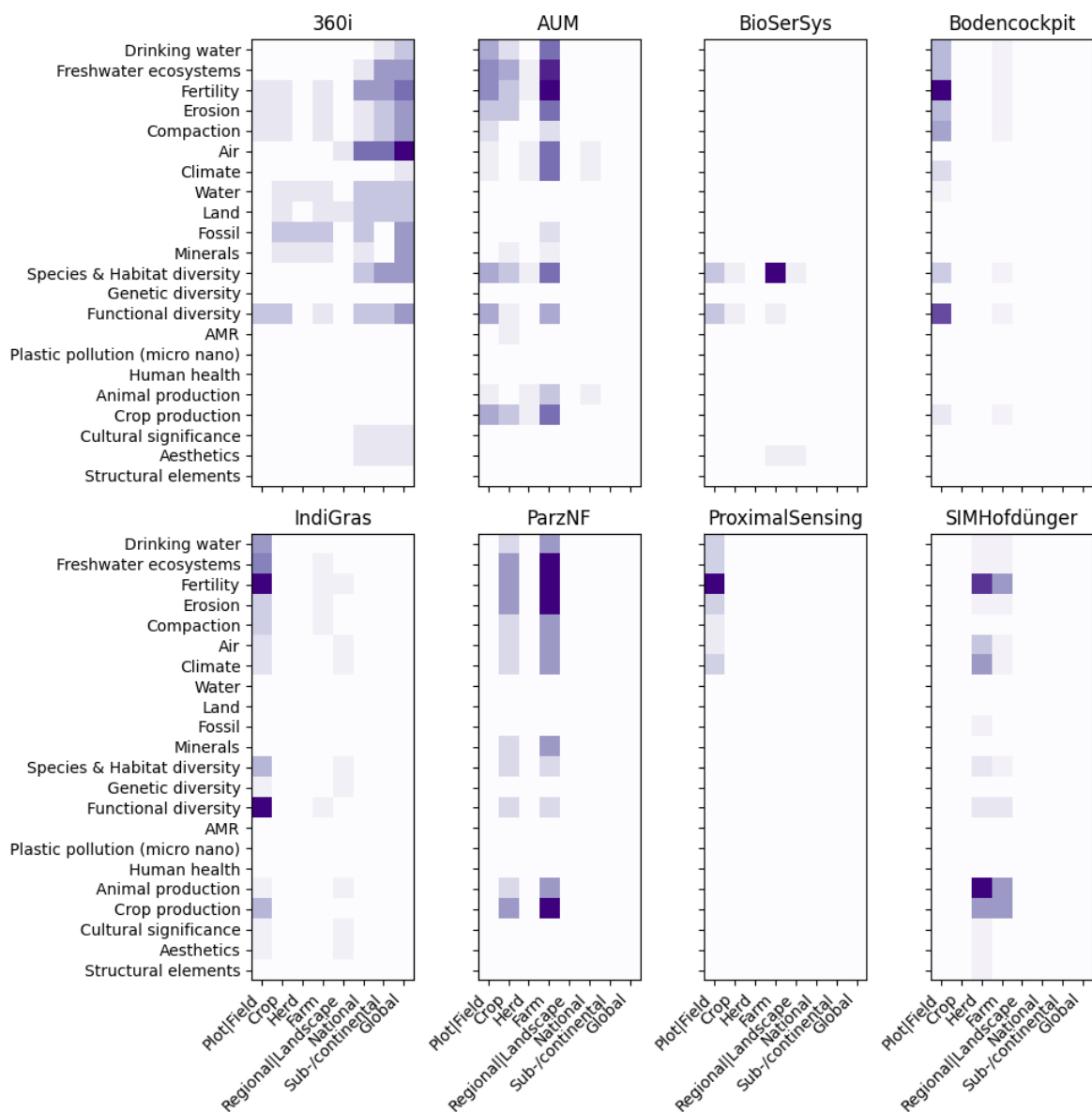


Abb. A6: Indikatorabdeckung auf Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltfragen (D1b) und Räumliche Skala der Bewertung (D4a).

Anhang A4.4 Aufschlüsselung der Indikatoren nach zeitlicher Skala

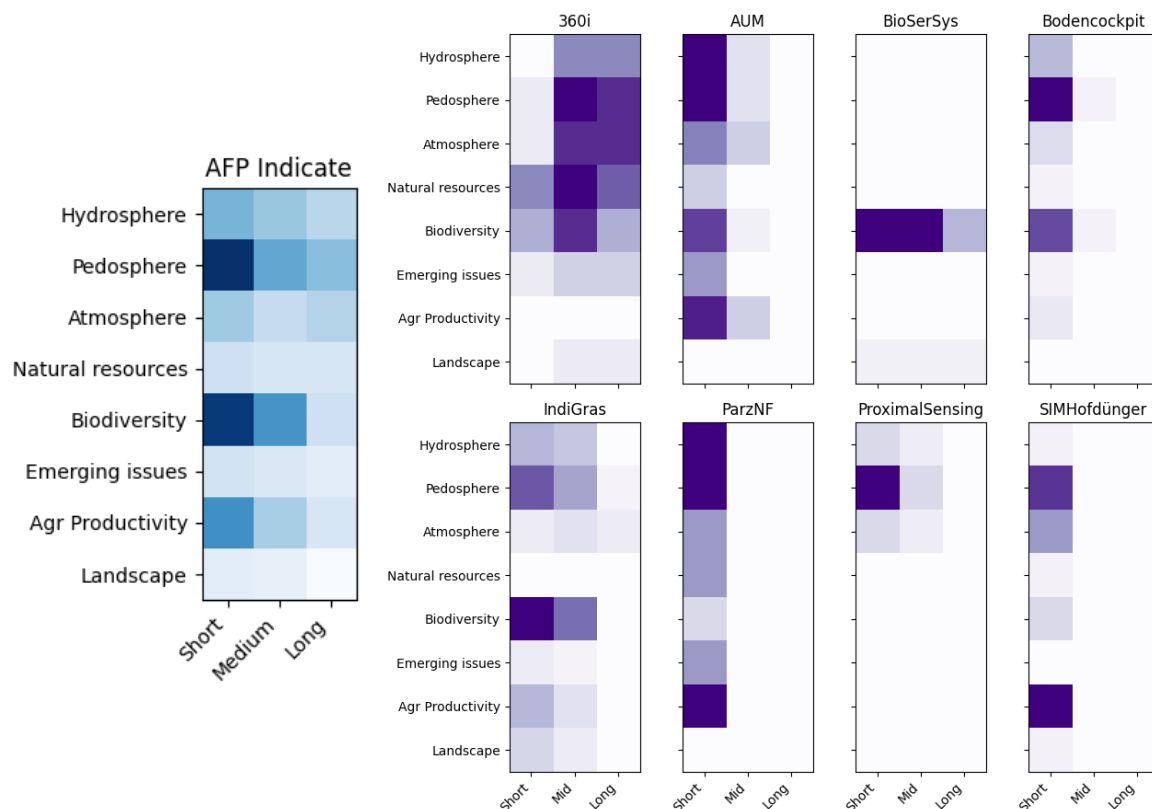


Abb. A7: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1a) und Zeitliche Skala der Bewertung (D5a).

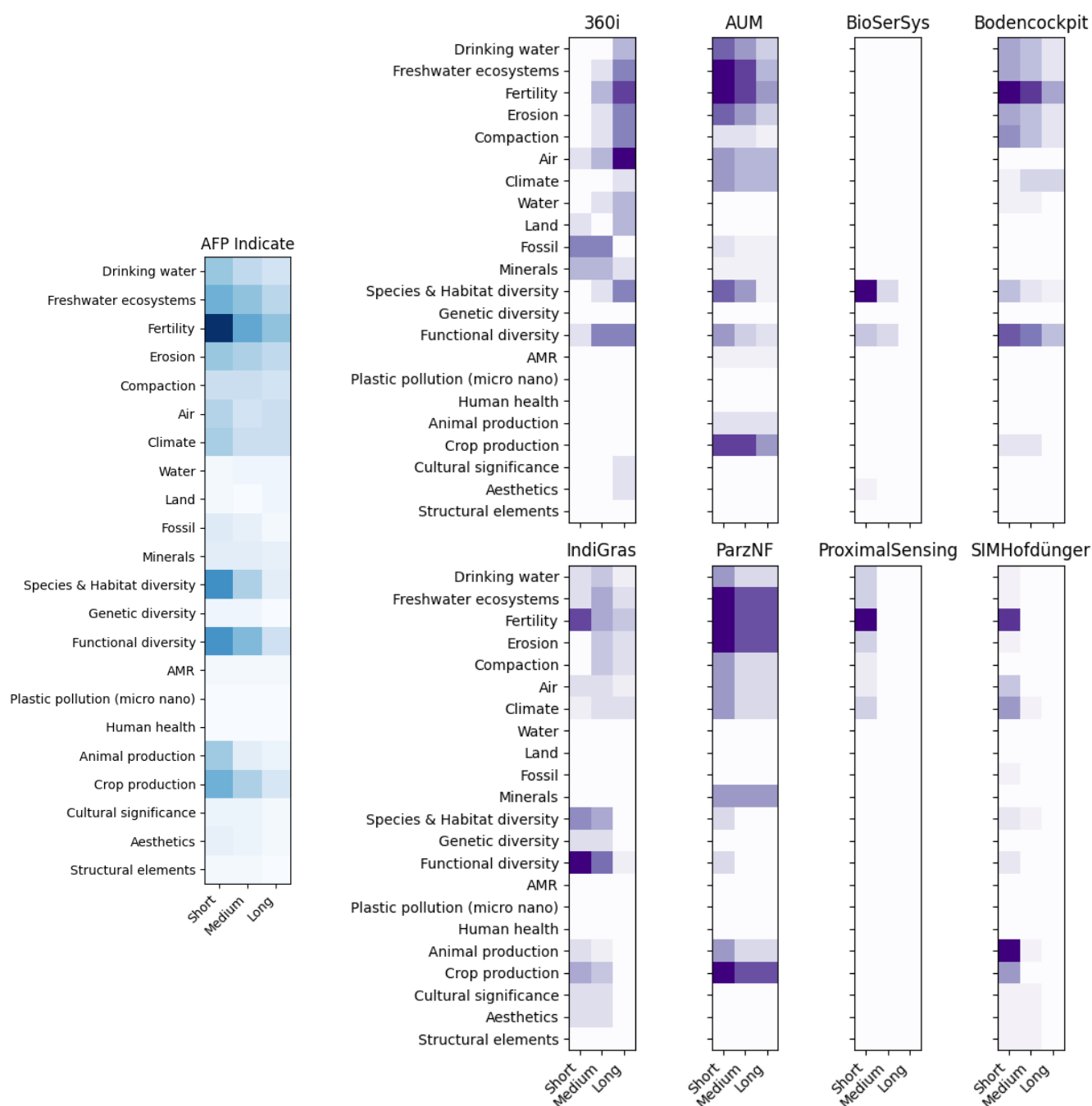


Abb. A8: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltfragen (D1b) und Zeitliche Skala der Bewertung (D5a).

Anhang A4.5 Aufschlüsselung der Indikatoren nach dem Rahmen für die Umweltbewertung

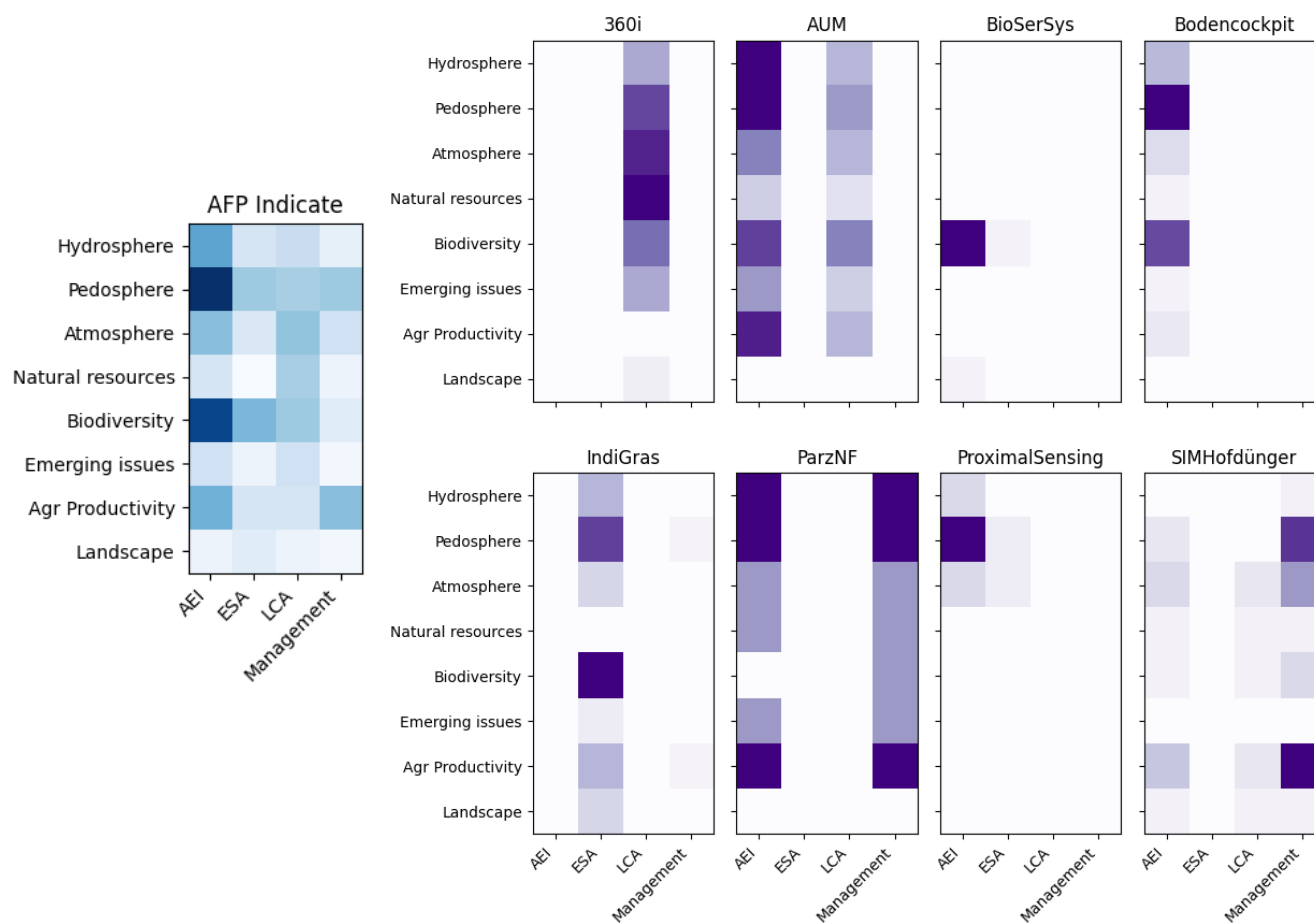


Abb. A9: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltthemen (D1a) und Rahmen für die Umweltbewertung (D6). AEI = Agrarumweltindikatoren, ESA = Bewertung von Ökosystemleistungen, LCA = Ökobilanz, Management = Betriebsführung

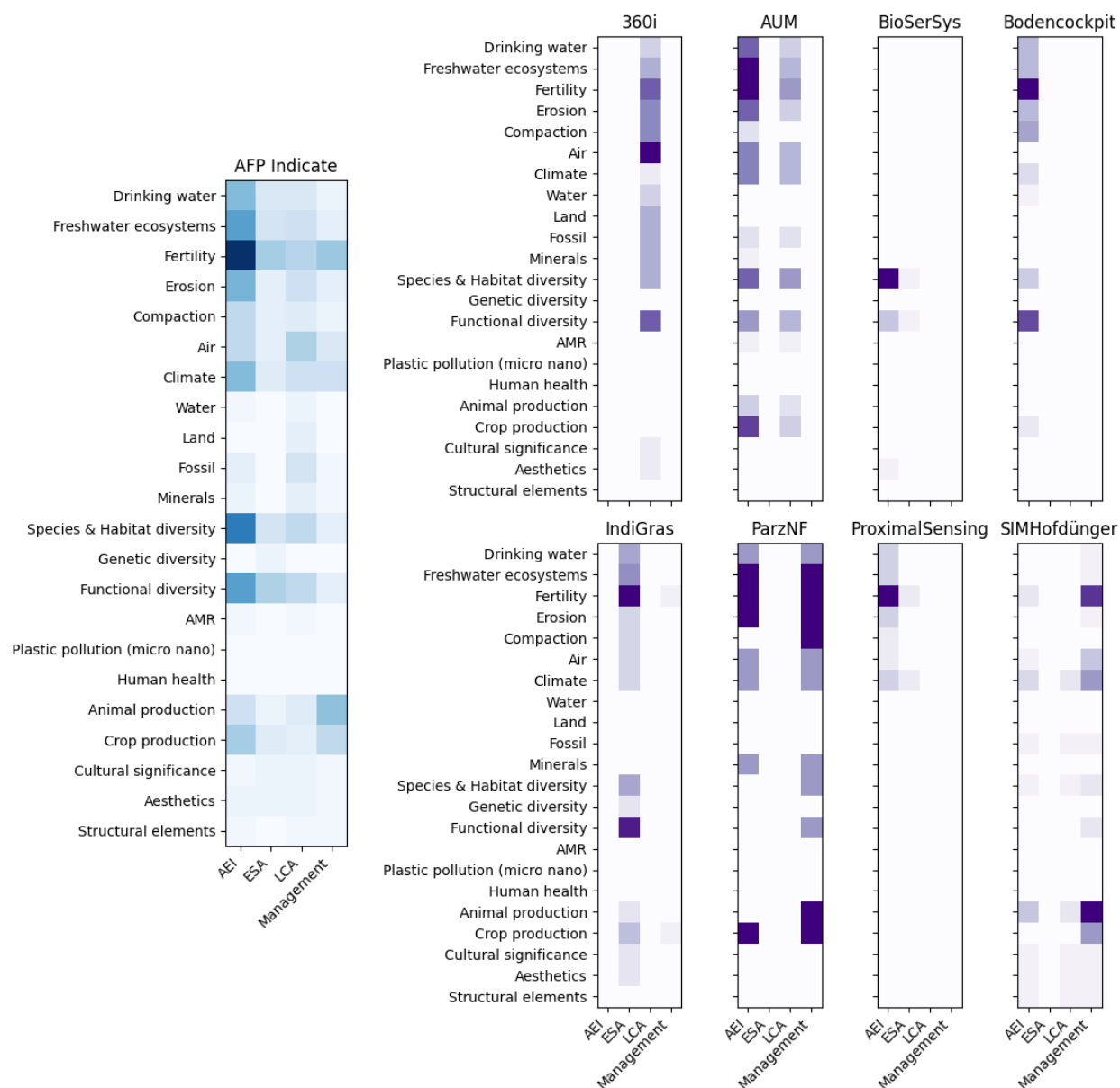


Abb. A10: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Agrarumweltfragen (D1b) und Rahmen für die Umweltbewertung (D6). AEI = Agrarumweltindikatoren, ESA = Bewertung von Ökosystemleistungen, LCA = Ökobilanz, Management = Betriebsführung

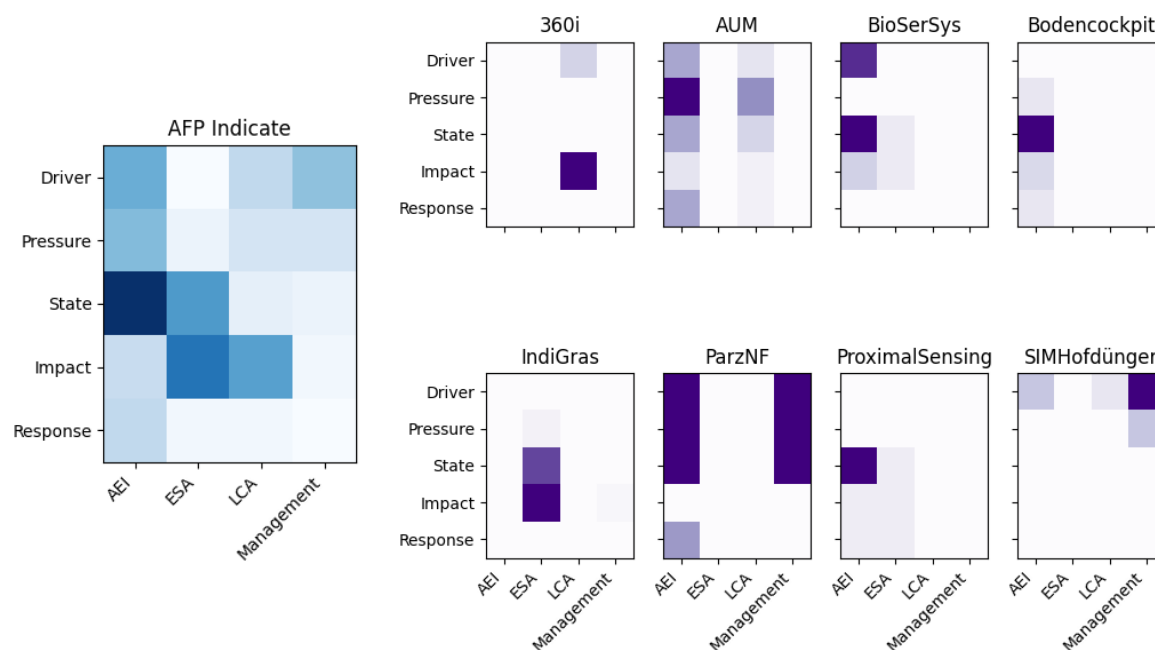


Abb. A11: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Ursache-Wirkungs-Ketten (DPSIR, D2) und Rahmen für die Umweltbewertung (D6). AEI = Agrarumweltindikatoren, ESA = Bewertung von Ökosystemleistungen, LCA = Ökobilanz, Management = Betriebsführung

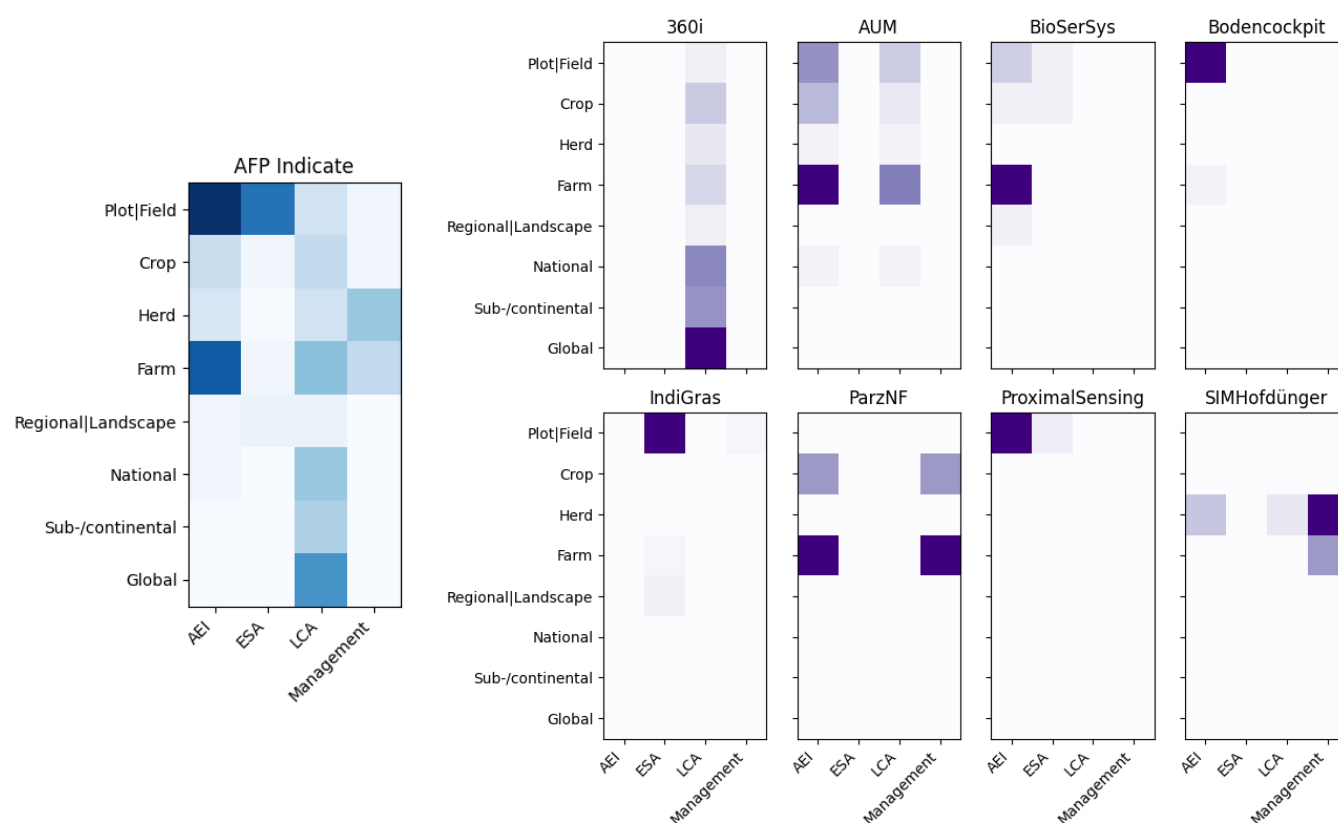


Abb. A12: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Räumliche Skala der Bewertung (D4a) und Rahmen für die Umweltbewertung (D6). AEI = Agrarumweltindikatoren, ESA = Bewertung von Ökosystemleistungen, LCA = Ökobilanz, Management = Betriebsführung

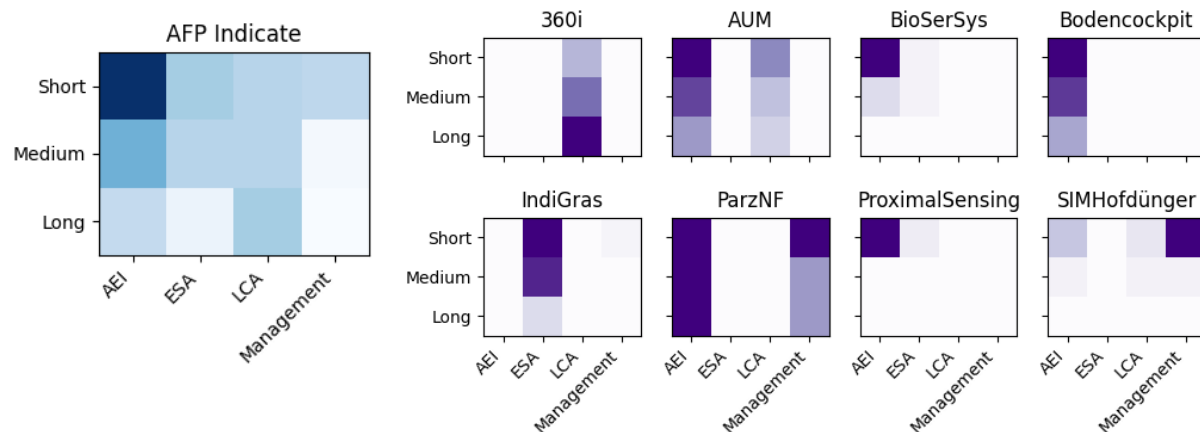


Abb. A13: Indikatorabdeckung auf Programm- und Projektebene bezüglich der Dimensionen Zeitliche Skala der Bewertung (D4a) und Rahmen für die Umweltbewertung (D6). AEI = Agrarumweltindikatoren, ESA = Bewertung von Ökosystemleistungen, LCA = Ökobilanz, Management = Betriebsführung