

Bewirtschaftungseinflüsse auf die Langzeit-Entwicklung physikalischer Bodeneigenschaften

Peter Weisskopf², Lorenz Ramseier³, Madlene Nussbaum⁵, Urs Zihlmann², John Koestel¹, Thomas Keller¹, Marlies Sommer², Claudia Maurer⁴, Wolfgang Sturny⁴, Andreas Chervet³
¹Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz; ²ex-Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz; ³Fachstelle Boden, 3052 Zollikofen, Schweiz; ⁴ex-Fachstelle Boden, 3052 Zollikofen, Schweiz; ⁵Utrecht University, 3584 CB Utrecht, Niederlande

Auskünfte: Thomas Keller, E-Mail: thomas.keller@agroscope.admin.ch;

Peter Weisskopf, E-Mail: peter.weisskopf@hispeed.ch; Andreas Chervet, E-Mail: andreas.chervet@be.ch

<https://doi.org/10.34776/afs17-241> Publikationsdatum: 29. Oktober 2026



Beprobung bodenphysikalischer Parameter auf dem KABO-Standort in Madiswil. (Foto: Stefanie Schwamberger, Inforama Rütli, Zollikofen)

Zusammenfassung

Landwirtschaftlich genutzte Böden ermöglichen mit ihrer Funktionalität nicht nur die Produktion von pflanzlichen Rohstoffen, insbesondere Lebens- und Futtermitteln, sondern auch das Bereitstellen von Ökosystem-Dienstleistungen für die Gesellschaft. Um die langfristigen Entwicklungen von Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen systematisch erkennen und sicher beurteilen zu können, braucht es langjährige Monitoringprogramme. In der Bodenbeobachtung des Kantons Bern (KABO BE) werden auf 19 landwirtschaftlichen Praxisbetrieben seit 30 Jahren verschiedene chemische, physikalische und biologische Bodeneigenschaften verfolgt. Zusätzlich zum reinen zeitlichen Monitoring von Bodeneigenschaften ermöglicht ein spezielles Monitoringdesign auch das Erkennen von langfristigen Bewirtschaftungseffekten, die durch die Nutzungs- und Anbausysteme der Praxisbetriebe verursacht werden könnten. In diesem Artikel werden die Effekte der Bewirtschaftungsmassnahmen auf physikalische Bodeneigen-

schaften wie Porosität, Transportvermögen und Stabilität vor dem Hintergrund standortbezogener Bodeneigenschaften aufgezeigt und ihre zeitliche Entwicklung dargestellt. Dabei werden die Bodeneigenschaften nicht nur durch ihre Messgrössen, sondern mit Hilfe eines Bewertungssystems («relative scoring functions») auch hinsichtlich ihrer Beiträge zu wichtigen Bodenfunktionen beschrieben («Funktionsbeiträge»). In einer Gesamtauswertung wird neben der statistischen Signifikanz auch die funktionale Relevanz der Monitoringdaten analysiert. Die deutlichsten Bewirtschaftungseffekte auf physikalische Bodeneigenschaften traten zwischen den Dauergrünland-Nutzungen «intensive Weide» und «extensive Wiese» auf – und nicht zwischen den Nutzungssystemen «Dauergrünland» und «Ackerbau» oder den Anbausystemen «ökologischer Leistungsnachweis» und «biologischer Landbau». Der zeitliche Verlauf der Bodeneigenschaften über die gesamte Monitoringdauer hinweg machte unterschiedliche Entwicklungspfade deutlich: Neben zufälligem Rauschen durch diffuse Einflüsse von Witterung, Bewirtschaftung und Untersuchungsmethodik waren auch ausgeprägt stetige Entwicklungen von Bodeneigenschaften zu erkennen, deren Ursachen sich meist (aber nicht immer) Einflüssen von Bewirtschaftungsmassnahmen, Witterungsverläufen bzw. Klimaentwicklung oder Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren zuordnen liessen. Die Effekte der Bodentiefe waren bei den physikalischen Bodeneigenschaften sehr ausgeprägt: In der KABO BE wiesen die Unterböden Anzeichen eines generell günstigeren Strukturzustandes auf als die Oberböden, und ihre Strukturqualität verbesserte sich während der Monitoringdauer insbesondere bei den Transport- und Stabilitätseigenschaften kontinuierlich.

Key words: Soil physical properties, soil functions, agricultural soil management, long-term monitoring, topsoil vs. subsoil.

Einleitung

Veränderungen von Bodeneigenschaften vollziehen sich in unterschiedlichen Zeiträumen. Verschlechterungen des Bodenstrukturzustandes können innerhalb von Sekunden stattfinden, wie Schädigungen des Porensystems durch Verdichtungen, mit ungünstigen Folgen für das Transport- und Speichervermögen eines Bodens, aber auch schleichend erfolgen, wie der Verlust an Strukturstabilität durch intensive Bodenbewirtschaftung und folglich ungenügender Durchwurzelung von Böden, verbunden mit mangelhaftem Eintrag organischer Substanz und entsprechend verringerter biologischer Aktivität. Die Wiedergutmachung von physikalischen Bodenschäden durch Verbesserungen der Bodenstruktur geht nur allmählich vonstatten und erfordert den konsequenten Einsatz guter fachlicher Praxis und einen erhöhten Bewirtschaftungsaufwand über Zeiträume von Jahren bis Jahrzehnten.

Bei der kantonalen Bodenbeobachtung des Kantons Bern (KABO BE) war von Beginn weg das Ziel, die Entwicklung der Eigenschaften typischer Berner Böden unter dem Einfluss praxisüblicher Bewirtschaftungskonstellationen möglichst realitätsnah verfolgen und die wichtigsten Bewirtschaftungseinflüsse auf die Bodeneigenschaften erkennen zu können. Dazu gehörte, sowohl bodenschützerische als auch landwirtschaftlichbewirtschaftungstechnische Aspekte zu berücksichtigen. Deshalb wurden für das Monitoring in der KABO BE auch betriebsüblich bewirtschaftete Beobachtungsflächen mit typischen Bodeneigenschaften auf Berner Praxisbetrieben ausgewählt und systematisch untersucht.

Zur Realitätsnähe des Berner Bodenmonitorings gehört ausserdem, dass die Bodenentwicklung ganzheitlich betrachtet wird. Das bedeutet, dass verschiedene abiotische und biotische Bodeneigenschaften aus dem gesamten Spektrum chemischer, physikalischer und biologischer Eigenschaften zusammen mit standortbezogenen Bodeneigenschaften untersucht werden. Dabei werden sowohl die einzelnen Eigenschaften als auch ihre gegenseitigen Abhängigkeiten beziehungsweise ihr Zusammenwirken mit anderen Bodeneigenschaften berücksichtigt.

Die Auswertung der KABO-Daten nach 30 Jahren Beobachtungsdauer ermöglicht das Erkennen von Effekten langjährig eingesetzter Bewirtschaftungsstrategien auf Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen, z.B. in Form der Anbausysteme «ökologischer Leistungsnachweis ÖLN» und «biologischer Landbau BIO», oder der Nutzungssysteme «Dauergrünland» und «Ackerfläche», nicht aber von Einflüssen einzelner Bewirtschaftungs-

techniken. Die Auswertung der zeitlichen Entwicklung ermöglicht es zu erkennen, welche Bewirtschaftungseinflüsse über die Jahre hinweg deutlich erkennbare Entwicklungstrends verursacht haben («Verbesserungen oder Verschlechterungen von Bodeneigenschaften»), und welche zeitlichen Veränderungen von Bodeneigenschaften nur als vorübergehendes Ergebnis unterschiedlicher Einflussfaktoren zu betrachten sind («ungerichtetes zufälliges Hintergrundrauschen»).

In diesem Artikel werden die Einflüsse auf physikalische Bodeneigenschaften aufgezeigt; Ergebnisse zu chemischen und biologischen Bodeneigenschaften werden in separaten Artikeln veröffentlicht und sind auch im Gesamtbericht zur KABO BE zu finden (Chervet *et al.*, 2026).

Material und Methoden

Aufgrund der Erwartungen an die KABO BE ergaben sich einige methodische Besonderheiten:

1. Monitoringdesign

(vgl. Glossar 1 «Monitoringdesign»)

- (i) Die Beobachtungsflächen der KABO BE befinden sich auf 19 Berner Landwirtschaftsbetrieben. Sie umfassen pro Betrieb jeweils eine Dauergrünland- und eine Ackerflächen-Parzelle mit vergleichbaren, für Berner Anbaubedingungen typischen Standortvoraussetzungen und werden aufgrund der (jährlich situativ angepassten) persönlichen Entscheidungen der Betriebsleitenden praxisüblich bewirtschaftet.
- (ii) Die strukturierenden Monitoringfaktoren ergeben sich (a) aus der unterschiedlichen Nutzungsweise der Beobachtungspartellen («Nutzungssystem»: Dauergrünland, Ackerfläche), (b) aus der unterschiedlichen Intensität der Grünlandnutzung («Dauergrünland-Nutzung»:

Glossar 1 | «Monitoringdesign»

Monitoring-faktor	Kategorie	Ausprägung
Nutzungssystem	<ul style="list-style-type: none"> • Dauergrünland • Ackerfläche 	<ul style="list-style-type: none"> • intensive Weide • extensive Wiese
Anbausystem		<ul style="list-style-type: none"> • ökologischer Leistungsnachweis ÖLN • biologischer Landbau BIO
zeitliche Entwicklung		<ul style="list-style-type: none"> • Turnus 1 bis Turnus 5 (Turnusdauer 5–7 Jahre)
Bodentiefe		<ul style="list-style-type: none"> • oberste Bodenschicht 0–5 cm • Oberboden 0–20 bzw. 10–15 cm • Unterboden 20–40 bzw. 35–40 cm

Angaben zu Bodentiefen in Ober- und Unterböden: erste Angabe = standortbezogene Bodeneigenschaften, zweite Angabe = physikalische Bodeneigenschaften

intensive Weidenutzung, extensive Wiesennutzung), (c) aus der unterschiedlichen Art, das Landwirtschaftsland zu bewirtschaften («Anbausystem»: Ökologischer Leistungsnachweis ÖLN, biologischer Landbau BIO); (d) aus der zeitlichen Abfolge der Beobachtungen («zeitliche Entwicklung, Turnus»: jeweils im zweiten Hauptnutzungsjahr der Kunstwiesen vom Beginn der Untersuchungen im Turnus 1 in 5- bis 7-jährigen Intervallen bis zum jüngsten Untersuchungszeitpunkt im Turnus 5); sowie (e) aus dem Einwirkungsort der Einflüsse («Bodentiefe»: oberste Bodenschicht, Oberboden, Unterboden) (Details im Gesamtbericht: 2.1 Monitoringdesign).

2. Gemessene Bodeneigenschaften und Messmethoden (vgl. Glossar 2 «Gemessene Bodeneigenschaften»)

(i) Die Böden in der KABO BE werden mit Hilfe eines breiten Spektrums an chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften beschrieben. Zu diesem Zweck werden überwiegend Standardmethoden eingesetzt – auch, um die Vergleichbarkeit innerhalb der langjährigen Zeitreihen und zu den in der landwirtschaftlichen Praxis verwendeten Methoden sicherzustellen (Details im Gesamtbericht: 2.2 Messmethoden). (ii) Die Bodenstruktur als zentrales Element bodenphysikalischer Betrachtung wurde mit Hilfe von Eigenschaften aus drei Funktionsgruppen untersucht: Porosität (verschiedene Porengrössenklassen), Transportvermögen (für Luft bzw. Wasser) und Stabilität (gegenüber mechanischen Belastungen und fliessendem Wasser).

3. Funktionale Betrachtung der Bodeneigenschaften (vgl. Glossar 3 «relativer Funktionsbeitrag und Funktionsklasse»)

(i) Mit Hilfe von «relative scoring functions» (vgl. Vogel *et al.*, 2019) wurde ein Zusammenhang zwischen dem Messwert von Bodeneigenschaften und ihrem Beitrag zu wichtigen Boden-Teilfunktionen gemäss der Bodenstrategie des BAFU (Schweizerischer Bundesrat, 2020; Bundesamt für Umwelt und Landschaft, 2021) hergestellt. Die Spanne der relativen Funktionsbeiträge von 0 % bis 100 % wurde in 5 sogenannte «Funktionsklassen» unterteilt. Nicht allen Bodeneigenschaften konnten Funktionsbeitragswerte sinnvoll zugeordnet werden, z.B. weil sich ihre funktionalen Beiträge nicht eindeutig als «günstig» oder «ungünstig» bezeichnen lassen. (ii) Als Basis für die Bewertung der Funktionsbeiträge wurden – wenn vorhanden – bestehende offizielle Regelwerke wie GRUD (Agroscope, 2017), VBBo (Schweizerischer Bundesrat, 2025) und Empfehlungen von Fachgremien wie VBPhy (Zürcher Hochschule für

Glossar 2 | Gemessene Bodeneigenschaften

Standortbezogene Bodeneigenschaften	
Ton	Tongehalt [Gew.%]
Schluff	Schluffgehalt [Gew.%]
Sand	Sandgehalt [Gew.%]
Humus	Humusgehalt [Gew.%]
pH	pH-Wert CaCl ₂ [–]
Struktureigenschaften Porosität	
LD	Lagerungsdichte [g/cm ³]
GPV	Gesamtporenvolumen [Vol.%]
GGP0-14	Gröbstoporenvolumen pF _{0,0} –1,4 bzw. Äquivalentdurchmesser > 120 µm [Vol.%]
GP0-18	Grobporenvolumen pF _{0,0} –1,8 bzw. Äquivalentdurchmesser > 50 µm [Vol.%]
GMP18-30	grobe Mittelporen pF _{1,8} –3,0 bzw. Äquivalentdurchmesser 50–3 µm [Vol.%]
FMP30-42	feine Mittelporen pF _{3,0} –4,2 bzw. Äquivalentdurchmesser 3–0,2 µm [Vol.%]
FP42+	Feinporen > pF _{4,2} bzw. Äquivalentdurchmesser < 0,2 µm [Vol.%]
Struktureigenschaften Transportvermögen	
LPERM18	Luftpermeabilität bei pF _{1,8} [µm ²]
pKsat	gesättigtes Wasserinfiltrationsvermögen [-log m/s]
Struktureigenschaften Stabilität	
PVV250	Porenvolumenverlust durch 250 kPa Auflast [Vol.%]
RPV250	Rest-Grobporenvolumen nach 250 kPa Auflast [Vol.%]
p _s	Perkolationsstabilität im Durchflussversuch [g/10min] («Aggregatstabilität»)

angewandte Wissenschaften, 2021; Cercle Sol, 2026) oder BGS (Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, 2004) verwendet und sinngemäss in die relative Funktionsbeitragsskala von 0 % (kein Funktionsbeitrag) bis 100 % (voller Funktionsbeitrag) übertragen. Wenn keine offiziellen fachlichen Grundlagen vorlagen, nutzen wir Angaben aus der wissenschaftlichen Literatur; wenn wir auch dort nicht fündig wurden, verwenden wir das bestmögliche vorhandene Expertenwissen. (iii) Die relative scoring functions führten zu 4 typischen Funktionszusammenhängen: «Maximum» (Bodeneigenschaftswert und Funktionsbeitragswert verändern sich auf gleiche Weise in Richtung maximale Ausprägung); «Minimum» (Bodeneigenschaftswert und Funktionsbeitragswert verändern sich gegensätzlich: wenn die eine Grösse ihr Maximum erreicht, ist die andere bei

Glossar 3 | relativer Funktionsbeitrag und Funktionsklasse

relativer Funktionsbeitrag	Funktionsklasse
71 %–100 %	sehr gut
51 %–70 %	gut
26 %–50 %	genügend
11 %–25 %	ungenügend
0 %–10 %	kritisch

ihrem Minimum angelangt); «Optimum» (Bodeneigenschaftswert und Funktionsbeitragswert verändern sich auf gleiche Weise, der maximale Funktionsbeitragswert wird aber bei einem Messwert kleiner als der maximale Messwert erreicht); «Optimum plus» (prinzipiell gleich wie bei «Optimum», die Lage des Optimums hängt aber noch vom Einfluss einer zweiten Bodeneigenschaft ab). Die Funktionskurven wurden soweit möglich auf die Standortbedingungen in der KABO BE bezogen und sind nicht grundsätzlich auf beliebige Standortkonstellationen anwendbar.

Eine Darstellung des Konzeptes von relative scoring functions und von dessen Umsetzung in der KABO BE findet sich im Gesamtbericht: 2.4 Bodenfunktionen und im Anhang zum Gesamtbericht: 2.4 Bodenfunktionen.

4. Auswertungsverfahren

(i) Die kausale Verknüpfung zwischen den Einflüssen der verschiedenen Monitoringfaktoren und den Effekten auf die untersuchten Bodeneigenschaften wird durch ein System von Monitoringhypothesen hergestellt und dient als Grundlage für die Auswertungsarbeiten (Gesamtbericht: 2.5 Monitoringauswertung).

(ii) Auf Basis der Monitoringhypothesen wurden lineare Modelle für die statistische Varianzanalyse entworfen, um die Effektstruktur der Monitoringfaktoren abbilden und auswerten zu können. Diese Modelle berücksichtigten nicht nur die Hauptwirkungen der einzelnen Monitoringfaktoren, sondern auch deren Wechselwirkungen mit dem zeitlichen Verlauf und der Bodentiefe. Je nach Verteilungsmuster der Messwerte wurden geeignete Methoden für den Test auf Signifikanz der Effektunterschiede verwendet (Nussbaum, 2014).

(iii) Numerische Zusammenhänge zwischen jeweils zwei Bodeneigenschaften wurden zunächst mit Hilfe von Korrelationsanalysen für verschiedene Bodenschichten beurteilt, die Standort- und Zufallseffekte herausrechneten. In einem zweiten Schritt wurde mit Hilfe von Hauptkomponentenanalysen das Zusammenwirken mehrerer Bodeneigenschaften innerhalb von Funktionsgruppen (hier: Standort, Porosität, Transportvermögen, Stabilität) und Beprobungsstandorten (hier: Betriebsparzellen) für mehrere Monitoringfaktoren (u.a. Anbausysteme) untersucht.

(iv) In einer Gesamtauswertung wurde die rein statistische Beurteilung von Faktoreffekten («Signifikanz») ergänzt durch eine mehrstufige funktionale Betrachtungsweise («Relevanz»). Als Ergebnis liessen sich auf diese Weise alle Effekte von Monitoringfaktoren einer «Effektklasse» zuordnen (vgl. Glossar 4 «Effektklassen»). Zentrales Element der funktionalen Beurteilung ist die

Glossar 4 | Effektklassen

Effektklasse	Beschreibung
0	kein Effekt
1	möglicher Effekt
2	leichter Effekt
3	deutlicher Effekt
4	sehr deutlicher Effekt

«absolute funktionale Differenz», eine sachlogisch begründete Grösse, die definiert, ab welcher Differenz zwischen den Messwerten einer Bodeneigenschaft mit erkennbaren Funktionsunterschieden zu rechnen ist. Momentan sind dazu kaum konkrete Werte in der Literatur zu finden, entsprechend stark macht sich hier unsere Experteneinschätzung bemerkbar. Einzelheiten zum Vorgehen finden sich im Gesamtbericht: 2.5 Monitoringauswertung.

Resultate

Die vollständigen Detailauswertungen sind im Gesamtbericht zur KABO BE sowie im dazugehörigen Anhang zu finden (Gesamtbericht: 3.1 Detaillierte Effekte der Monitoringfaktoren auf die standortbezogenen Bodeneigenschaften; 3.3 Detaillierte Effekte der Monitoringfaktoren auf die physikalischen Bodeneigenschaften; 4.1. Beziehungen und Abhängigkeiten von standortbezogenen Bodeneigenschaften; 4.3 Beziehungen und Abhängigkeiten von physikalischen Bodeneigenschaften). Die Körnungseigenschaften der 19 untersuchten Standorte waren (mit einzelnen Ausnahmen) einheitlich und mit Tongehalten um 15 Gew.%, Schluffgehalten von knapp 30 Gew.% und entsprechend hohen Sandgehalten typisch für die mineralische Zusammensetzung vieler intensiv genutzter Landwirtschaftsböden im Kanton BE. Während sich die Tongehalte im Verlauf der Monitoringdauer nicht erkennbar änderten, unterschieden sich die analysierten Schluffgehalte zwischen den Monitoringzeitpunkten statistisch signifikant, was sich entsprechend auch bei den (berechneten) Sandgehalten bemerkbar machte.

Effekte der Anbausysteme «ÖLN» und «BIO»

Die Wahl des Anbausystemes hatte einen Effekt auf den Humusgehalt, der in den ÖLN-Böden funktional relevant grösser war als in den BIO-Böden.

Die ÖLN-Böden waren leicht, aber statistisch signifikant poröser, d.h. das Gesamtporenvolumen war grösser und die Lagerungsdichte kleiner als in BIO-Böden. Die verschiedenen Porengrössenklassen unterschieden sich zwischen den Anbausystemen dagegen nicht und lagen generell in der Funktionsklasse «sehr gut».

Beim Transportvermögen der Böden zeigten sich unterschiedliche Effekte. Während bei der Luftpermeabilität keine Unterschiede zwischen den Anbausystemen bestanden, war bei BIO-Böden ein statistisch signifikant grösseres Wasserinfiltrationsvermögen festzustellen. Dieses war überwiegend auf den bei BIO-Dauergrünlandnutzung grösseren Anteil an extensiven Wiesen zurückzuführen, die ein besonders grosses Wasserinfiltrationsvermögen aufwiesen (vgl. «Effekte der Dauergrünland-Nutzungen» weiter unten).

Bei den Stabilitätseigenschaften wiesen BIO-Böden ein statistisch signifikant grösseres Restgrobporenvolumen auf als die ÖLN-Böden, was als grössere Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbeanspruchungen interpretiert werden kann. Die in den ÖLN-Böden statistisch signifikant grössere Aggregatstabilität beruhte auf einer minimalen Wertedifferenz.

Effekte der Nutzungssysteme «Dauergrünland» und «Ackerfläche»

Die Dauergrünlandböden wiesen höhere Humusgehalte auf als die Ackerböden; dieser Nutzungssystem-Effekt war auch funktional relevant, insbesondere in den Oberböden (vgl. «Effekte der Bodentiefe» weiter unten). Dagegen waren in den Dauergrünlandböden die pH-Werte funktional relevant tiefer als in den Ackerböden.

Beim Dauergrünland waren die Oberböden leicht poröser und deshalb auch etwas weniger dicht als die Ackerböden. Die übrigen Porositätseigenschaften wurden dagegen durch die Nutzungssysteme nicht unterschiedlich beeinflusst und lagen durchwegs in den Funktionsklassen «gut» und «sehr gut».

Die Nutzungssysteme hatten unterschiedliche Effekte auf das Transportvermögen der Böden: Bei der Luftpermeabilität traten keine, bei der Wasserinfiltration dagegen relevante Effekte in Erscheinung. Die deutlich höheren Funktionsbeitragswerte in den Dauergrünlandböden waren klar auf die Beiträge der extensiven Wiesen zurückzuführen.

Die statistisch signifikanten Unterschiede beim Stabilitätskriterium Restgrobporenvolumen deuteten darauf hin, dass Ackerböden eine grössere Widerstandsfähig-

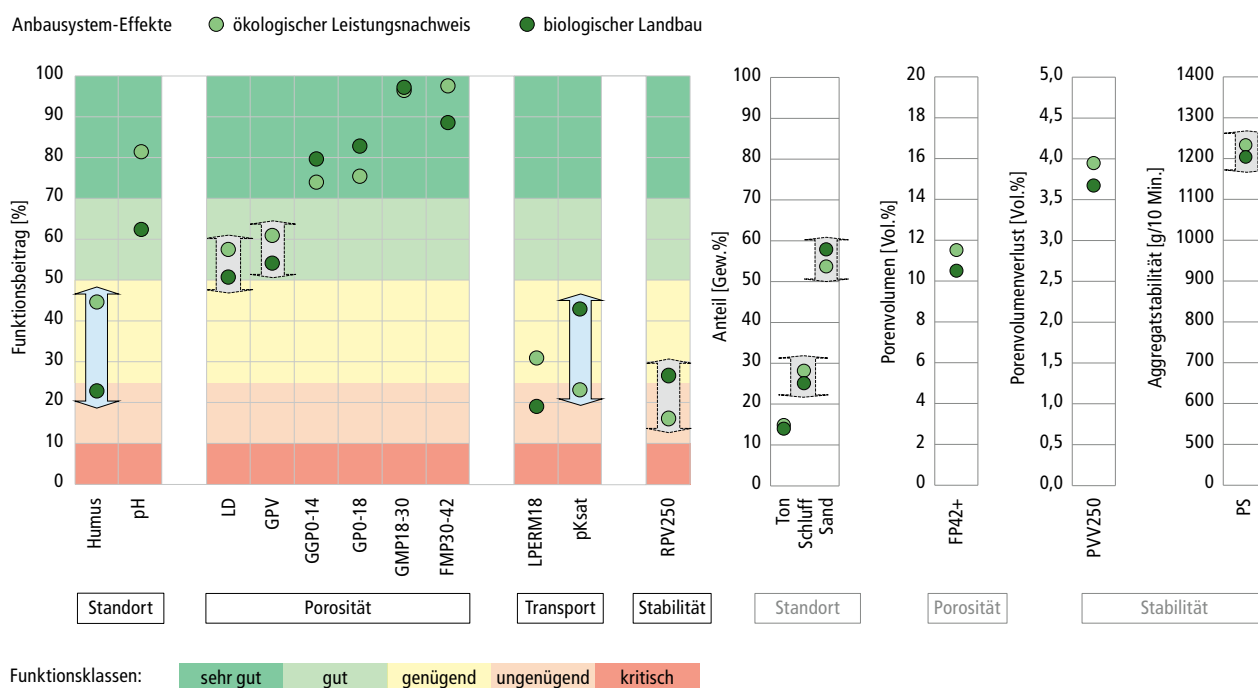


Abbildung 1 | Anbausystem-Effekte von ÖLN bzw. BIO auf standortbezogene und physikalische Bodeneigenschaften in der KABO BE. Dargestellt werden die Funktionsbeiträge bzw. Messwerte der Bodeneigenschaften als Medianwerte über alle Nutzungssysteme, Bodentiefen und die gesamte Monitoringdauer.

Abkürzungen der Bodeneigenschaften gemäss Glossar 2, farblich hinterlegte Funktionsklassen gemäss Glossar 3, Einfärbung der Distanzpeile nach Effektklasse gemäss Glossar 4.

keit gegenüber Druckbeanspruchungen aufwiesen als Dauergrünlandböden, und das insbesondere auch in den Unterböden.

Effekte der Dauergrünland-Nutzungen «intensive Weide» und «extensive Wiese»

Die Art der Dauergrünland-Nutzung wirkte sich deutlich auf standortbezogene und physikalische Bodeneigenschaften aus.

Der Humusgehalt wurde durch intensive Weide gegenüber extensiver Wiese sehr stark erhöht: Der Funktionsbeitragswert intensiver Weiden war fast doppelt so hoch wie der von extensiven Wiesen; trotzdem bewegten sich letztere immer noch in der Funktionsklasse «gut». Diese Effekte traten besonders deutlich in den Oberböden auf, waren aber selbst in den Unterböden noch erkennbar. Im Gegensatz dazu bewegte sich der pH-Wert bei extensiver Wiesenutzung auf funktional wesentlich günstigerem Niveau als bei intensiver Weidenutzung. Bei den Porositätseigenschaften zeigte sich – wie beim Humusgehalt – ein sehr deutlicher Effekt der Dauergrünland-Nutzung auf Lagerungsdichte und Gesamtporosität der Böden: Intensive Weide und extensive Wiese unterschieden sich in funktional relevantem Ausmass,

mit deutlich höheren Funktionsbeitragswerten bei intensiver Weide als bei extensiver Wiese. Während sich die Dauergrünland-Nutzungen bezüglich Grobporen und groben Mittelporen nicht erkennbar unterschieden, war das Volumen der feinen Mittelporen bei intensiver Weide funktional relevant grösser als bei extensiver Wiese; allerdings lagen auch deren Funktionsbeitragswerte immer noch in der Funktionsklasse «sehr gut». Auch beim Transportvermögen wurden unterschiedliche Effekte der Dauergrünland-Nutzungen deutlich: Während die Luftpermeabilitätswerte in den Böden der intensiven Weiden statistisch signifikant grösser waren als bei extensiven Wiesen, war das Wasserinfiltrationsvermögen bei den extensiven Wiesen sehr deutlich und funktional relevant grösser als bei den intensiven Weiden.

Bei den Stabilitätseigenschaften der Böden zeigten die Dauergrünland-Nutzungen keine unterschiedlichen Effekte.

Effekte der zeitlichen Entwicklung

Bei der Beurteilung der zeitlichen Entwicklungen muss berücksichtigt werden, dass für den Turnus 5 erst die Ergebnisse weniger Standorte vorliegen.

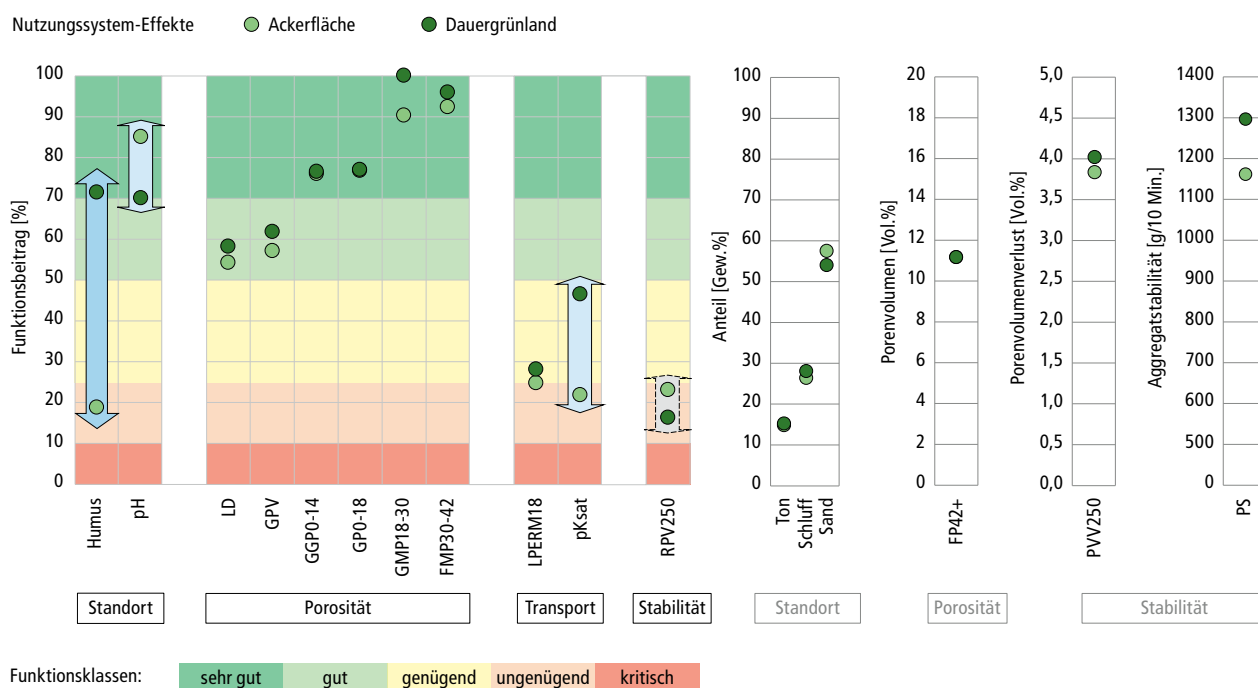


Abbildung 2 | Nutzungssystem-Effekte von Dauergrünland bzw. Ackerfläche auf standortbezogene und physikalische Bodeneigenschaften in der KABO BE. Dargestellt werden die Funktionsbeiträge bzw. Messwerte der Bodeneigenschaften als Medianwerte über alle Anbausysteme, Bodentiefen und die gesamte Monitoringdauer.

Abkürzungen der Bodeneigenschaften gemäss Glossar 2, farblich hinterlegte Funktionsklassen gemäss Glossar 3, Einfärbung der Distanzpfleile nach Effektklasse gemäss Glossar 4.

Bei genereller Betrachtung haben sich die Humusgehalte der Böden während der Monitoringdauer nicht wesentlich verändert – trotz einer beträchtlichen Bandbreite der Funktionsbeitragswerte. Dies im Unterschied zu den pH-Werten, bei denen dies in funktional relevantem Ausmass geschah.

Bei der allgemeinen Struktureigenschaft Lagerungsdichte sowie bei den Gröbst- und Grobporen traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Monitoringzeitpunkten auf. Allerdings war die Variabilität der Funktionsbeitragswerte über die gesamte Monitoringdauer hinweg bei den Grobporen erheblich grösser als bei den allgemeinen Struktureigenschaften. Sowohl das Gesamtporenvolumen als auch die beiden Mittelporenklassen und die Feinporen zeigten jeweils statistisch signifikante Effekte der Monitoringzeitpunkte, jedoch keine kontinuierliche zeitliche Entwicklung.

Auch die beiden Bodeneigenschaften, die das Transportvermögen der Bodenstruktur beschreiben, zeigten deutliche zeitliche Effekte. Das Wasserinfiltrationsvermögen unterschied sich zwischen den Monitoringzeitpunkten statistisch signifikant, der zeitliche Effekt auf die Luftpermeabilität war dagegen auch funktional relevant; beide Bodeneigenschaften zeigten eine kontinuierliche zeitliche Entwicklung. Die Luftpermeabilität der Böden

entwickelte sich über einen sehr grossen Bereich an Funktionsbeitragswerten von der Funktionsklasse «kritisch» bis in die obersten Bereiche der Funktionsklasse «gut». Diese sehr starke und deutliche Verbesserung der Luftpermeabilität während der Monitoringdauer war eines der auffälligsten Ergebnisse des physikalischen Monitorings in der KABO BE. In etwas abgeschwächter Form trat beim Restgroporenvolumen ebenfalls eine kontinuierliche zeitliche Entwicklung in Erscheinung. Die Messwerte der Aggregatstabilität nahmen während der Monitoringdauer kontinuierlich ab, allerdings statistisch nicht signifikant.

Effekte der Bodentiefe

Bei allen physikalischen Bodeneigenschaften zeigten sich zumindest statistisch signifikante, oft aber auch funktional relevante Unterschiede zwischen den Bodenschichten.

Extrem gross waren diese Unterschiede beim Humusgehalt, wo sich auch zwischen der obersten Bodenschicht 0–5 cm und dem Oberboden 0–20 cm funktional sehr deutliche Unterschiede bemerkbar machten. Dagegen unterschieden sich die pH-Werte zwischen den Bodentiefen nicht.

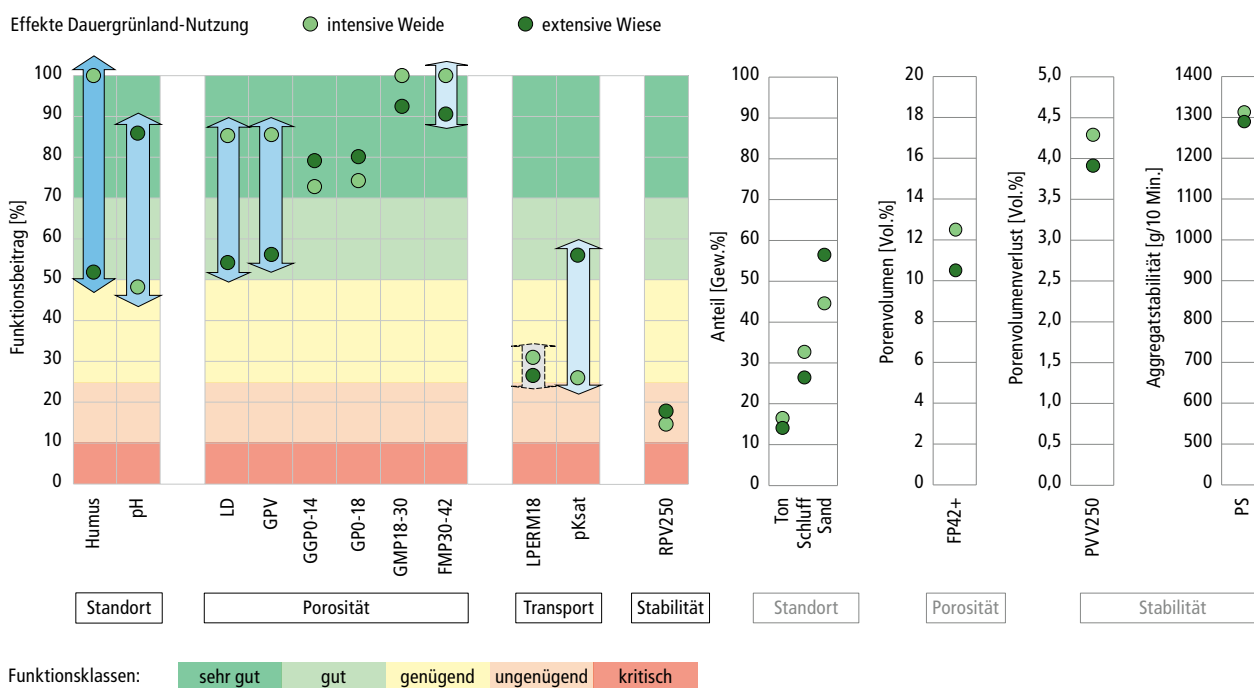


Abbildung 3 | Effekte der Dauergrünland-Nutzungen intensive Weide bzw. extensive Wiese auf standortbezogene und physikalische Bodeneigenschaften in der KABO BE. Dargestellt werden die Funktionsbeiträge bzw. Messwerte der Bodeneigenschaften als Medianwerte über alle Anbausysteme, Bodentiefen und die gesamte Monitoringdauer.

Abkürzungen der Bodeneigenschaften gemäss Glossar 2, farblich hinterlegte Funktionsklassen gemäss Glossar 3, Einfärbung der Distanzpeile nach Effektklasse gemäss Glossar 4.

Während Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen als allgemeine Strukturzustandskriterien zusammen mit den Mittelporen auf günstigere Bedingungen in den Oberböden deuteten, waren in der KABO BE erstaunlicherweise die Grobporenräume in den Unterböden funktional besser ausgebildet als in den Oberböden. Die Grob- und Mittelporenräume bewegten sich überwiegend in der Funktionsklasse «sehr gut», nur in den Oberböden rutschten die Grobporenwerte in die Funktionsklasse «gut» ab.

Wie die Grobporenräume war auch das Transportvermögen für Gase in den Unterböden allgemein besser ausgeprägt; allerdings bewegte sich die Luftpermeabilität (im Unterschied zu den Porositätseigenschaften) in den Unterböden überwiegend nur in der Funktionsklasse «genügend», in den Oberböden sogar nur in der Funktionsklasse «ungenügend».

Interessanterweise war auch das Restgroporenvolumen der Unterböden grösser als jenes der Oberböden – analog zur Situation beim Grobporenvolumen. Sehr deutlich grösser waren die Aggregatstabilitätswerte in den Oberböden als in den Unterböden.

Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften

Die Korrelationsanalysen zeigten klar negative Beziehungen zwischen den standortbezogenen Bodeneigenschaften Sand und Humus sowie ebenso klar positive Beziehungen zwischen Schluff bzw. Ton und Humus.

Die Hauptkomponentenanalyse verdeutlichte die besondere Bedeutung von Körnung und Humus für die chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften der Standorte der KABO BE.

Die Korrelationen der allgemeinen Struktureigenschaften Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen mit den standortbezogenen Bodeneigenschaften Körnung und Humus traten lehrbuchhaft in Erscheinung: Mit zunehmendem Sandgehalt nahm die Lagerungsdichte zu und das Gesamtporenvolumen ab, ebenso mit abnehmendem Humusgehalt – und umgekehrt beim Ton- und beim Schluffgehalt.

Die Grobporen zeigten eine ausgesprochen positive, die feinen Mittelporen dagegen eine negative Korrelation zum Wasserinfiltrationsvermögen, d.h. mit steigendem Grobporenvolumen nahm es zu, mit steigendem Anteil feiner Mittelporen dagegen ab. Die Porengrössenklassen «feine Mittelporen» und «Feinporen» waren deut-

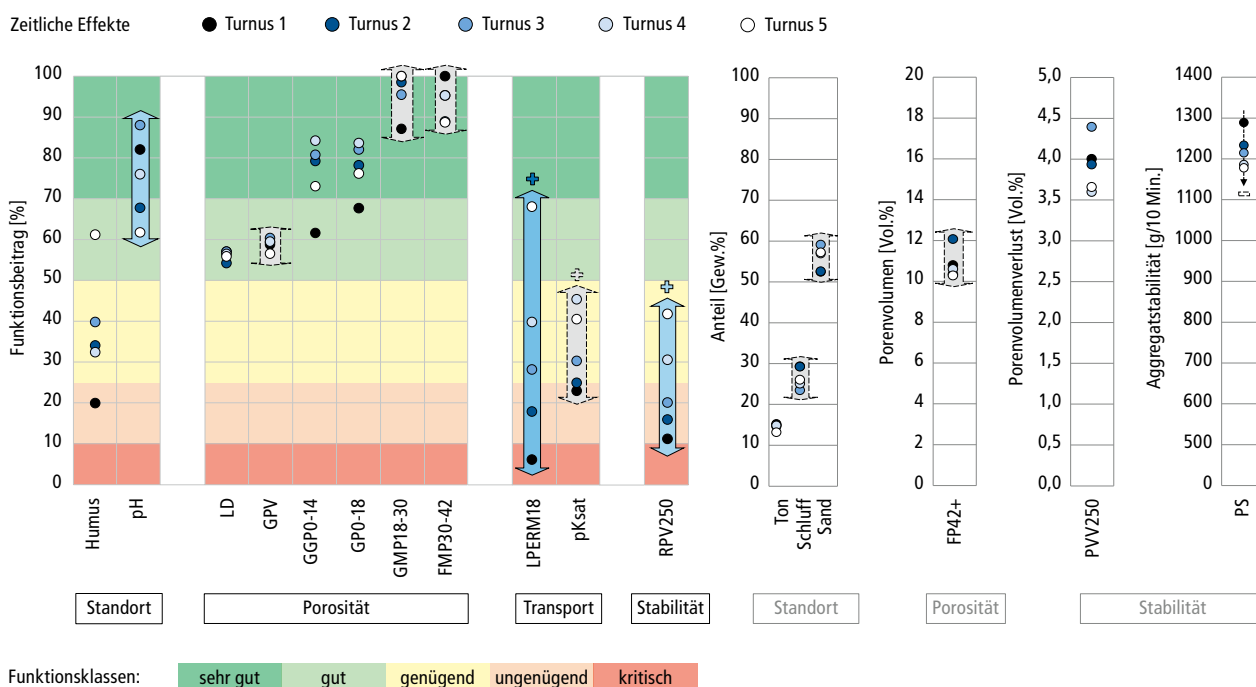


Abbildung 4 | Effekte der zeitlichen Entwicklung von Turnus 1 bis Turnus 5 auf standortbezogene und physikalische Bodeneigenschaften in der KABO BE. Dargestellt werden die Funktionsbeiträge bzw. Messwerte der Bodeneigenschaften als Medianwerte über alle Nutzungssysteme, Anbausysteme und Bodentiefen.

Abkürzungen der Bodeneigenschaften gemäss Glossar 2, farblich hinterlegte Funktionsklassen gemäss Glossar 3, Einfärbung der Distanzpeile nach Effektklasse gemäss Glossar 4. Die Pluszeichen signalisieren Bodeneigenschaften mit kontinuierlichen Verbesserungen während der 30-jährigen Monitoringdauer; entsprechend deutet ein Minuszeichen auf eine sich kontinuierlich verschlechternde Entwicklung. Die Entwicklung der Aggregatstabilitätswerte PS war statistisch nicht signifikant, erfolgte aber trotzdem kontinuierlich.

lich mit standortbezogenen Bodeneigenschaften korreliert: jeweils negativ zum Sandgehalt bzw. positiv mit dem Schluff- und Tongehalt. Bei den Gröbst- und Grobporen bestand dagegen nur zum Schluffgehalt eine negative Korrelation.

Während die Luftpermeabilität mit keiner anderen Bodeneigenschaft klar korrelierte, war das Wasserinfiltrationsvermögen mit dem Sandgehalt positiv und mit dem Schluffgehalt negativ korreliert, was bedeutet, dass sich das Wasserinfiltrationsvermögen der Böden mit steigendem Sandgehalt verbesserte und mit zunehmendem Schluffgehalt verschlechterte. Bei der Hauptkomponentenanalyse zeigte sich, dass diese beiden Messgrößen für Transporteigenschaften der Bodenstruktur praktisch keinen unmittelbaren Bezug zueinander haben und voneinander unabhängige Prozesse beschreiben.

Die Aggregatstabilität schliesslich zeigte eine deutlich positive Korrelation zum Humusgehalt. Die Hauptkomponentenanalyse machte deutlich, dass die Porenvolumenverluste infolge Druckbelastung nur einen geringen Bezug zum Restgroporenvolumen hatten. Weil das Restgroporenvolumen methodisch auf dem vor der Druckbeanspruchung bereits vorhandenen Grobporenvolumen basiert, entspricht diese Messgrösse eher einer

Widerstandsfähigkeit der Grobporen-Struktur gegenüber Druckbeanspruchungen. Bei der Hauptkomponentenanalyse wies der Parametervektor der Aggregatstabilität besonders in den Oberböden in eine andere Richtung als die Parametervektoren der beiden drucksetzungsbezogenen Stabilitätseigenschaften, d.h. die Aggregatstabilität lieferte Informationen zu anderen Stabilitätsaspekten der Bodenstruktur als der Porenvolumenverlust durch Druckbelastung und das Restgroporenvolumen.

Diskussion

Wichtigste Effekte der Monitoringfaktoren «Anbausystem», «Nutzungssystem», «Dauergrünland-Nutzung»

Bei der Gesamtauswertung liessen sich vor dem statistischen Hintergrundrauschen, das durch schwache bzw. zufällige Einflüsse während der 30-jährigen Monitoringdauer hervorgerufen worden ist, nur Folgen von starken bzw. häufig einwirkenden Einflussfaktoren als deutliche Effekte oder gar als kontinuierliche zeitliche Trends erkennen.

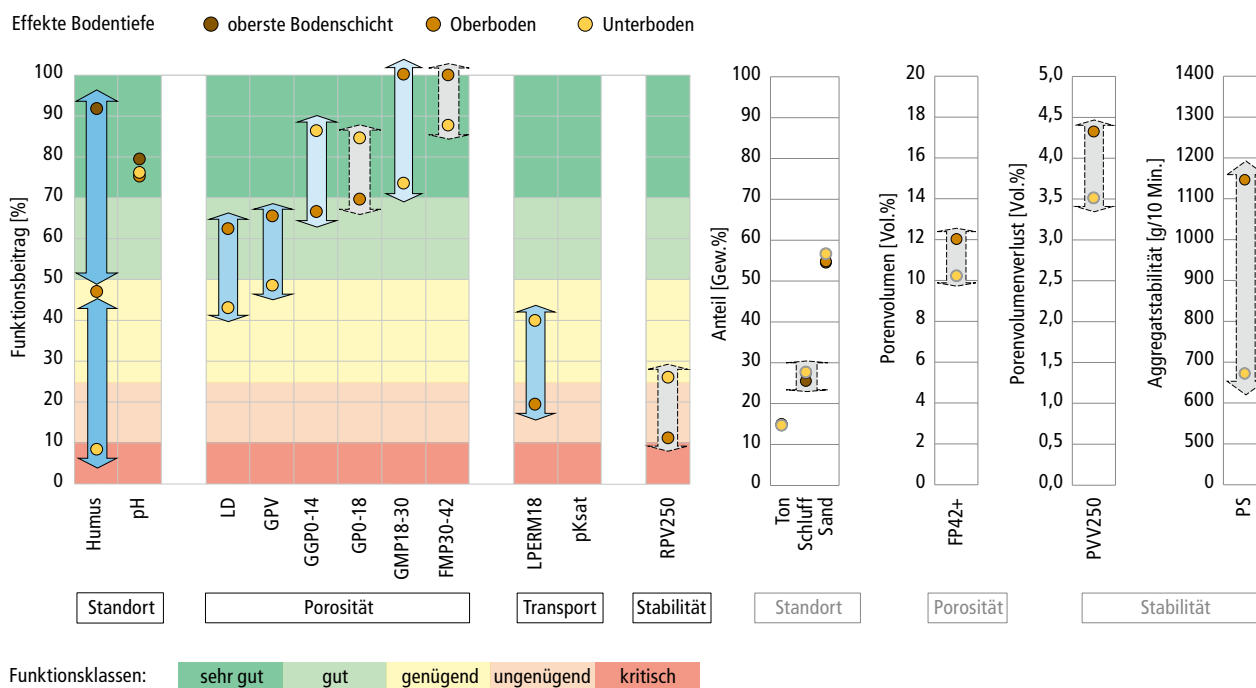


Abbildung 5 | Effekte der Bodentiefe (oberste Bodenschicht 0–5 cm, Oberboden 0–20 cm und Unterboden 20–40 cm) auf standortbezogene und physikalische Bodeneigenschaften in der KABO BE. Dargestellt werden die Funktionsbeiträge bzw. Messwerte der Bodeneigenschaften als Medianwerte über alle Nutzungssysteme, Anbausysteme und die gesamte Monitoringdauer.

Abkürzungen der Bodeneigenschaften gemäss Glossar 2, farblich hinterlegte Funktionsklassen gemäss Glossar 3, Einfärbung der Distanzpeile nach Effektklasse gemäss Glossar 4.

Weder bei den Anbausystemen («ÖLN» vs. «BIO») noch bei den Nutzungssystemen («Dauergrünland» vs. «Ackerfläche») liessen sich deutliche Effekte auf physikalische Bodeneigenschaften erkennen. Ein Grund dafür dürfte sein, dass die KABO BE bezüglich Bewirtschaftung kein definierter Faktorversuch ist, weil die Betriebsleitenden innerhalb der Richtlinien für das jeweilige Anbausystem in ihren Bewirtschaftungsentscheidungen frei sind.

Die unterschiedliche Dauergrünland-Nutzung («intensive Weide» vs. «extensive Wiese») verursachte die stärksten Effekte auf physikalische Bodeneigenschaften. Dabei sind die Effekte auf die Porositätseigenschaften Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen und feine Mittelporen vermutlich als Folgen des sehr starken Effektes der intensiven Weidenutzung auf den Humusgehalt zu betrachten, der wiederum v.a. auf die bessere Nährstoff- und Energieversorgung der Pflanzenbestände und Bodenorganismen durch eine intensivierete Düngung zurückzuführen sein dürfte. Ein Effekt auf das Wasserinfiltrationsvermögen trat besonders stark bei den extensiven Wiesen auf; diese wiesen gemäss Korrelationsrechnungen zwar günstigere Voraussetzungen für ein grösseres Wasserinfiltrationsvermögen auf als die intensiven Weiden (grössere Grobporenvolumen, höherer Sand- und geringerer Schluffgehalt), aber vermutlich war für diesen Parameter auch der Aspekt «Porenkontinuität» wichtig (vgl. Abschnitt «Effekte auf das Transportvermögen der Bodenstruktur» weiter unten). Diese Porenkontinuität dürfte sich in den Bodenstrukturen der extensiven Wiesen als Folge eines günstigen Gleichgewichtes zwischen strukturbildenden (permanente Bodendurchwurzelung) und strukturbelastenden Einflüssen (geringe mechanische Belastungen) besser erhalten geblieben sein als in den intensiven Weiden.

Effekte der Monitoringfaktoren auf standort-bezogene Bodeneigenschaften

Die bei den Schluff- und Sandgehalten festgestellten ungerichteten Effekte der Turnusse müssen vermutlich als zufälliges «Störrauschen» interpretiert werden. Versucht wurden sie wahrscheinlich durch Beprobungseinflüsse, auch im Zusammenspiel mit kleinräumiger Variabilität, und durch methodische Instabilitäten bei der Körnungsanalyse über einen Zeitraum von 30 Jahren. Besonders beim Monitoring sind derartige zufällige Einflüsse sehr unerwünscht, weil sie als Störfaktoren die zeitlichen Entwicklungen der eigentlichen Monitoringfaktoren überlagern und dadurch frühzeitige Schlussfolgerungen erschweren oder gar verunmöglichen können. Die grossen Humusgehaltsunterschiede zwischen den beiden Dauergrünland-Nutzungen dürften auf stark

unterschiedliche Einträge organischer Substanz in Form von pflanzlicher Biomasse und von eingesetztem Hofdünger zurückzuführen sein. Dies führte dazu, dass intensive Weiden gräserreichere, intensiver mit Nährstoffen versorgte und dadurch leistungsfähigere, d.h. mehr Biomasse assimilierende Pflanzenbestände (und als Folge davon besser mit Nahrung versorgte und stärker gegen Temperatur- und Feuchteextreme gepufferte, d.h. aktivere Bodenorganismen) aufwiesen als die eher kräuterreichen extensiven Wiesen (vgl. Vegetationsaufnahmen im Gesamtbericht: 4.4 Beziehungen zwischen und Abhängigkeiten von biologischen Bodeneigenschaften).

Beim Vergleich der Humusgehalte zwischen den Nutzungssystemen «Dauergrünland» und «Ackerfläche» zeigte sich, dass die Effekte in erster Linie in den Oberböden auftraten, d.h. der Umsatz an organischer Substanz fand überwiegend in den obersten Bodenschichten statt. Die Interpretation der zeitlichen Entwicklung der Humusgehalte hing auch vom Humusgehalt zu Beginn des Monitorings ab: In Oberböden mit einem für Ackerböden typischen Humusgehalt veränderte sich der Humusgehalt im Verlauf der Monitoringdauer praktisch nicht (charakteristisch für ÖLN-Betriebe), während Oberböden mit tiefem Anfangshumusgehalt (wie oft bei BIO-Betrieben vorkommend) im Verlauf der Monitoringdauer einen Anstieg ihrer Humusgehalte zeigten, bis auch diese Böden ihren typischen Humusgehalt erreicht hatten.

Effekte der Monitoringfaktoren auf die Porosität der Bodenstruktur

Klare Bewirtschaftungseffekte auf Porositätseigenschaften fehlten praktisch vollständig. Minimale Effekte wurden nur bei der Lagerungsdichte und dem Gesamtporenvolumen erkennbar und dürften dort meist auf deutliche Veränderungen des Humusgehaltes zurückzuführen sein, wie die Korrelationen mit dem Humusgehalt klar aufzeigen. Die Grobporenvolumen wiesen im Monitoringverlauf eine erhebliche Variabilität auf. Ein Grund dafür dürfte der Bodenfeuchtezustand und die Jahreswitterung gewesen sein, welche sich sowohl auf das Verdichtungsrisiko als auch auf das Strukturbildungsvermögen auswirkten (via Stärke und Häufigkeit der Schrumpfungs- und Quellungszyklen sowie über die Bodenumweltbedingungen für Wurzelentwicklung und biologische Aktivität). Letztlich scheint der jahreswitterungsbedingte Bodenzustand den Einfluss einer Anbaumassnahme auf die Strukturentwicklung oft stärker geprägt zu haben als vermutet, d.h. es war nicht nur wichtig, welche Massnahme ausgewählt, sondern auch,

wie sie in einer bestimmten Bewirtschaftungssituation eingesetzt wurde.

Die Unterböden der KABO BE wiesen eine insgesamt bessere Strukturqualität auf als die Oberböden: Die Funktionsbeiträge von Gröb- und Grobporenvolumen, aber auch von Luftpermeabilität und Restgroporenvolumen waren in den Unterböden grösser als in den Oberböden. Dies bedeutet, dass bei den Betrieben der KABO BE die mechanischen Belastungen beim Befahren und Bearbeiten der Oberböden so hoch waren, dass sie zu stärkeren funktionellen Einschränkungen der Strukturqualität führten als in den Unterböden, wo die Belastungen im Allgemeinen so tief gewesen sein müssen, dass sie keine ausgeprägten physikalischen Bodenschäden (z.B. in Form von Pflugsohlenverdichtungen) hervorriefen.

Die Mittel- und Feinporenvolumen wurden durch unterschiedliche Standort- und Bewirtschaftungsgrössen beeinflusst. Die groben Mittelporen zeigten eine Abhängigkeit von Bewirtschaftungsmassnahmen, während feine Mittelporen und Feinporen engere Bezüge zu standortbezogenen Bodeneigenschaften aufwiesen. Dies deutet darauf hin, dass grobe Mittelporen ähnlichen Einflüssen unterworfen waren wie Grobporen (nämlich direkten und indirekten Jahreswitterungseinflüssen auf Strukturbildungs- und -beeinträchtigungsprozesse), während feine Mittelporen und Feinporen in erster Linie von der Bodenzusammensetzung geprägt wurden (Körnung und Humusgehalt).

Effekte der Monitoringfaktoren auf das Transportvermögen der Bodenstruktur

Die Luftpermeabilität der Unterböden war über alle Monitoringfaktoren hinweg betrachtet deutlich höher als in den Oberböden: Anscheinend war das grössere Grobporenvolumen der Unterböden auch funktional leistungsfähiger als jenes der Oberböden. Obwohl sich das Gastransportvermögen sowohl der Ober- als auch der Unterböden während der Monitoringdauer kontinuierlich verbesserte, erreichte es in den Oberböden meist nur die Funktionsklasse «genügend», während es sich in den Unterböden bis in die Funktionsklasse «gut» entwickelte. Aus Sicht des physikalischen Bodenschutzes ist die in der KABO BE festgestellte zeitliche Entwicklung des Gastransportvermögens von Böden sehr erfreulich, weil sich dadurch deren ökologische Funktionalität – und damit auch deren Beiträge zu Ökosystem-Dienstleistungen – erheblich verbesserte.

Weshalb die Gastransportnetzwerke v.a. in den Unterböden ihre Leistungsfähigkeit über die Jahre hinweg kontinuierlich steigern konnten, ist anhand der Moni-

toringdaten allerdings nicht zu erklären. Anscheinend wirkten strukturbildende Prozesse zunehmend stärker auf die Unterböden ein. Ob dies mit häufigeren und tiefer in den Boden einwirkenden Quellungs-/Schrumpfungszyklen zusammenhängt (z.B. häufiger auftretende nass/trocken-Wechsel und ausgeprägtere Trockenheitsphasen als Folge der Klimaentwicklung) oder mit ausgeprägteren biologischen Strukturbildungsprozessen (z.B. intensivere und länger anhaltende Unterboden-Durchwurzelung durch bessere Bewirtschaftungsplanung und -durchführung), muss genauer untersucht werden. Neuere wissenschaftliche Ergebnisse deuten darauf hin, dass die für die Luftpermeabilität massgeblichen Gröb- und Grobporennetzwerke in tieferen Bodenschichten überwiegend durch biologische Prozesse entstehen und instandgehalten werden (Koestel, 2026).

Über das mit Abstand höchste Wasserinfiltrationsvermögen verfügten die Böden der extensiven Wiesen. Die Nutzung von Dauergrünland (und die Anlage von Kunstwiesen in der Ackerfläche) hat strukturfördernde Einflüsse zur Folge, sowohl durch direkte als auch durch indirekte strukturbildende Wirkungen der permanenten Bodendurchwurzelung und -bedeckung (grössere und länger anhaltende Wurzelaktivität bzw. Förderung biologischer Aktivitäten). Daneben können aber auch strukturschädigende Bewirtschaftungseinflüsse auftreten: Bei intensiv genutzten vier- bis sechsschnittigen Wiesen bzw. intensiv bestossenen Weiden werden durch wiederholte Düngungs- und Erntemassnahmen bzw. Beweidungen erhebliche mechanische Belastungen verursacht, die je nach Bodenfeuchtezustand unterschiedliche Strukturbelastungen oder gar -schäden zur Folge haben können. Die mechanische Bodenbelastung bei intensiver Dauergrünland- und Kunstwiesenutzung kann deutlich höher sein als beispielsweise beim Anbau von Wintergetreide und deshalb v.a. an feuchteren Standorten bzw. in feuchteren Jahren stärkere Strukturbelastungen verursachen. Das kann soweit gehen, dass ein Grossteil des Strukturbildungsvermögens von Wiesen durch stärkere Strukturschädigungen weitgehend zunichte gemacht wird. Mit Blick auf den Gebietswasserhaushalt (Wasserspeicherung, Grundwasserneubildung) und Stoffverluste durch Oberflächenabflüsse (Nährstoffe in Oberflächengewässer, Bodenerosion) ist ein erhöhtes Wasserinfiltrationsvermögen eine sehr willkommene Bodenfunktion.

Die Tatsache, dass das Gas- und das Wassertransportvermögen der beiden Dauergrünland-Nutzungen gegensätzlich beurteilt wurden, ist nicht zwingend ein Widerspruch: Während die Luftpermeabilität spezifisch in einzelnen Bodenschichten gemessen wird, berück-

sichtigt die Messmethode zur Bestimmung der Wasserinfiltration neben dem Strukturzustand von Ober- und Unterboden (inkl. allfälliger Zwischenschichten, z.B. Pflugsohlen) auch den Zustand der Bodenoberfläche; das Infiltrationsvermögen wird dabei durch die am stärksten limitierende Bodenschicht bestimmt.

Effekte der Monitoringfaktoren auf die Stabilität der Bodenstruktur

Die Dauergrünlandböden zeigten im Drucksetzungsversuch mehr Porenvolumenverlust als die Ackerböden, d.h. die Struktur der Ackerböden war mechanisch etwas stabiler als die der Dauergrünlandböden.

Das in Ackerböden statistisch signifikant grössere Restgroporenvolumen ist so zu interpretieren, dass Ackerböden nach derselben Druckbelastung noch über mehr restliches Groporenvolumen verfügten als die Dauergrünlandböden, d.h. eine grössere Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Belastungen besaßen als die Dauergrünlandböden.

Das Restgroporenvolumen war eine der wenigen Bodeneigenschaften, deren Funktionsbeiträge sich während des Monitoringzeitraumes kontinuierlich und beträchtlich verbesserten, und zwar sowohl in den Ober- als auch in den Unterböden. Das bedeutet, dass die Widerstandsfähigkeit der Groporenstrukturen gegenüber Druckbelastungen während der Monitoringdauer zugenommen hat und ein deutlicher kontinuierlicher Funktionsanstieg aus dem Bereich knapp über der Funktionsklasse «kritisch» bis in den oberen Bereich der Funktionsklasse «genügend» erfolgte. Ähnlich wie bei der Luftpermeabilität sind die Gründe dafür nicht klar. Neben der Verstärkung strukturfördernder Prozesse durch Bewirtschaftungsverbesserungen (z.B. intensiveres Durchwurzeln und Bedecken der Böden) oder durch Klimaveränderungen (z.B. intensivere Austrocknungs-/Wiederbefeuchtungszyklen), könnten durch anbautechnische Verbesserungen auch strukturschädigende Einflüsse abgemildert worden sein: Bei der Bodenbearbeitung beispielsweise durch den vermehrten Einsatz von On Land-Pflügen und pfluglosen Bearbeitungsverfahren, das Verringern von Bearbeitungstiefe und Bearbeitungsintensität oder ein generell stärkeres Augenmerk auf die situative Arbeitsqualität – also das systematischere und konsequentere Anwenden der «guten fachlichen Praxis».

Der bei den Aggregatstabilitäts-Bestimmungen festgestellte sehr ausgeprägte Tiefeneffekt dürfte auf die grosse Bedeutung des Humusgehaltes (und der damit zusammenhängenden bodenbiologischen Aktivität) für diese Stabilitätseigenschaft zurückzuführen sein,

was sowohl für Boden- als auch für Nährstoffverluste relevant ist («äussere und innere Erosion»).

Der Vergleich der verschiedenen Stabilitätseigenschaften ergab scheinbar widersprüchliche Ergebnisse: Einerseits war die Aggregatstabilität in den Oberböden sehr deutlich grösser als in den Unterböden, andererseits wiesen Porenvolumenverlust und Restgroporenvolumen auf eine grössere Strukturstabilität der Unterböden hin. Die Erklärung dafür dürfte in der Berücksichtigung von Stabilitätsmechanismus und Grössenskala liegen, für die diese Messgrössen Aussagen ermöglichen: Die Aggregatstabilität kennzeichnet den Zusammenhalt der einzelnen mineralischen und organischen Bodenteilchen im Mikromassstab (Bodenteilchen im Bereich von mm^3), Drucksetzungseigenschaften erfassen dagegen Struktureigenschaften auf der Mesoskala (Bodenvolumen im Bereich von cm^3 bis dm^3). Diese unterschiedlichen Stabilitätsmechanismen und Grössenskalen beschreiben auch unterschiedliche Prozessbezüge: Auf der Mikroskala geht es um Fragen wie Verschlämmungs- und Erosionswiderstand, auf der Mesoskala um mechanische Druckbelastungen durch Maschinen (Fahrspurverdichtungen) und Tiere (Trittschäden).

Schlussfolgerungen

Die KABO BE ermöglichte über 30 Jahre hinweg Einblicke in das Wirkungsgefüge zwischen Bodeneigenschaften und landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmassnahmen am Beispiel einer Gruppe von 19 über den Kanton Bern verteilten Praxisbetrieben und liessen erkennen, welche landwirtschaftlichen Bewirtschaftungseinflüsse sich auf welche Bodeneigenschaften wie stark auswirkten, und wann (Turnus) bzw. wo (Bodentiefe) diese Effekte erkennbar waren.

- Die stärksten Bewirtschaftungseffekte traten bei der unterschiedlichen Nutzung von Dauergrünland («intensive Weide» vs. «extensive Wiese») auf. Durch die intensive Weide wurden deutliche Effekte bei den allgemeinen Struktureigenschaften Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen sowie in abgeschwächter Form bei den feinen Mittelporen ausgelöst, und zwar auf indirektem Weg über die starke Erhöhung des Humusgehaltes. Der ausgeprägt günstige Effekt extensiver Wiese auf das Wasserinfiltrationsvermögen der Böden dürfte auf die geringere mechanische Belastung bei extensiver Nutzung zurückzuführen sein, wodurch die Kontinuität der Fliessbahnen von der Bodenoberfläche bis in tiefere Bodenschichten weniger gestört wurde.

- Etwas überraschend war die Feststellung, dass weder Anbau- noch Nutzungssysteme klare Effekte auf die Grobporenräume zur Folge hatten; gleichzeitig überstrichen ihre Funktionsbeiträge über die ganze Monitoringdauer hinweg aber einen grossen Wertebereich. Dies dürfte auch damit zusammenhängen, dass die Strukturentwicklung der Grobporenräume ein in jeder Hinsicht sehr dynamischer Prozess ist, der sowohl durch Anbaumassnahmen als auch durch deren Wechselwirkungen mit der Jahreswitterung kurzzeitig beeinflusst werden kann. Dass keine Effekte erkennbar waren, dürfte u.a. daran liegen, dass keine systematischen groben Bewirtschaftungsfehler gemacht worden sind («Schadverdichtungen bis in tiefere Bodenschichten»), die über Jahre hinweg zu kumulativen Schäden geführt hätten und beim Monitoring erkannt worden wären. Gleichwohl zeigt die grosse Bandbreite der Grobporen-Werte, dass es an verschiedenen Stellen in den Anbau- und Nutzungssystemen immer wieder zu kleineren «Unfällen» gekommen sein dürfte, die aber zwischen zwei Beprobungsintervallen durch die Strukturbildungsprozesse wieder einigermaßen kompensiert werden konnten. Ähnlich dürfte die Situation beim Wasserinfiltrationsvermögen zu beurteilen sein, das zumindest im Bereich von Bodenoberfläche und Oberboden ebenfalls diesen sehr dynamischen Strukturbildungsprozessen unterworfen ist. Anstelle der ausbleibenden groben Fehler wie bei den Grobporenräumen verursachte beim Wasserinfiltrationsvermögen eine Bewirtschaftungsform klar erkennbare Effekte, weil sie dank generell geringerer mechanischer Belastungen vermutlich besonders wenige Strukturschäden verursacht hat.
- Auf den zweiten Blick wurde allerdings klar, dass entscheidende Entwicklungen wichtiger physikalischer Bodeneigenschaften auf die strukturschonende Bewirtschaftung der Unterböden zurückzuführen sein dürften. Weil diese unterbodenschonende Bewirtschaftung anscheinend ein generelles Qualitätsmerkmal der KABO-Betriebe darstellte, traten ihre Effekte nicht nur bei einzelnen Monitoringfaktoren in Erscheinung. Sie hatte zur Folge, dass die Unterböden in der KABO BE nicht nur über grössere Grobporenräume verfügten als die Oberböden, sondern dass diese grösseren Grobporenräume in den Unterböden auch eine grössere Funktionalität aufwiesen, und zwar sowohl bezüglich des Gastransportvermögens als auch hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbelastungen.
- Sowohl die Luftpermeabilität der Böden als auch ihr Restgroporenvolumen verbesserten sich über die Monitoringdauer von 30 Jahren hinweg stetig, was zu Funktionssteigerungen aus der Funktionsklasse «kritisch» bis in die Funktionsklasse «genügend» (Restgroporenvolumen) bzw. in die obersten Bereiche der Funktionsklasse «gut» (Luftpermeabilität) führte. Die Ursachen dieser Entwicklungen sind allerdings noch nicht verstanden. Eine zentrale Voraussetzung dafür könnte gewesen sein, dass es den Betrieben gelang, Unterbodenverdichtungen konsequent zu vermeiden; ein anderer Grund könnten Veränderungen der Bodenumweltbedingungen als Folge der Klimaentwicklung sein. Dieses Zusammentreffen günstiger Ausprägungen von zentralen, funktional wichtigen physikalischen Bodeneigenschaften in den besonders schutzbedürftigen Unterböden ist aus Sicht des physikalischen Bodenschutzes höchst erfreulich und ein bemerkenswerter Leistungsausweis der KABO BE-Betriebe mit ihren verschiedenartigen Fruchtfolgen (inkl. Zuckerrüben und Kartoffeln).
- Was den Betrieben bei der Unterbodenschonung gelang, haben sie bei der Bewirtschaftung ihrer Oberböden allerdings noch nicht geschafft. Hier machte sich ein genereller Zielkonflikt mechanisierter Landwirtschaft bemerkbar, dass bewirtschaftungsbedingt hohe mechanische Bodenbelastungen entstehen, die bei mehreren funktional wichtigen Bodeneigenschaften ihren Tribut fordern können (Groporen, Gas- und Wassertransportvermögen, Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbelastungen). Dies zeigt einen Verbesserungspfad für die Betriebe auf: strukturbelastende Bewirtschaftungseinflüsse sollten auch in den Oberböden verringert, strukturfördernde Bewirtschaftungseinflüsse dagegen gefördert und verstärkt werden. Dies wäre möglich mit strukturfördernden Massnahmen wie dem Verbessern der Intensität und Dauer von Bodendurchwurzelung und -bedeckung, v.a. aber mit dem situativen Verringern mechanischer Strukturbelastungen, v.a. dem Überlockern (durch zu intensive Bodenbearbeitung) oder dem Verdichten der Bodenstruktur (durch intensiven Viehtritt, intensives Befahren oder Bearbeiten der Böden insbesondere bei sehr feuchten Bodenverhältnissen).
- Eine standortgemässe und situativ angepasste Bewirtschaftung gehört zu den Kernkompetenzen von Betrieben, die ihre Böden erfolgreich und nachhaltig bewirtschaften. Dabei ist bei den physikalischen Bodeneigenschaften das Hauptaugenmerk über die Jahre hinweg aufs Vermeiden grober Bewirtschaftungsfehler bei den wichtigsten Einflussfaktoren zu legen, und erst in zweiter Linie auf die Perfektionierung der Bewirtschaftungsmassnahmen. Das erfordert nicht nur

eine gründliche Fachausbildung, sondern auch ein geschultes Beurteilungsvermögen. Dieses kann von neuen Technologien zweckmässig unterstützt, aber nicht ersetzt werden: Letztlich bestimmen die Betriebsleitenden über die Entwicklung von Bewirtschaftungstechnik und Betriebsressourcen.

- Monitoringversuche wie die KABO BE ermöglichen es, günstige und ungünstige Bewirtschaftungseinflüsse auf Böden über eine längere Zeitdauer zu verfolgen und dabei auch – im Unterschied zu einfachen Faktorversuchen – unterschiedliche Mechanismen zu

erkennen, z.B. (i) bezüglich der meteorologischen Bedingungen (vom jährlichen Wettergeschehen als Hintergrundrauschen bis zu systematischen Veränderungen des Klimas), (ii) hinsichtlich der auf den Betrieben tatsächlich eingesetzten Bewirtschaftungstechnik, oder auch (iii) mit Blick auf die Entwicklung des Könnens der LandwirtInnen, Bewirtschaftungstechniken effektiv einzusetzen und Bewirtschaftungssituationen richtig zu beurteilen und organisatorisch sinnvoll anzugehen. ■

Dank

Wir danken den Bewirtschafterinnen und Bewirtschaftern der KABO BE-Betriebe für die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit; mit ihrem permanenten Einsatz und ihren konstruktiven Beiträgen haben sie die KABO BE erst ermöglicht.

Literatur

- Chervet A., Maurer C., Ramseier L., Sturny W., Weisskopf P., Zihlmann U., Sommer M., & Nussbaum M. (2026). Gesamtbericht zu den bodenchemischen, bodenphysikalischen und bodenbiologischen Ergebnissen der KABO BE. <https://zenodo.org/communities/kabo-be/>
- Agroscope. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). <https://www.agroscope.admin.ch/de/grundlagen-fuer-die-duengung-landwirtschaftlicher-kulturen-in-der-schweiz-grud>
- Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz. (2004). BGS Dokument 13. <https://www.soil.ch/de/publikationen/dokumente>
- Bundesamt für Umwelt und Landschaft. (2021). Boden und seine Funktionen. <https://www.bafu.admin.ch/de/boden-und-seine-funktionen>
- Cercle Sol. (2026). <https://www.kvu.ch/de/themen/boden>
- Koestel J. (2026). Mündliche Mitteilung.
- Nussbaum M. (2014). Vorstudie zur Wirkungsbeurteilung des Förderprogramms «Boden» des Kantons Bern durch Analyse der kantonalen Bodenbeobachtung Bern. Diplomarbeit, Institut für mathematische Statistik und Versicherungslehre der Universität Bern, 42 pp.
- Schweizerischer Bundesrat. (2020). Bodenstrategie Schweiz – für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Umwelt-Info, 69 pp.
- Schweizerischer Bundesrat. (2025). Verordnung über Belastungen des Bodens. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/1854_1854_1854/de
- 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* 7:164; doi: 10.3389/fenvs.2019.00164
- Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften. (2021) Sekretariatsführung der Fachgruppe Vollzug Bodenphysik (VBPhy) des Cercle Sol. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/projekt/71561>