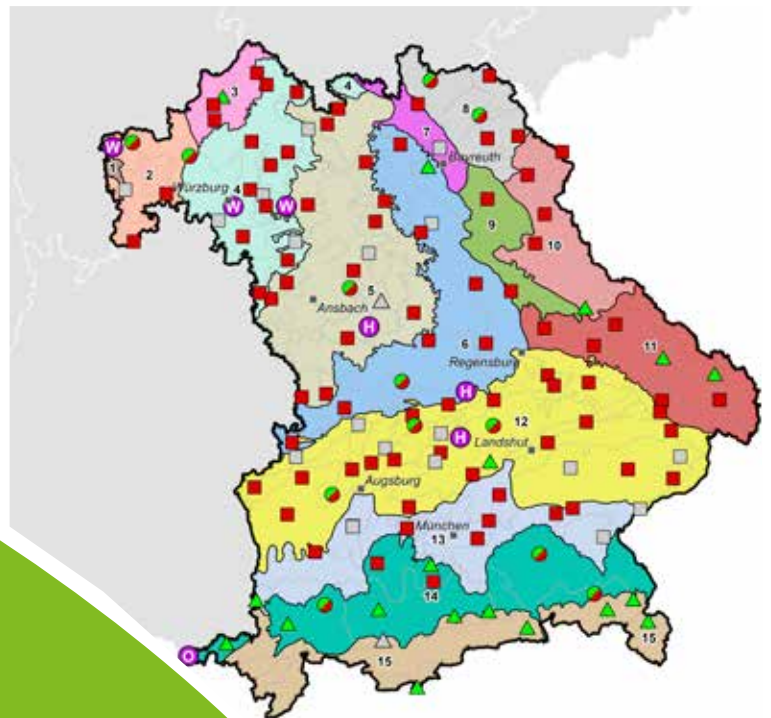




LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

**35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung
landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern
Band 6: Kurzfassung und Fazit**



Schriftenreihe

02

2022

ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agraroeekologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 8640-3640

1. Auflage: Februar 2024

Druck: Saxoprint GmbH, Dresden,

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL

**35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung
landwirtschaftlich genutzter Flächen
in Bayern**

Band 6: Kurzfassung und Fazit

**Melanie Treisch, Johannes Burmeister,
Titus Ebert, Florian Ebertseder, Gisbert
Kuhn, Christa Müller, Roswitha Walter,
Martin Wiesmeier**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	11
Zusammenfassung	12
Abstract	14
1 Überblick und Repräsentativität für Bayern	17
1.1 Standortwahl und Beprobungsumfang	17
1.2 Repräsentativität	19
1.3 Entwicklungen während des Beobachtungszeitraums 1985-2018	22
1.3.1 Temperatur und Niederschlag (Acker und Grünland).....	22
1.3.2 Angebaute Kulturen (Acker)	24
1.3.3 Bewirtschaftung (Acker)	25
1.3.4 Ökolandbau (Acker und Grünland).....	27
2 Bodenphysik	30
2.1 Texturanalyse	30
2.1.1 Bodenarten im Oberboden	30
2.1.2 Bodenarten im Unterboden	31
2.2 Bodengefüge - Status und Veränderung.....	33
3 Bodenschadstoffe	39
3.1 Anorganische Stoffe in Böden	39
3.2 Organische Schadstoffe in Böden	46
3.3 Einträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Böden.....	47
3.3.1 Durch Wirtschafts- und Mineraldünger	47
3.3.2 Über die Luft	49
3.3.3 Durch Cu- und Zn-Spritzungen bei Sonderkulturen	50
4 Humus	52
5 Regenwürmer	58
5.1 Acker	58
5.2 Grünland.....	62
5.3 Sonderkulturen	65
6 Vegetation	68
6.1 Methoden.....	68
6.2 Ergebnisse	69
6.2.1 Entwicklung der Artenzahlen.....	69
6.2.2 Gewinner und Verlierer im Laufe der Jahrzehnte	70

7	Fazit und Ausblick	73
7.1	Fazit zu den beobachteten Entwicklungen	73
7.1.1	Rechtliche Rahmenbedingungen und allgemeine Entwicklungen	73
7.1.2	Veränderung von Bewirtschaftungsparametern und Auswirkungen auf die Indikatoren des Bodenzustands	75
7.1.3	Auswirkung des Klimawandels.....	77
7.2	Empfehlungen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und Risikovorsorge	78
7.3	Ausblick	80
7.3.1	Bedeutung des BDF-Programms.....	80
7.3.2	Herausforderungen und Weiterentwicklung des BDF-Programms.....	81
7.3.2.1	Flächenauswahl	81
7.3.2.2	Parameterumfang und Methoden	82
8	Schlusswort	84
	Danksagung.....	86
	Literaturverzeichnis	87

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1: Übersicht über die BDF-Standorte und deren Lage in den Landschaftseinheiten nach Wittmann, 1991 (Stand 2018); Geobasisdaten: NUTS 2013.....	17
Abb. 2: Verteilung der Acker-Standorte aus dem BDF-Programm und der gesamten Ackerfläche in Bayern nach Bodenarten der Bodenschätzung (LfSt, 2009; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	20
Abb. 3: Verteilung der Ackerflächen und Acker-BDF in Bayern nach Höhenstufen (BVV, 2012; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	21
Abb. 4: Verteilung der Grünlandflächen und Grünland-BDF in Bayern nach Höhenstufen (BVV, 2012; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	21
Abb. 5: Verteilung der Ackerflächen und Acker-BDF in Bayern nach langjährig gemittelter Jahresdurchschnittstemperatur (1985-2018), (DWD, 2020a; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	21
Abb. 6: Verteilung der Grünlandflächen und Grünland-BDF in Bayern nach langjährig gemittelter Jahresdurchschnittstemperatur (1985-2018), (DWD, 2020a; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	21
Abb. 7: Verteilung der Ackerflächen und Acker-BDF in Bayern nach langjährig gemittelten Niederschlagssummen (mm) (1985-2018); (DWD, 2020b; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	21
Abb. 8: Verteilung der Grünlandflächen und Grünland-BDF in Bayern nach langjährig gemittelten Niederschlagssummen (mm) (1985-2018); (DWD, 2020b; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)	21
Abb. 9: Temperatur im Beobachtungszeitraum (1985-2018) im bayerischen Mittel und im Mittel für die BDF, unterschieden nach Acker und Grünland (DWD, 2020a); Acker-Bayern: $y=0,046x + 7,9$; $R^2=0,34$; Acker-BDF: $y=0,047x + 7,9$; $R^2=0,35$; Grünland-Bayern: $y=0,043x + 7,5$; $R^2=0,33$; Grünland-BDF: $y=0,039x + 7,0$; $R^2=0,30$	23
Abb. 10: Jahresniederschlag (mm) im Beobachtungszeitraum im bayerischen Mittel und im Mittel für die einzelnen BDF Standorte, unterschieden nach Acker und Grünland (DWD, 2020b); Acker-Bayern: $y=-3,3x + 871$; $R^2=0,10$; Acker-BDF: $y=-3,2x + 853$; $R^2=0,09$; Grünland-Bayern: $y=-4,0x + 1126$; $R^2=0,10$; Grünland-BDF: $y=-4,0x + 1377$; $R^2=0,08$	23
Abb. 11: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur in °C a ⁻¹ (rechts) und der Jahresniederschläge mm a ⁻¹ (links) für die BDF und den Zeitraum von 1985 bis 2018; ermittelt aus Rasterdaten des DWD (DWD, 2020a; DWD, 2020b; Geobasisdaten BVV, 2021; Wittmann, 1991).....	24
Abb. 12: Entwicklung der Maisanbaufläche im Beobachtungszeitraum von 1985 bis 2018 auf den Acker-BDF und den Ackerflächen in Bayern; (1985-1992: Statistische Jahrbücher von Bayern, 1993-2018: InVeKoS).....	25
Abb. 13: Jährlicher Anteil (in %) der BDF mit Zwischenfruchtanbau, der BDF mit Winterzwischenfrucht und Anteil der über Winter begrünter BDF (Winterzwischenfrucht + Winterung)- Entwicklung über den Beobachtungszeitraum 1985-2018.....	26
Abb. 14: Jährlicher Anteil (%) der BDF mit wendender Bodenbearbeitung (gepflügte BDF, braun) und pfluglos bewirtschafteter BDF (orange) – Entwicklung über den Beobachtungszeitraum 1985-2018.....	26

Abb. 15: Jährlicher Anteil (%) der BDF mit organischer Düngung gesamt (braun), Ausbringung von Gülle (orange) und Ausbringung von Biogasgärresten (olivgrün), Entwicklung über den Beobachtungszeitraum 1985-2018.	27
Abb. 16: Anteile (%) der Bewirtschaftungsjahre für die Bewirtschaftungsparameter je Acker-BDF im Beobachtungszeitraum von 1985 bis 2018	28
Abb. 17: Anteil der BDF mit ökologischer Bewirtschaftung (Acker, Grünland, Flächen mit Nutzungsänderung und Sonderkulturen, n=117) über den Beobachtungszeitraum im Vergleich zur bayernweiten Entwicklung an der landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF, incl. Acker, Grünland, Sonderkulturen), Quelle: 1990-2002: Angaben der Anbauverbände Demeter, Bioland, Biokreis und Naturland (LVÖ, 2021), ab 2003: basierend auf den Angaben der in Bayern zugelassenen und beliehenen Öko-Kontrollstellen (LfL, 2021)	29
Abb. 18: Bodenartendreieck für den Oberboden aller BDF-Standorte (nach Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 2005).....	31
Abb. 19: Vergleich der bodenphysikalischen Parameter Substanzdichte, Totwasser, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität zwischen Pflugsohle und Unterboden sowie den beiden Probenahmeserien.....	34
Abb. 20: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle als jährliche Änderung von 25 Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in % a ⁻¹	35
Abb. 21: Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der Entwicklung der Luftkapazität mit den ausgewählten Variablen (Farbskala nach p-Wert)	36
Abb. 22: Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten (standardisiert) für das ungewichtete und das mit dem RMSE gewichtete gemittelte Model für die Entwicklung Luftkapazität der bayerischen Acker BDF (full average Methode). 36	
Abb. 23: Gesamtgehalte ausgewählter elf chemischer Elemente im Königswasser-Extrakt der BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen im Vergleich zu typischen Hintergrundwerten (Sb, U) und Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV, 2021 – sie gilt seit 01.08.2023) [gesamter Beobachtungszeitraum und für insgesamt 4 Beprobungen im Abstand von 10 Jahren].	40
Abb. 24: Exemplarisch für die Entwicklung der Elementgehalte aller 11 betrachteter chemischer Elemente auf Acker- und Grünland-BDF: Entwicklung der Cd- (oben) und (unten) Zn-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg ⁻¹ a ⁻¹ ; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R ²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.....	43
Abb. 25: Entwicklung der Gesamtgehalte elf anorganischer Stoffe in Oberböden von BDF seit 1985 (Anteil BDF in % der BDF unter jeweiliger Nutzung und Trends über alle BDF, unabhängig vom Bestimmtheitsmaß).	44
Abb. 26: Cu- und Zn-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung (170 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹) mit Rinder- bzw. Schweinegülle.....	48
Abb. 27: Mittlere Blei-, Kupfer- und Zink-Einträge in ländlichen Gebieten Bayerns durch Immissionen (1985-2019).	50
Abb. 28: Entwicklung der Corg-Gehalte als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg g ⁻¹ a ⁻¹ ; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R ²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert – Anfangswert an.	53

Abb. 29: Entwicklung der Corg-Gehalte als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg g}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert – Anfangswert an.	53
Abb. 30: Veränderung der Corg-Gehalte (mg g^{-1}) der Acker-BDF (links) und Grünland-BDF (rechts) über den Beobachtungszeitraum	54
Abb. 31: Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten (standardisiert) für das ungewichtete und das mit dem RMSE gewichtete gemittelte Model für die Entwicklung der Corg-Gehalte der bayerischen Acker-BDF (full average Methode).	55
Abb. 32: Entwicklung des C/N-Verhältnisses als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum; unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert – Anfangswert an.	56
Abb. 33: Entwicklung der Abundanz adulter Individuen von <i>Lumbricus terrestris</i> als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in Individuen $\text{m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x bedeutet die Differenz Endwert – Anfangswert	59
Abb. 34: Geschätzte Koeffizienten für die Änderung der Abundanz adulter Tiere von <i>Lumbricus terrestris</i> in Ackerböden mit Konfidenzintervallen für ein gemitteltes Modell (model selection averaging).....	60
Abb. 35: Konfidenzintervalle der Faktoren der Modellierung (model selection averaging) für die Gesamtabundanz und Gesamtbiomasse der Regenwürmer im Acker (full averaged coefficients); Datengrundlage der 4. Probenahmeserie ab 2011 (Erfassungsmethode über Austreibungsmethode und ergänzender Handauslese)	61
Abb. 36: Durchschnittliche Abundanz (Individuen m^{-2}) adulter Tiere von <i>Lumbricus terrestris</i> (links) und der Diversität der Regenwürmer auf den Grünland-BDF in Bayern von der 1. bis zur 4. Probenahmeserie	63
Abb. 37: Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der von 2011 bis 2018 auf den Grünland-BDF ermittelten Regenwurm-Gesamtabundanz (oben) und Regenwurm-Gesamtbiomasse (unten) mit den ausgewählten Variablen (Farbskala nach p-Wert)	64
Abb. 38: Trendentwicklung der Abundanz adulter Tiere der Zeigerart <i>Lumbricus terrestris</i> (Individuen/ m^2), für die 3 Wein-BDF (BDF 97,102,108) von der 1. bis 4. Probenahmeserie. Je Probenahmetermin ist der Mittelwert aus 10 Stichproben mit Standardabweichung angegeben, rot eingezeichnet ist die berechnete lineare Trendlinie.	66
Abb. 39: Artenzahlen für alle Acker-BDF im Laufe der Zeit. Anzahl der untersuchten BDF: 1985-1988: 80, 1988-1990: 80, 1990-1994: 80, 1994-1997: 79, 1997-2000: 67, 2000-2006: 50, 2006-2015: 57, 2015-2018: 64.....	69

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1:	Übersicht über die Untersuchungsschwerpunkte und Wiederholungsintervalle im BDF-Programm von 1985 bis 2018	18
Tab. 2:	Repräsentativität der Standorteigenschaften, Klimaelemente und angebaute Kulturen der BDF im Vergleich zu den Acker- und Grünlandflächen in Bayern (InVeKoS, Auswertungsjahr 2018), beschreibende Überprüfung der Repräsentativität und statistisches Verfahren mit Hilfe des Chi ² Tests	19
Tab. 3:	Anteile und Entwicklung der Kulturarten im Acker für BDF und bayernweit..	25
Tab. 4:	Anzahl der BDF mit statistisch belegbarer Zu- und Abnahme der Bewirtschaftungsparameter im Beobachtungszeitraum 1985-2018; (als Indikator wurde die Signifikanz der logistischen Regression mit der Zeit herangezogen, Signifikanzniveau=0,05)	27
Tab. 5:	Anzahl der auf den BDF vorkommenden Bodenarten des Ober- und Unterbodens und ihrer Hauptgruppen gruppiert nach Art der Nutzung	32
Tab. 6:	Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle und im Unterboden von 25 Acker-BDF im Zeitraum 1995-2017 als Anzahl BDF und Anteil an den untersuchten BDF (%).....	35
Tab. 7:	Übersicht über die verwendeten Parameter, deren Kurz-Bezeichnung und Beschreibung der Parameter.....	37
Tab. 8:	Median und 90 % der Werte (5-95%-Perzentil) der Gesamtgehalte in BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen (gesamter Beobachtungszeitraum - die in BBodSchV geregelten Elemente sind blau markiert).	41
Tab. 9:	Anzahl BDF mit Vorsorgewert(VW)-Überschreitungen im Oberboden (für Quecksilber noch vor Inkrafttreten der neuen Bundesbodenschutzverordnung zum 01. August 2023) differenziert nach Hauptbodenarten und Nutzungen.....	41
Tab. 10:	Anzahl BDF mit Gehaltsabnahmen (Gehaltsabnahmen sind grün gekennzeichnet!) und Gehaltszunahmen (gesamt je Nutzung und BDF mit Bestimmtheitsmaß R ² >0.3).	45
Tab. 11:	Entwicklung der Gesamtgehalte (Median) in BDF-Oberböden in mg kg ⁻¹ a ⁻¹ und % des Initialwertes nach 30 Jahren mit Angabe der Signifikanz des Trends (Gehaltsabnahmen sind grün gekennzeichnet!).	45
Tab. 12:	Schwermetallfrachten (Medianwerte 11 ausgewählter Elemente) bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweinegülle in g ha ⁻¹ a ⁻¹	47
Tab. 13:	Futtermittelverordnung (FuttMV) - Regelungen für Kupfer 1986 bis 2018 für Schweine und Rinder [alle Angaben in mg kg ⁻¹ bei 88 % TM].	49
Tab. 14:	Schätzskala der Aufnahmemethode von Braun-Blanquet (1964), hier für Vegetationsaufnahmen in Acker- und Sonderkulturflächen angewandt.....	68
Tab. 15:	Über Jahrzehnte zunehmende und abnehmende Pflanzenarten auf BDF-Ackerflächen (Details im Text).....	71

Vorwort

Der Band 6 „Kurzfassung und Fazit“ der LfL-Schriftenreihe „35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern“ fasst die Ergebnisse der Bände 1 bis 5, die sich jeweils einem Fachbereich widmen, in einer Ausgabe zusammen. Mit diesem Band geben wir einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse aus der umfangreichen Auswertung nach 35jähriger Laufzeit der Boden-Dauerbeobachtung in Bayern. Die Ergebnisse umfassen den Beobachtungszeitraum von 1985 bis 2018 und werden im Letzten Kapitel „Fazit und Ausblick“ themenübergreifend ausführlich diskutiert.

Details zur Methodik können jeweils in den einzelnen Bänden nachgelesen werden. Sie sind kostenlos als PDF-Dateien auf der Homepage der LfL unter folgenden Links zu finden:

LfL Schriftenreihe „35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern“



Band 1: Methoden, Standorte, Bewirtschaftung

<https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/306341/index.php>



Band 2: Bodenphysik

<https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/332178/index.php>



Band 3: Bodenschadstoffe

<https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/337020/index.php>



Band 4: Humus

<https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/303116/index.php>



Band 5: Regenwürmer

<https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/313579/index.php>

Zusammenfassung

Die Bodendauerbeobachtung in Bayern hat das Ziel, den Zustand der Böden landesweit zu erfassen, langfristige Veränderungen zu erkennen und deren Ursachen zu beschreiben. Gesetzlich ist der Auftrag zum Monitoring in der Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung von 1985 verankert. Vergleichbare Bodenmonitoring-Programme werden nicht nur in den deutschen Bundesländern, sondern auch in Nachbarländern, wie der Schweiz oder Österreich durchgeführt. Es werden in Bayern sowohl Waldstandorte, Sonderstandorte und landwirtschaftliche Standorte durch LWF, LfU und LfL untersucht. Die LfL betreut in Bayern das Monitoring der landwirtschaftlich genutzten Flächen, die Ackerland, Grünland und einige Sonderkulturen beinhalten. Nach fast vier Jahrzehnten wurden die Daten aus 35 Jahren Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern ausgewertet und in dieser Kurzfassung zusammengefasst.

Die Kurzfassung umfasst Kapitel der einzelnen Untersuchungsschwerpunkte und schließt mit einem Fazit, Empfehlungen und einem Ausblick auf die zukünftige Bedeutung des BDF-Programms ab. Die Schwerpunkte umfassen die Untersuchung der Repräsentanz von Standort-, Klima- und Bewirtschaftungsparametern von 117 BDF im Vergleich zu den Acker- und Grünlandflächen in ganz Bayern, sowie Ergebnisse der Untersuchung von Unterbodenverdichtung, Bodenschadstoffen, Humus, Regenwürmern und der Vegetation.

Für die vorliegende Auswertung wurden Daten von 80 Ackerflächen, 18 Grünlandflächen, 12 Flächen mit Nutzungsänderung und 7 Sonderkulturflächen (3 Hopfen, 3 Wein, 1 Obst) berücksichtigt. Die Daten umfassen sowohl die wichtigsten jährlichen Bewirtschaftungsdaten zu Düngung, Bodenbearbeitung und angebauten Kulturen, als auch Messwerte zu den genannten Untersuchungsschwerpunkten, die aus regelmäßigen Probenahmen auf den BDF stammen. Die Abstände zwischen den einzelnen Probenahmen betragen immer mehrere Jahre, variierten aber je nach Parameter. Für Humuskennwerte liegen Ergebnisse aus sechs Probenahmeserien vor, für Bodenschadstoffe beispielsweise aus bis zu vier. Jede BDF hat eine Größe von 1000 m² und ist im Gelände nicht sichtbar, sondern nur mittels GPS-Koordinaten zu lokalisieren. Die Bewirtschaftung erfolgte während der gesamten Zeit durch den Landwirt betriebsüblich und ohne Einflussnahme auf den Bewirtschafter.

Bei der Datenauswertung wurden für die untersuchten Bodenparameter in der Regel Trendanalysen zur linearen Entwicklung im Untersuchungszeitraum, sowie Korrelationsanalysen mit Bewirtschaftungs- und Standortdaten durchgeführt. Bei der Untersuchung der Standort-Repräsentanz wurde neben einer beschreibenden Herangehensweise zusätzlich ein Test auf Unterschiede der Verteilungen mit Hilfe des Chi²-Tests durchgeführt.

Die Auswertungen zeigen bei den Ackerflächen eine gute Repräsentanz der Standort- und Klimaparameter mit den bayernweiten Ackerflächen. Auch bei den angebauten Kulturen spiegelten die Acker-BDF die bayernweiten Verhältnisse wider. Die Grünland-BDF repräsentieren wegen ihrem Schwerpunkt im Alpenvorland dagegen kühlere und feuchtere Verhältnisse als im bayernweiten Mittel.

Die wichtigsten beobachteten Veränderungen bei der Flächenbewirtschaftung betrafen den Rückgang der Pflughäufigkeit von jährlich 80 % der Acker-BDF auf 60 %. Die organische Düngung nahm von 40 % der BDF auf jährlich 60 % zu, was auf die vermehrte Verfügbarkeit von Biogasgärresten zurückzuführen ist. Bei den Klimaparametern stieg die Jahresdurchschnittstemperatur bei den Acker-BDF im Beobachtungszeitraum um ca. 1,5 °C, während die Niederschläge dort um 109 mm und bei den Grünland-BDF im Schnitt um 136 mm abnahmen. Die Temperaturzunahme fiel bei den Grünland-BDF mit +1,3°C etwas geringer aus.

Die Schadstoffgehalte im Boden sind in der Regel gering (unterhalb oder im Bereich der Vorsorgewerte der Bundes-Bodenschutz-Verordnung oder im Bereich typischer Hintergrundwerte). Über die Luft, durch Düngung (Mineral- und Wirtschaftsdünger) sowie über Pflanzenschutzmittel können Schadstoffe in den Boden eingetragen, durch Beerntung und Beweidung und mit dem Sickerwasser aber auch wieder aus dem Boden ausgetragen werden. Die Bodengehalte haben sich meist nicht stark verändert oder sind zurückgegangen. Nur bei Kupfer (wegen der fungiziden Wirkung als Pflanzenschutzmittel bei Sonderkulturen eingesetzt) zeigte sich trotz abnehmender Ausbringungsmengen im Beobachtungszeitraum eine deutliche Anreicherung im Oberboden bei Hopfen und zum Teil bei Wein. Eine Zunahme der Kupfergehalte im Oberboden durch organische Düngung mit Schweinegülle konnte bei ausgewählten BDF ebenfalls nachgewiesen werden.

Untersuchungen der Unterbodenverdichtung zeigten bei allen untersuchten Ackerflächen eine deutlich verringerte Luftkapazität in der Pflugsohle mit Werten nahe der kritischen Grenze von 5 % in fast der Hälfte der Fälle, wobei allerdings keine generelle Verschlechterung im Laufe des Beobachtungszeitraums festgestellt werden konnte.

Bei den Humuskennwerten konnte für Ackerböden im Mittel eine geringe Abnahme der Humusgehalte festgestellt werden, wohingegen im Grünland keine Veränderungen beobachtet wurden. Hinsichtlich der C/N-Verhältnisse wurde im Laufe der 35 Jahre eine deutliche Abnahme für alle Standorte beobachtet.

Bei den Untersuchungen zur Bodenfauna war für Ackerflächen seit 1985 ein positiver Trend in der Regenwurm-Diversität und in der Abundanz der tiefgrabenden Zeigerart *Lumbricus terrestris* feststellbar. Als ein wesentlicher Einflussfaktor für die positive Entwicklung wurde der Rückgang der Pflughäufigkeit identifiziert.

Die Untersuchung der Ackerwildkräuter zeigte eine Abnahme der Artenzahlen vor allem bei kleinwüchsigen Arten (Acker-Stiefmütterchen, Vogelmiere, Acker-Vergißmeinnicht). Bei den ‚Gewinnern‘ fallen der Acker-Fuchsschwanz, ein Leitunkraut im Getreide, und die Hühnerhirse auf, die als wärmebedürftige Art möglicherweise vom Klimawandel profitiert.

Es konnten in den 35 Beobachtungsjahren Verbesserungen aufgrund von angepassten gesetzlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen festgestellt werden (Blei-Verbot im Benzin, Bundes-Immissionsschutzgesetz, Pflanzenschutzgesetz, ...). Andererseits sind die Auswirkungen sich deutlich ändernder Klimabedingungen bereits bei Humus und Regenwürmern erkennbar. Ein Fortsetzen des Bodenmonitorings wird daher auch in Zukunft von hoher Bedeutung sein, um die Auswirkungen dieser Prozesse auf den Boden wissenschaftlich bewerten zu können. Aktuelle Gesetzgebungsvorhaben der EU (Soil Monitoring Law) stärken zusätzlich die Bedeutung des Bodenmonitorings.

Abstract

Soil monitoring in Bavaria aims to assess soil conditions to identify long-term changes and their underlying causes. Legally the mandate for this monitoring is anchored in the Soil Protection Convention of the Federal Government of Germany from 1985. Comparable soil monitoring programs are carried out also in neighboring countries such as Switzerland and Austria. In Bavaria forest sites, sites with specific conditions and agricultural sites are investigated by the Bavarian State Institute of Forestry (LWF), the Bavarian State Institute for Environment (LfU) and the Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL). The LfL is in charge of the monitoring of agricultural land in Bavaria, which includes arable land, grassland and some speciality crops. After almost four decades the data from 35 years of continuous soil monitoring of agricultural land in Bavaria has been evaluated and summarized in this publication.

This summary includes chapters on main research subjects as well as a conclusion, recommendations and an outlook on the future importance of the Bavarian Soil Monitoring Program. The main research subjects include the investigation of the representativeness of site, climate and management parameters of the 117 monitoring sites in comparison to arable and grassland areas throughout Bavaria, as well as results on subsoil compaction, soil pollutants, soil organic matter, earthworms and vegetation.

For the present evaluation, data from 80 arable fields, 18 grassland sites, 12 areas with change in land use over time (mainly change from arable to grassland and reverse) and 7 sites with special crops (3 hop fields, 3 wine yards, 1 apple plantation) were analyzed. The explored data included both the most important annual management data on fertilization, soil tillage and cultivated crops, as well as measured values of the above-mentioned research subjects, which were obtained from continuous soil sampling campaigns on the monitoring sites.

The intervals between the individual sampling dates lasted in every case several years, but varied in duration depending on the parameter. For soil organic matter parameter results were available from six sampling series with five year intervals. Soil pollutants were surveyed four times within 35 years with a time interval of approximately 10 years. Each monitoring parcel has a size of 1000 m² and is not visibly marked in the field. The exact location can only be determined using GPS coordinates. During the entire period, the cultivation of the monitoring sites was carried out by farmers in their business typical way and without any influence due to the monitoring program.

Trend analysis for linear development over time has been used as statistical method for data evaluation, as well as correlation analysis of the parameters opposed to management and site data. In case of the investigation of site representativeness a test for differences was performed using the Chi² test in addition to a descriptive approach.

The evaluation showed a good representation of site factors (topographical, geological) and climate parameters (precipitation, temperature) for the conditions and trends on Bavarian-wide arable land. A good comparability could be testified also for cultivated crops, where the monitoring sites on arable land well reflected the Bavarian wide conditions. In contrast, the grassland sites represented cooler and more humid conditions than the Bavarian-wide average for this landuse, because of an overrepresentation in the foothills of the Alps.

The most important changes in land management involved a decrease in ploughing frequency from 80 % of arable monitoring fields ploughed annually to 60 %. Organic fertilization increased from 40 % to 60 % annually over all monitoring sites, due to the increased availability of biogas digestate. In terms of climate parameters, the average annual temperature increased by about 1,5 °C during the observation period, while precipitation in

average decreased by 109 mm in case of arable monitoring sites and by 136 mm on the grassland sites.

The pollutant contents in the soil are generally low (below or in the range of the precautionary values specified in the Federal Soil Protection Ordinance or in the range of typical background values, extremely low findings of pesticide residues). Pollutants can enter the soil through the air, fertilization (mineral and organic fertilizers) and through pesticides, but can also be removed from the soil through harvesting and grazing and with leak water. But the soil contents have mostly not changed much or have even decreased. Only copper (used as a pesticide for special crops due to its fungicidal effect) showed a significant accumulation in the topsoil of hop fields and partly in vine yards during the observation period, despite decreasing application rates. An increase in the copper content in the upper soil by organic fertilization with pig manure could also be detected in selected BDFs.

Investigations of subsoil compaction showed a significantly lower air capacity at the bottom of the plowed soil horizon of 25 investigated arable fields with values close to the critical limit of 5 % in almost half of the sites. But no ongoing deterioration could be detected during the observation period.

For the soil organic matter parameters a slight decrease in humus content was observed on average for arable soils, whereas no changes were observed in grassland. With regard to the C/N ratios, a clear decrease was observed for all sites over the 35 years.

Since 1985 there has been a positive trend in earthworm diversity and in the abundance of the deep-burrowing species *Lumbricus terrestris* in arable fields. The decline in ploughing frequency was identified as a key influencing factor for the positive development.

The survey of weeds on arable land showed a decrease in species numbers, especially for small growing species (*Viola arvensis*, *Stellaria media*, *Myosotis arvensis*). Within the 'winner' species there are dominant species such as *Alopecurus myosuroides* and *Echinochloa crus-galli*, which may be fostered by climate change.

In the 35 years of observation, improvements in soil protection could be achieved due to adapted legal and social framework conditions (ban on lead in gasoline, Federal Immission Control Act, Plant Protection Act, ...). On the other hand, effects of significantly changing climatic conditions are already becoming apparent in soil organic matter parameters and earthworm data. A continuation of soil monitoring will therefore be of high importance in the future in order to scientifically evaluate the effects of these processes on the soil. Current legislative projects of the EU (Soil Monitoring Law) additionally strengthen the importance of soil monitoring within Europe.

1 Überblick und Repräsentativität für Bayern

1.1 Standortwahl und Beprobungsumfang

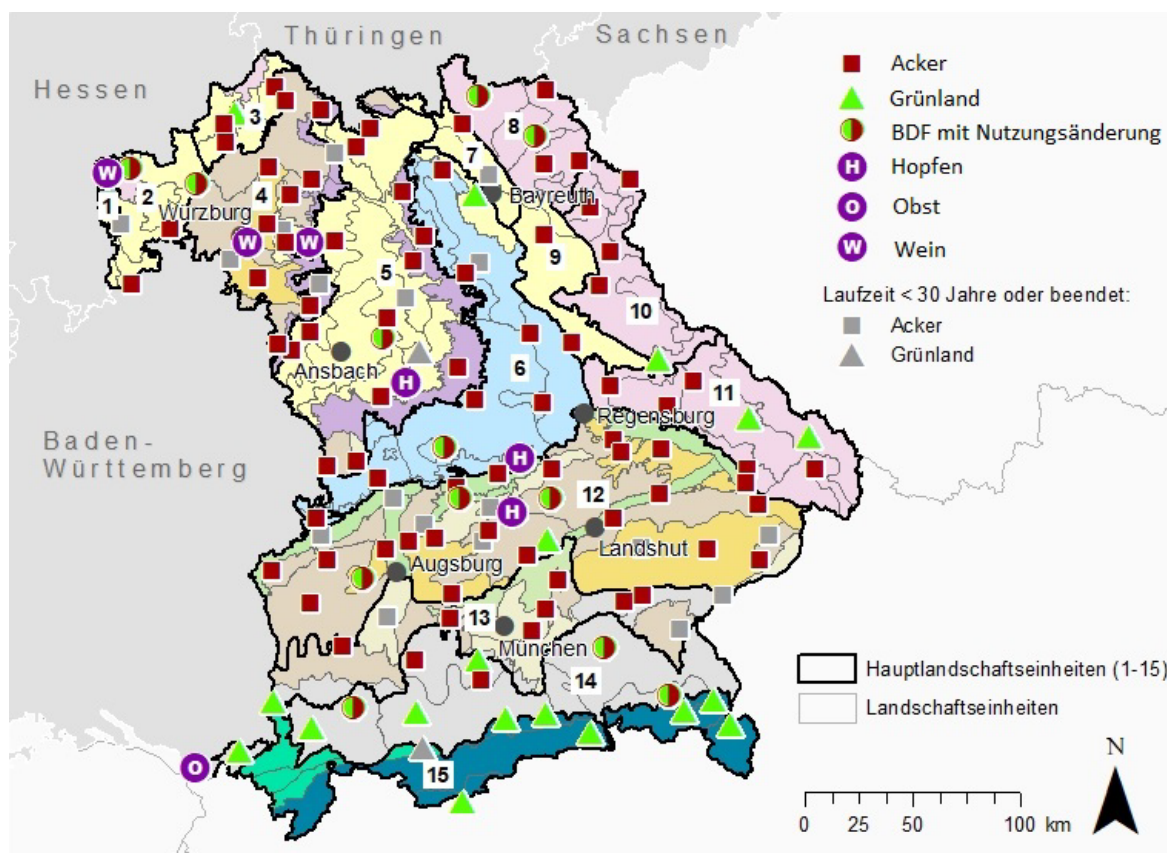


Abb. 1: Übersicht über die BDF-Standorte und deren Lage in den Landschaftseinheiten nach Wittmann, 1991 (Stand 2018); Geobasisdaten: NUTS 2013

Mitte der 1980er Jahre wurden ca. 130 landwirtschaftliche Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern eingerichtet, mit dem Ziel, den Zustand der Böden langfristig zu dokumentieren und Veränderungen ihrer Funktionsfähigkeit aufgrund von stofflichen Einträgen oder Nutzung der Böden zu erkennen. Damals waren es unter anderem Meldungen über das „Waldsterben“ durch sauren Regen oder die Schwermetallbelastung der Umwelt durch Abgase aus verbleitem Benzin, welche das Bewusstsein für schädliche Folgen einer immer stärker industrialisierten Gesellschaft auf die Bodenfruchtbarkeit schärften. In der Landwirtschaft wurde der zunehmende Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und deren Rückstände im Boden als problematisch wahrgenommen. Im Jahr 1985 wurde daher die Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung verabschiedet, in der „eine ausreichende Erfassung der vorhandenen Belastungen des Bodens einschließlich der zugehörigen Ökosysteme, die Beobachtung ihrer Veränderungen, sowie die Dokumentation der jeweiligen Zustände in bestimmten Zeitabschnitten“ gefordert wurde (Deutscher Bundestag, 1985). Noch im gleichen Jahr wurde in Bayern mit der Einrichtung der ersten Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) auf landwirtschaftlichen Flächen begonnen. In regelmäßigen, mehrjährigen Abständen werden seitdem durch die LfL auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen Bodenproben entnommen, die Bodenfauna erfasst, Vegetationsaufnahmen durchgeführt und die Bewirtschaftung der Flächen dokumentiert. Zusätzlich werden die in den BDF-Betrieben anfallenden Wirtschaftsdünger regelmäßig beprobt und auf Nährstoffe sowie anorganische

Schadstoffe untersucht. In den gewonnenen Boden-Proben werden unter anderem die Humusgehalte, die Gehalte an Nährstoffen und Spurenelementen und anorganischen und organischen Schadstoffen bestimmt, die Entwicklung des Regenwurmbestandes als Indikator für die biologische Aktivität des Bodens erfasst und Veränderungen in der Vegetationszusammensetzung untersucht (vergl. Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht über die Untersuchungsschwerpunkte und Wiederholungsintervalle im BDF-Programm von 1985 bis 2018

	1985-88	89	90	91	92	93	96	97	98	99	05	06	07	12	15	16	18
Humus																	
Corg, C/N, Ccarbonat, pH	Ersterhebung			Wdh. 2					Wdh. 3			Wdh. 4		Wdh. 5		Wdh. 6	
Anorganische Stoffe im Boden																	
Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe	Ersterhebung							Wdh. 2				Wdh. 3				Wdh. 4	
Organische Stoffe im Boden																	
CKW	Ersterhebung													Wdh. 2		Wdh. 3	
Sonstige Pflanzenschutzmittel	Ersterhebung																
PCB	Ersterhebung																
PAK								Ersterhebung						Wdh. 2		Wdh. 3	
Bodenphysik																	
Textur	Ersterhebung								Wdh. 2			Wdh. 3				Wdh. 4	
Bodenphysikalische Parameter																	Im gesamten Zeitraum in mehreren Wiederholungen
Bodenprofile																	Bei Ersteinrichtung jeder BDF
Wirtschaftsdünger																	
Haupt- und Spurenstoffe und anorg. Schadstoffe		Ersterhebung				Wdh. 2				Wdh. 3		Wdh. 4		Wdh. 5		Wdh. 6	
Immissionen Luft																	
Haupt- und Spurenstoffe und anorg. Schadstoffe		Von 1985 bis 1996 in monatlichen bis jährlichen Intervallen															
Regenwürmer																	
Biomasse, Artenzusammensetzung, Abundanz																	Im gesamten Zeitraum in bis zu 4 Wiederholungen
Vegetation																	
Vegetationsaufnahmen																	Im gesamten Zeitraum in bis zu 10 Wiederholungen

Aktuell rücken die Folgen des Klimawandels in den Fokus der Bodendauerbeobachtung. Es sind nicht nur deren Auswirkungen wie längere Trockenperioden, steigende Temperaturen oder häufigere Starkregenereignisse, sondern auch gesellschaftliche Erwartungen, die neue Herausforderungen für die Landwirtschaft der Zukunft darstellen. Der Boden als größter terrestrischer Kohlenstoff-Speicher hat das Potenzial, ein wichtiger Baustein bei der Umsetzung von mehr Klimaschutz in der Landwirtschaft zu werden (LfL, 2017).

1.2 Repräsentativität

Um die Repräsentativität der BDF-Standorte und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die bayerischen Landwirtschaftsflächen zu überprüfen, wurden die wichtigsten Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsparameter der BDF und der bayernweiten Landwirtschaftsfläche (LF) getrennt nach Acker und Grünland miteinander verglichen. Im BDF-Programm wurden 80 Acker-BDF in die Auswertung einbezogen, die während des gesamten Beobachtungszeitraums von 1985 bis 2018 durchgehend als Acker genutzt wurden. Zu den ausgewerteten Grünland-BDF gehören 18 Standorte, die während des gesamten Beobachtungszeitraums durchgehend als Dauergrünland bewirtschaftet wurden. Anders genutzte BDF (Wein, Hopfen, Obst oder Flächen mit Nutzungsänderung oder vorzeitig beendete BDF) wurden aufgrund der geringen Anzahl und der Tatsache, dass sie keiner eindeutigen Nutzung zuzuordnen sind, nicht auf Repräsentativität überprüft. Als Grundlage für die Auswertung der bayernweiten LF dienten InVeKoS-Schlagdaten aus dem Jahr 2018 mit Angabe zum Acker- (AL, AL/GL) und Grünlandstatus (DG).

Die Betrachtungen der Standorteigenschaften der bayerischen Acker- und Grünland-BDF im Vergleich zu den gesamt-bayerischen Verhältnissen, sowie der Ausprägung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf den BDF im Vergleich mit der landesweit typischen Praxis, konnten sowohl Abweichungen der Stichprobe von der Grundgesamtheit aufdecken als auch Übereinstimmungen bestätigen. Insbesondere bei der schleichenden Verringerung der Anzahl der BDF ist eine solche Überprüfung immer wieder notwendig und kann aufzeigen, wo besondere Defizite entstehen. Untersucht wurden die Standorteigenschaften, Klimaelemente und die angebauten Kulturen (bzw. Grünlandnutzung), die in Tab. 2 dargestellt sind.

Tab. 2: *Repräsentativität der Standorteigenschaften, Klimaelemente und angebaute Kulturen der BDF im Vergleich zu den Acker- und Grünlandflächen in Bayern (InVeKoS, Auswertungsjahr 2018), beschreibende Überprüfung der Repräsentativität und statistisches Verfahren mit Hilfe des χ^2 Tests*

	Acker	Grünland
Landschaftsgliederung		
Landschaftseinheiten nach Wittmann, 1991	+ (0)	- (0)
Standortparameter		
Geologische Übersicht Bayerns (LfU, 2020a,b)	+ (0)	- (0)
Bodentypen nach ÜBK 25 (LfU, 2020c)	- (-)	- (-)
Bodenart nach Bodenschätzung (LfSt, 2009)	+ (0)	+ (0)
Bodenwertzahlen (LfSt, 2009)	+ (0)	- (0)
Klima		
Hangneigung und Exposition	+ (0)	- (-)
Höhe m über NN	+ (0)	- (0)
Temperatur und Niederschlag	+ (0)	- (-)
Legende		
Beschreibende Überprüfung anhand von Diagrammen	+	gute Repräsentativität
	-	Abweichungen festgestellt
Chi2-Test als statistisches Verfahren zum Nachweis von Unterschieden	(0)	Unterschied nicht nachweisbar
	(-)	Unterschied nachgewiesen

Acker

Bei den Ackerflächen zeigte sich, dass die Verteilung der BDF auf die Boden- und Standorteigenschaften wie auch auf die regionalen Klimate in Bayern als repräsentativ erachtet werden kann (vergl. Abb. 2, Abb. 3, Abb. 5, Abb. 7). Eine Abweichung von der bayernweiten Verteilung war mit Ausnahme des Bodentyps für keinen Parameter festzustellen. Beim Bodentyp zeigte sich eine leichte Überrepräsentanz von Pseudogleyen und Parabraunerden, während Gleye und Pararendzinen bei der Bodendauerbeobachtung eher unterrepräsentiert waren. Da die Auswertungen bei den Acker-BDF sich im Wesentlichen auf den Oberboden bzw. Ap-Horizont beziehen und die Übergänge zwischen den entsprechenden Bodentypen auf einem Feldstück ein Kontinuum darstellen, ist die geringfügige Verzerrung im Vergleich zur bayerischen Grundgesamtheit allerdings vertretbar. Auch werden alle ackerbaulich relevanten Standorteigenschaften gut abgedeckt.

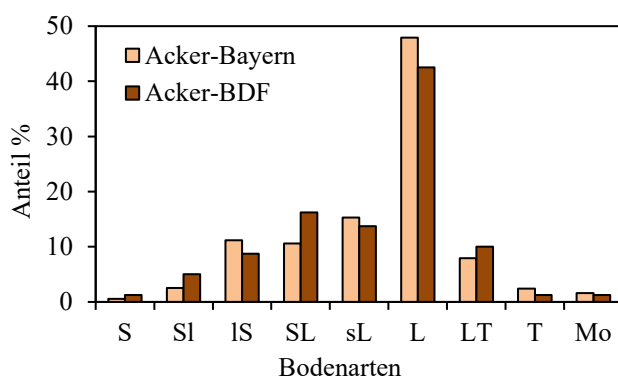


Abb. 2: Verteilung der Acker-Standorte aus dem BDF-Programm und der gesamten Ackerfläche in Bayern nach Bodenarten der Bodenschätzung (LfSt, 2009; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

Ebenso konnte für die Bewirtschaftung der Acker-BDF eine gute Übereinstimmung bei den im 34jährigen Beobachtungszeitraum angebaute Kulturen mit den bayerischen Verhältnissen aufgezeigt werden. Abgesehen davon, dass vergleichbare Zeitreihen von Bodenuntersuchungen ohnehin nur für die BDF vorliegen, sind die für die Acker-Stichprobe festgestellten Entwicklungen auch auf die bayerische Ackerfläche in ihrer Gesamtheit übertragbar.

Grünland

Bei den Grünlandflächen ist die Verteilung der BDF durch eine Ballung in Südbayern und hier besonders im Voralpenraum geprägt. Dies entspricht zwar auch der tatsächlichen Verteilung des Grünlandes in Bayern, dennoch sind andere Regionen, insbesondere auch stärker ackerbaulich geprägte wie z.B. das Tertiärhügelland, unterrepräsentiert.

Für die Verteilung hinsichtlich klimatischer Faktoren, wie Höhenstufe, Jahresniederschlag und Jahresdurchschnittstemperatur, konnte nachgewiesen werden, dass die Stichprobe der Grünland-BDF von der bayerischen Grundgesamtheit abweicht. Die BDF repräsentieren gegenüber Gesamtbayern somit ein kühleres und niederschlagsreicheres Grünland (vergl. Abb. 4, Abb. 6 und Abb. 8). Für viele andere Parameter sind die Abweichungen deutlich zu erkennen, jedoch ist der Nachweis bei einer großen Anzahl von Klassen und der deutlich niedrigeren Stichprobe nicht immer möglich. Eine Abweichung bei der Verteilung auf die Bodentypen zeigte sich in ähnlicher Form wie bei den Acker-BDF: mehr Parabraunerden und Pseudogleye, weniger Gleye und Braunerden bei den BDF im Vergleich zu Bayern. Gerade angesichts der Tatsache, dass Grünland stärker als Ackerflächen besonders an den klimatisch und bodenkundlich benachteiligten Standorten auftritt, also auf Flächen wo es zu kühl, zu nass, zu steinig oder zu trocken für den Ackerbau ist, kann auch die notwendige Abdeckung landwirtschaftlich relevanter Flächenanteile bei der Stichprobenzahl von 18 BDF diskutiert werden.

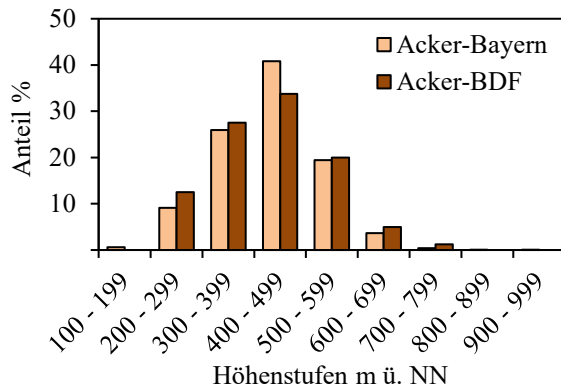


Abb. 3: Verteilung der Ackerflächen und Acker-BDF in Bayern nach Höhenstufen (BVV, 2012; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

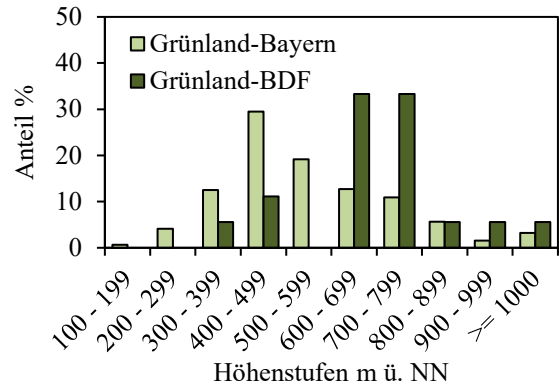


Abb. 4: Verteilung der Grünlandflächen und Grünland-BDF in Bayern nach Höhenstufen (BVV, 2012; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

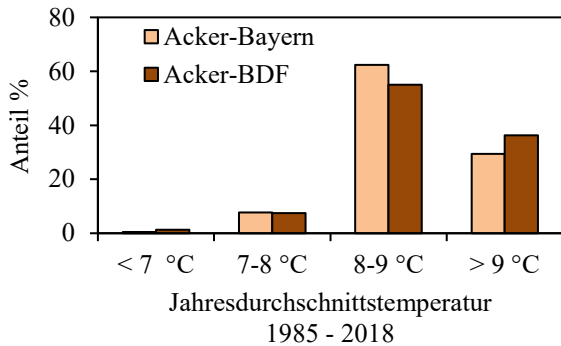


Abb. 5: Verteilung der Ackerflächen und Acker-BDF in Bayern nach langjährig gemittelter Jahresdurchschnittstemperatur (1985-2018), (DWD, 2020a; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

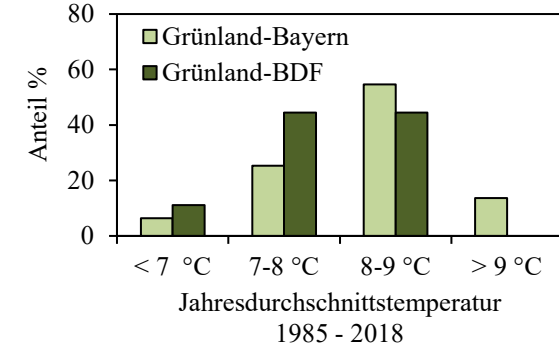


Abb. 6: Verteilung der Grünlandflächen und Grünland-BDF in Bayern nach langjährig gemittelter Jahresdurchschnittstemperatur (1985-2018), (DWD, 2020a; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

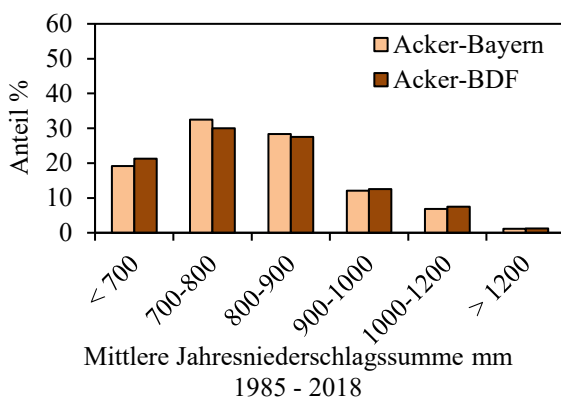


Abb. 7: Verteilung der Ackerflächen und Acker-BDF in Bayern nach langjährig gemittelten Niederschlagssummen (mm) (1985-2018); (DWD, 2020b; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

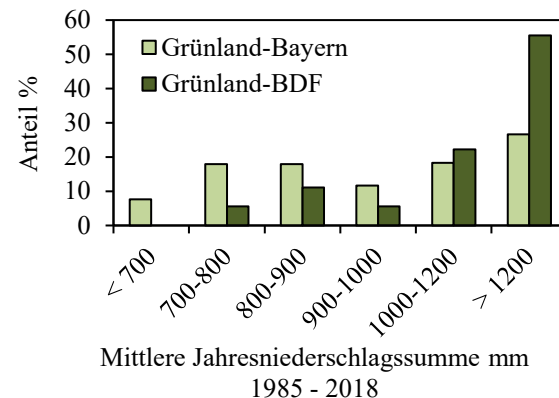


Abb. 8: Verteilung der Grünlandflächen und Grünland-BDF in Bayern nach langjährig gemittelten Niederschlagssummen (mm) (1985-2018); (DWD, 2020b; InVeKoS Auswertungsjahr 2018)

Beispielsweise machen Auen- und Moorböden etwa 8 % der Grünlandfläche in Bayern aus, sind allerdings mit keiner der 18 ausgewerteten BDF vertreten. Für die quantitative Abschätzung der Veränderung der Humusgehalte wären jedoch gerade diese humosen Böden von großer Bedeutung.

Auch die Nutzungstypen (Wiese, Mähweide, Weide, Almen) im BDF-Grünland sind entsprechend ihrer Lage in Bayern nur für den Voralpenraum repräsentativ. Während bayernweit die Wiesennutzung flächenmäßig am stärksten verbreitet ist, kommen in den Landschaftseinheiten 14 und 15 überwiegend Mähweiden, am zweithäufigsten Wiesen, gefolgt von Weiden in einem mit den Grünland-BDF vergleichbaren Verhältnis vor.

Die Stichprobe des Grünlandes ist im strengen Sinne nicht repräsentativ für Bayern, auch werden einige wichtige Standorttypen nicht abgedeckt. Effekte, die für die Stichprobe der Grünland-BDF festgestellt werden, können daher nur mit Einschränkungen auf das Grünland Bayerns übertragen werden. Angesichts der Tatsache, dass keine vergleichbaren Zahlen für Bayern vorliegen, soll das jedoch nicht die Bedeutung dieser Stichprobe in Frage stellen, sondern einen Anstoß zur Nachjustierung und Optimierung der Flächenausstattung liefern.

1.3 Entwicklungen während des Beobachtungszeitraums 1985-2018

1.3.1 Temperatur und Niederschlag (Acker und Grünland)

Im Zeitraum von 1985 bis 2018 nahm die Jahresdurchschnittstemperatur auf allen Acker-BDF im Mittel um $0,047\text{ °C a}^{-1}$ zu. Dies entspricht einer Erwärmung von etwa $1,6\text{ °C}$ im gesamten Beobachtungszeitraum und ist identisch mit dem bayernweit für Ackerflächen beobachteten Trend (Abb. 9, Abb. 11).

Die Spannweite der abgeschätzten Erwärmung lag bei Betrachtung der einzelnen BDF zwischen $0,027$ und $0,076\text{ °C a}^{-1}$. Die höchste Zunahme war hierbei ein Ausreißer auf der BDF 46, die übrigen Zunahmen lagen alle unterhalb von $0,06\text{ °C a}^{-1}$. Die Entwicklungen sind vorwiegend vom überregionalen Temperatur-Trend der Einzeljahre bestimmt. Dennoch ergeben sich rein rechnerisch für die Änderung der Temperatur auf den Acker-BDF im Beobachtungszeitraum Unterschiede zwischen den Standorten von bis zu $1,1\text{ °C}$ (ohne BDF 46). Acker-BDF mit eher geringen Temperaturanstiegen befanden sich vorwiegend in Schwaben. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionen lag zwischen $0,15$ und $0,58$. Es nahm mit der Höhe der abgeschätzten jährlichen Änderung zu.

Bei den Niederschlägen wurde auf allen Acker-BDF eine negative Entwicklung von durchschnittlich $-3,2\text{ mm a}^{-1}$ festgestellt (Abb. 10, Abb. 11). Das Bestimmtheitsmaß der Regressionen der einzelnen BDF lag jedoch auf Grund der regional stark schwankenden Niederschlagsmengen der Einzeljahre mit einer Spannweite von $0,01$ bis $0,27$ deutlich unter den Trends der Jahresdurchschnittstemperaturen.

Die Spannweite der für die einzelnen Acker-BDF festgestellten Änderungen lag zwischen $-6,3\text{ mm a}^{-1}$ und $-1,1\text{ mm a}^{-1}$. Das Extrem des modellierten, linearen Rückgangs von -217 mm Jahresniederschlag wurde für die BDF 95 im Landkreis Bad Kissingen errechnet. Die geringste Abnahme wurde im Landkreis Wunsiedel auf der BDF 75 bestimmt.

Im Beobachtungszeitraum nahm die Jahresdurchschnittstemperatur auf allen Grünland-BDF im Mittel um $0,039\text{ °C a}^{-1}$ signifikant zu (Abb. 9, Abb. 11), was einer Erwärmung von etwa $1,3\text{ °C}$ im gesamten Beobachtungszeitraum entspricht. Bayernweit betrug die Zunahme $0,043\text{ °C a}^{-1}$. Daraus ergibt sich eine Erwärmung von insgesamt etwa $1,5\text{ °C}$ innerhalb von 34 Jahren.

Die Spannweite der ermittelten jährlichen Änderungen der einzelnen Grünland-BDF lag zwischen 0,023 und 0,057 °C a⁻¹. Daraus ergeben sich Unterschiede für den Beobachtungszeitraum von etwas über 1 °C. Die stärkste Zunahme der Temperatur war auf der BDF 42 im Landkreis Regen, gefolgt von der BDF 96 im Landkreis Bad Kissingen festzustellen. Die geringsten Temperaturzunahmen wurden auf der BDF 17 (Landkreis Garmisch-Partenkirchen) und der BDF 14 (Landkreis Rosenheim) beobachtet.

Im Beobachtungszeitraum nahm der jährliche Niederschlag auf allen Grünland-BDF noch stärker als beim Acker im Mittel um -4,0 mm a⁻¹ signifikant ab (Abb. 10, Abb. 11), was einer Abnahme von 136 mm im gesamten Beobachtungszeitraum entspricht. Bayernweit wird der Trend mit einer Abnahme von 4 mm je Jahr im Grünland bestätigt. Die Grünland-BDF zeigten dabei aufgrund ihres Schwerpunkts in Südbayern im gesamten Beobachtungszeitraum eine um ca. 250 mm höhere jährliche Niederschlagsmenge als im bayernweiten Vergleich.

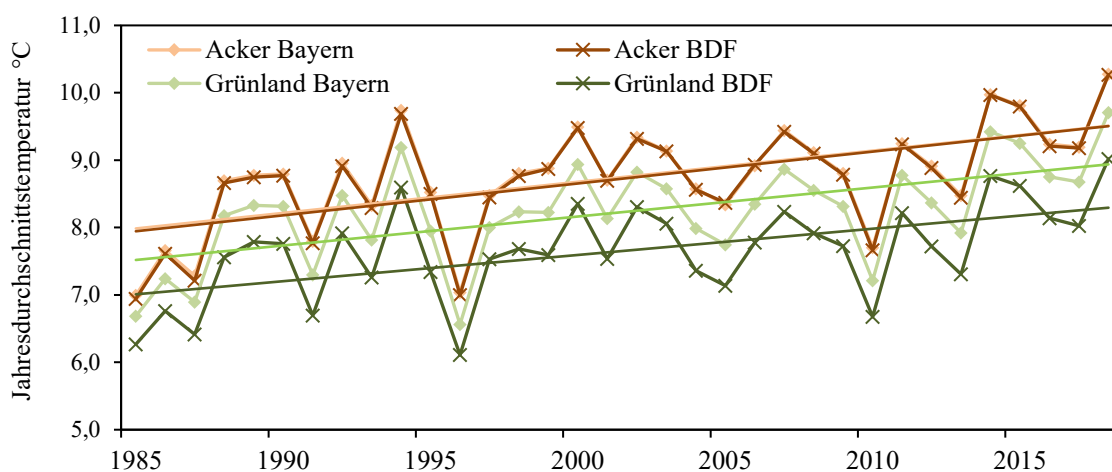


Abb. 9: Temperatur im Beobachtungszeitraum (1985-2018) im bayerischen Mittel und im Mittel für die BDF, unterschieden nach Acker und Grünland (DWD, 2020a); Acker-Bayern: $y=0,046x + 7,9$; $R^2=0,34$; Acker-BDF: $y=0,047x + 7,9$; $R^2=0,35$; Grünland-Bayern: $y=0,043x + 7,5$; $R^2=0,33$; Grünland-BDF: $y=0,039x + 7,0$; $R^2=0,30$.

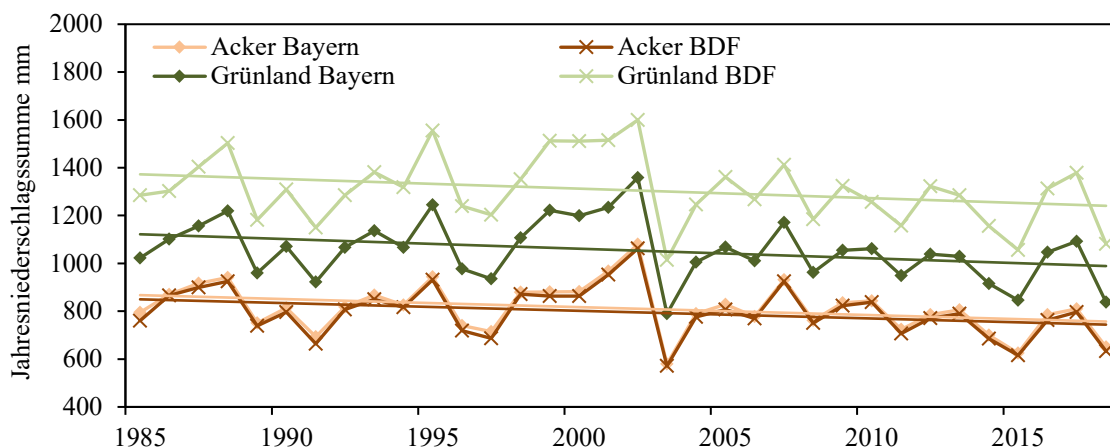


Abb. 10: Jahresniederschlag (mm) im Beobachtungszeitraum im bayerischen Mittel und im Mittel für die einzelnen BDF Standorte, unterschieden nach Acker und Grünland (DWD, 2020b); Acker-Bayern: $y=-3,3x + 871$; $R^2=0,10$; Acker-BDF: $y=-3,2x + 853$; $R^2=0,09$; Grünland-Bayern: $y=-4,0x + 1126$; $R^2=0,10$; Grünland-BDF: $y=-4,0x + 1377$; $R^2=0,08$.

Für die ermittelten Änderungen der Jahresniederschläge ergab sich ein signifikanter Zusammenhang mit den durchschnittlichen Niederschlägen. Auf BDF in Regionen mit höheren Jahresniederschlagssummen war ein stärkerer Rückgang zu beobachten als auf solchen mit geringen Jahresniederschlägen. Besonders deutlich war dies für die BDF mit einer Jahresniederschlagssumme < 1000 mm, während die BDF mit höheren Niederschlägen eine große Streuung aufwiesen. Ein schwächerer Zusammenhang bestand mit der mittleren Jahrestemperatur (tendenziell stärkere Erwärmung auf BDF mit höheren Temperaturen).

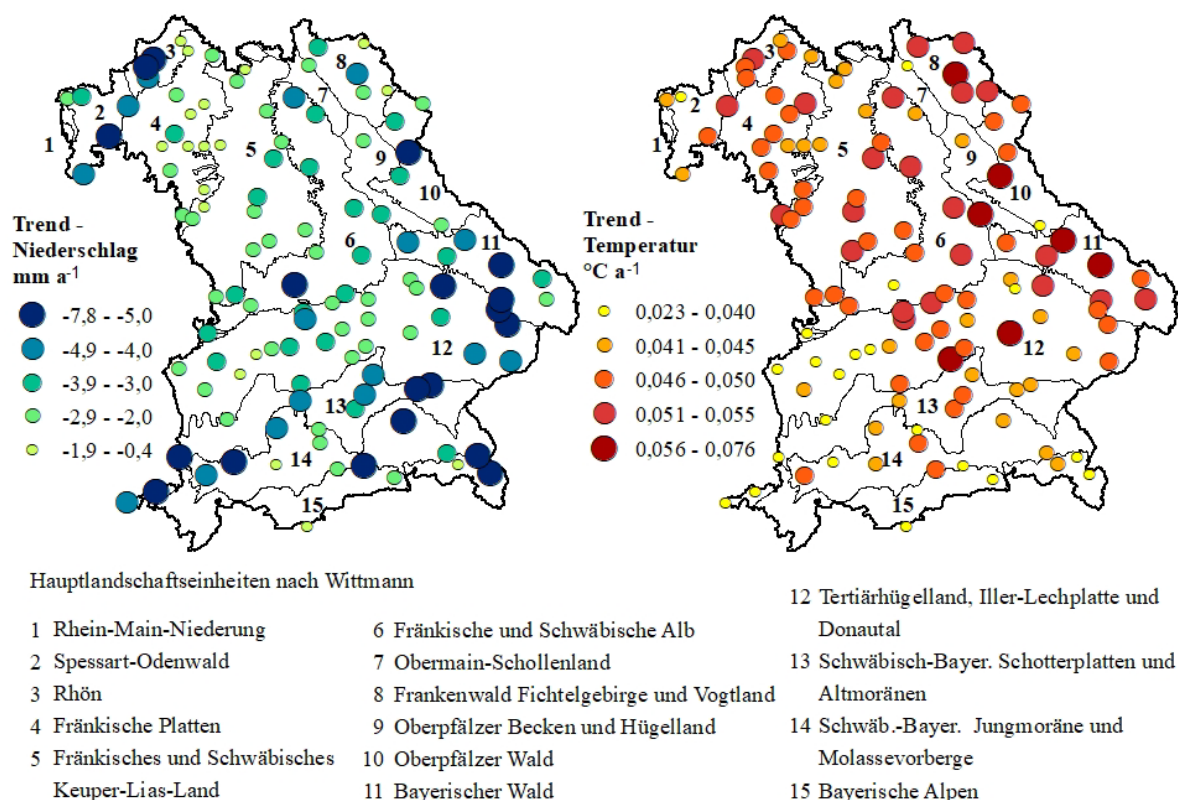


Abb. 11: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur in $^{\circ}\text{C a}^{-1}$ (rechts) und der Jahresniederschläge mm a^{-1} (links) für die BDF und den Zeitraum von 1985 bis 2018; ermittelt aus Rasterdaten des DWD (DWD, 2020a; DWD, 2020b; Geobasisdaten BVV, 2021; Wittmann, 1991).

1.3.2 Angebaute Kulturen (Acker)

In Bayern wurden im Zeitraum von 1985 bis 2018 durchschnittlich auf 55 % der Ackerfläche Getreide angebaut. Für die Acker-BDF traf dies für 59 % der Standorte zu. Reihenkulturen (Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben und sonstige Hackfrüchte) nahmen in Bayern 29 %, bei den BDF 27 % ein. Mais hatte einen um fast 5 Prozentpunkte geringeren Anteil auf den BDF als in ganz Bayern, was auch durch den Unterschied beim Anteil der viehhaltenden Betriebe erklärt werden kann. Allerdings nahm der Maisanbau auf den BDF im Laufe der Jahre stärker zu als bayernweit. Raps und Körnerleguminosen sind in Bayern mit zusammen 7 % geringer vertreten als auf den Acker-BDF mit 10 % im langjährigen Mittel. Klee gras und Stilllegungen dagegen nehmen in Bayern mit 10 % eine größere Fläche ein als bei BDF mit nur gut 4 % der Ackerstandorte.

Tab. 3: Anteile und Entwicklung der Kulturarten im Acker für BDF und bayernweit

		BDF		Bayern	
Kulturarten-Gruppe		Mittlerer Anteil (%) an Ackerkulturen 1985-2018	Entwicklung Gesamtzeitraum (Prozentpunkte)	Mittlerer Anteil (%) an Ackerkulturen 1985-2018	Entwicklung Gesamtzeitraum (Prozentpunkte)
KM	Körnermais	2,9	+3,8	4,8	+4,9
SM	Silomais	14,0	+6,7	17,1	+4,1
SG	Sommergetreide	11,8	-8,5	12,5	-14,7
WG	Wintergetreide	47,2	+2,8	42,0	+7,3
KA	Kartoffeln	3,1	-1,4	2,6	-1,6
ZR	Zuckerrüben	6,1	-2,3	3,5	-1,1
SHF	Sonstige Hackfrüchte	0,5	-0,2	0,7	-1,1
RA/Ö	Raps, sonst. Ölfrüchte	8,4	-0,8	5,9	+1,3
LEG	Körnerleguminosen	1,5	-0,1	0,8	+0,6
KG	Kleegras/-gemenge	4,1	+0,2	6,1	+0,1
STILL	Stilllegungen	0,4	-0,2	4,0	0,0

Bayernweit lassen sich seit Mitte der 80er Jahre bei den meisten Ackerkulturen Veränderungen der Anbauhäufigkeit feststellen, die politische Entscheidungen oder wirtschaftliche Entwicklungen widerspiegeln. Bei den BDF-Standorten sind die jährlichen Schwankungen aufgrund der geringen Stichprobenzahl wesentlich ausgeprägter und die Trends nicht immer so deutlich. Dennoch zeichnen auch die 80 Acker-BDF die wichtigsten Trends in Bayern, wie die Zunahme des Maisanbaus (Abb. 12) oder den Rückgang von Sommergetreide, weitgehend nach.

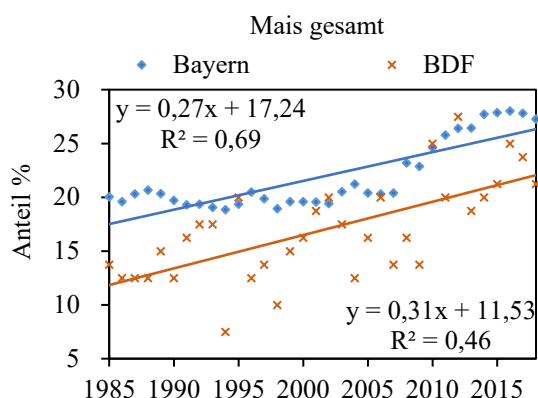


Abb. 12: Entwicklung der Maisanbaufläche im Beobachtungszeitraum von 1985 bis 2018 auf den Acker-BDF und den Ackerflächen in Bayern; (1985-1992: Statistische Jahrbücher von Bayern, 1993-2018: InVeKoS)

1.3.3 Bewirtschaftung (Acker)

Sowohl der Anteil an Zwischenfrüchten insgesamt als auch der Anteil an Winterzwischenfrüchten auf den Acker-BDF nahm von 1985 bis 2018 deutlich zu (Abb. 13). Noch deutlicher war die Zunahme des Anteils an Acker-BDF, die über den Winter entweder mit einer Zwischenfrucht oder einer Hauptkultur begrünt waren. Der Anteil im Winter unbestellter Ackerflächen nahm entsprechend auf den BDF signifikant ab. Lag das Verhältnis von mit Winterzwischenfrucht bestellten BDF an Jahren mit Sommerungen zu Beginn des Bodendauerbeobachtungsprogramms noch bei deutlich unter 10 %, stieg der Anteil auf über 40 % in den letzten zwei bzw. etwa 28 % in den letzten 15 Jahren.

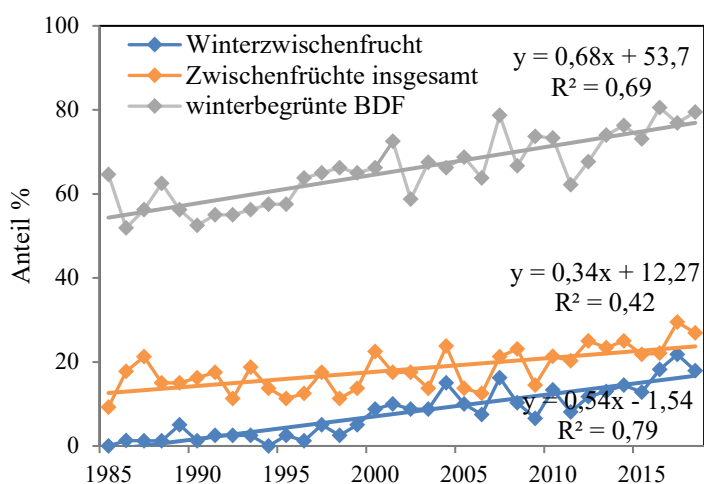


Abb. 13: Jährlicher Anteil (in %) der BDF mit Zwischenfruchtanbau, der BDF mit Winterzwischenfrucht und Anteil der über Winter begrünter BDF (Winterzwischenfrucht + Winterung)- Entwicklung über den Beobachtungszeitraum 1985-2018.

Der Anteil der gepflügten BDF ging über den Beobachtungszeitraum von 1985 bis 2018 kontinuierlich zurück, während der Anteil der pfluglos bewirtschafteten Acker-BDF deutlich von unter 20 % auf etwa 40 % zunahm (vergl. Abb. 14, Abb. 16). Mehrjährige Kulturen machten hierbei nur einen geringen Anteil von im Mittel 2 % aus und zeigten keine deutliche Änderung im Lauf der Zeit. Auf 16 Acker-BDF nahm im Beobachtungszeitraum die Pflughäufigkeit deutlich ab (vergl. Tab. 4).

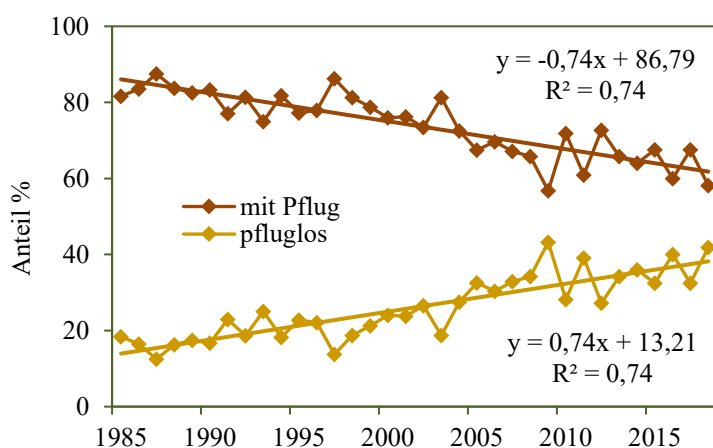


Abb. 14: Jährlicher Anteil (%) der BDF mit wendender Bodenbearbeitung (gepflügte BDF, braun) und pfluglos bewirtschafteter BDF (orange) – Entwicklung über den Beobachtungszeitraum 1985-2018.

Der Anteil der organisch gedüngten BDF nahm im Laufe des Beobachtungszeitraums von etwa 40 % zu Beginn auf etwa 60 % im Jahr 2018 zu (Abb. 15, Abb. 16). Insbesondere im Jahr 2008 war ein deutlicher Anstieg der organisch gedüngten Acker-BDF festzustellen. Die Zunahme der organischen Düngung ist im Wesentlichen auf die Zunahme der Ausbringung von Gärresten zurückzuführen. Seit 2006 wurden auf 19 Acker-BDF von zu diesem Zeitpunkt viehlosen Betrieben Biogasgärreste ausgebracht.

Auf 13 Acker-BDF wurde im Beobachtungszeitraum eine deutliche Zunahme der Ausbringung von organischen Düngern festgestellt (betrifft nicht die Mengen, da hierzu keine Angaben vorliegen, sondern die Wahrscheinlichkeit für das Jahr). Auf zwei Acker-BDF ging die Anwendung von organischen Düngern deutlich zurück (vergl. Tab. 4).

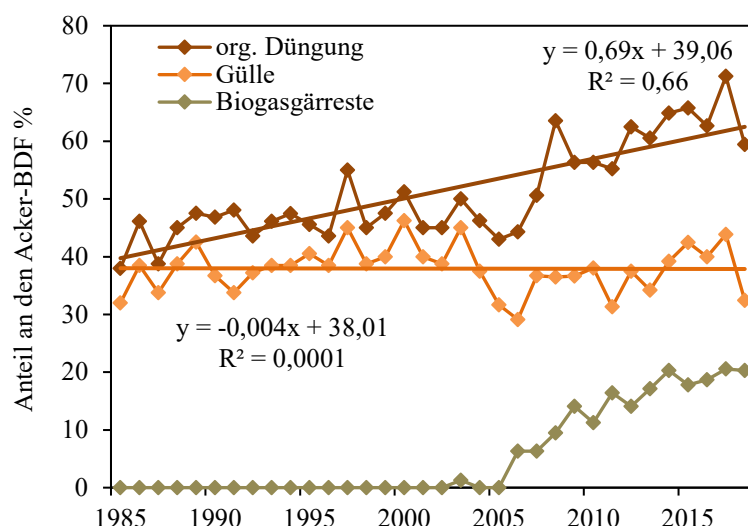


Abb. 15: Jährlicher Anteil (%) der BDF mit organischer Düngung gesamt (braun), Ausbringung von Gülle (orange) und Ausbringung von Biogasgärresten (olivgrün), Entwicklung über den Beobachtungszeitraum 1985-2018.

Tab. 4: Anzahl der BDF mit statistisch belegbarer Zu- und Abnahme der Bewirtschaftungsparameter im Beobachtungszeitraum 1985-2018; (als Indikator wurde die Signifikanz der logistischen Regression mit der Zeit herangezogen, Signifikanzniveau=0,05)

Abkürzung	Beschreibung	Zunahme	Abnahme	ohne deutliche Änderung
WZF	Winterzwischenfrucht	6	-	74
ZF	Alle Zwischenfrüchte	5	1	74
pfluglos	Pfluglose (= nicht wendende) Bodenbearbeitung	16	-	64
Stroh	Einarbeitung von Stroh (Getreide, Raps und Körnermais)	6	7	67
Org. Düngung	Ausbringung von organischem Dünger	13	2	65

1.3.4 Ökolandbau (Acker und Grünland)

Insgesamt fünf der 80 dauerhaft als Acker genutzten BDF wurden im Zeitraum von 1985 bis 2018 zeitweise ökologisch bewirtschaftet, nur eine davon seit mehr als 25 Jahren (seit 1991). Eine Acker-BDF wurde seit 1992 ökologisch bewirtschaftet, wechselte aber nach sechs Jahren wieder zur konventionellen Bewirtschaftung. Die übrigen drei wurden zwischen 2010 und 2016 von konventionell auf ökologisch umgestellt. Von den 18 dauerhaft als Grünland genutzten BDF wurden im Beobachtungszeitraum fünf Flächen ökologisch bewirtschaftet, darunter ein Betrieb, der seit 1988 Ökolandbau betreibt. Drei weitere Flächen wurden zwischen 1997 und 2000 auf ökologische Bewirtschaftung umgestellt und eine weitere Grünland-BDF im Jahr 2008. Der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Flächen beträgt zum Ende des Beobachtungszeitraums (2018) beim Acker 6 % (von 80) und beim Grünland 28 % (von 18). Bei den 12 BDF mit Nutzungsänderung sind weitere sechs Betriebe (50 %) zu finden, die nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus arbeiten. Die Sonderkulturstandorte (Hopfen, Wein, Obst) werden alle konventionell bewirtschaftet.

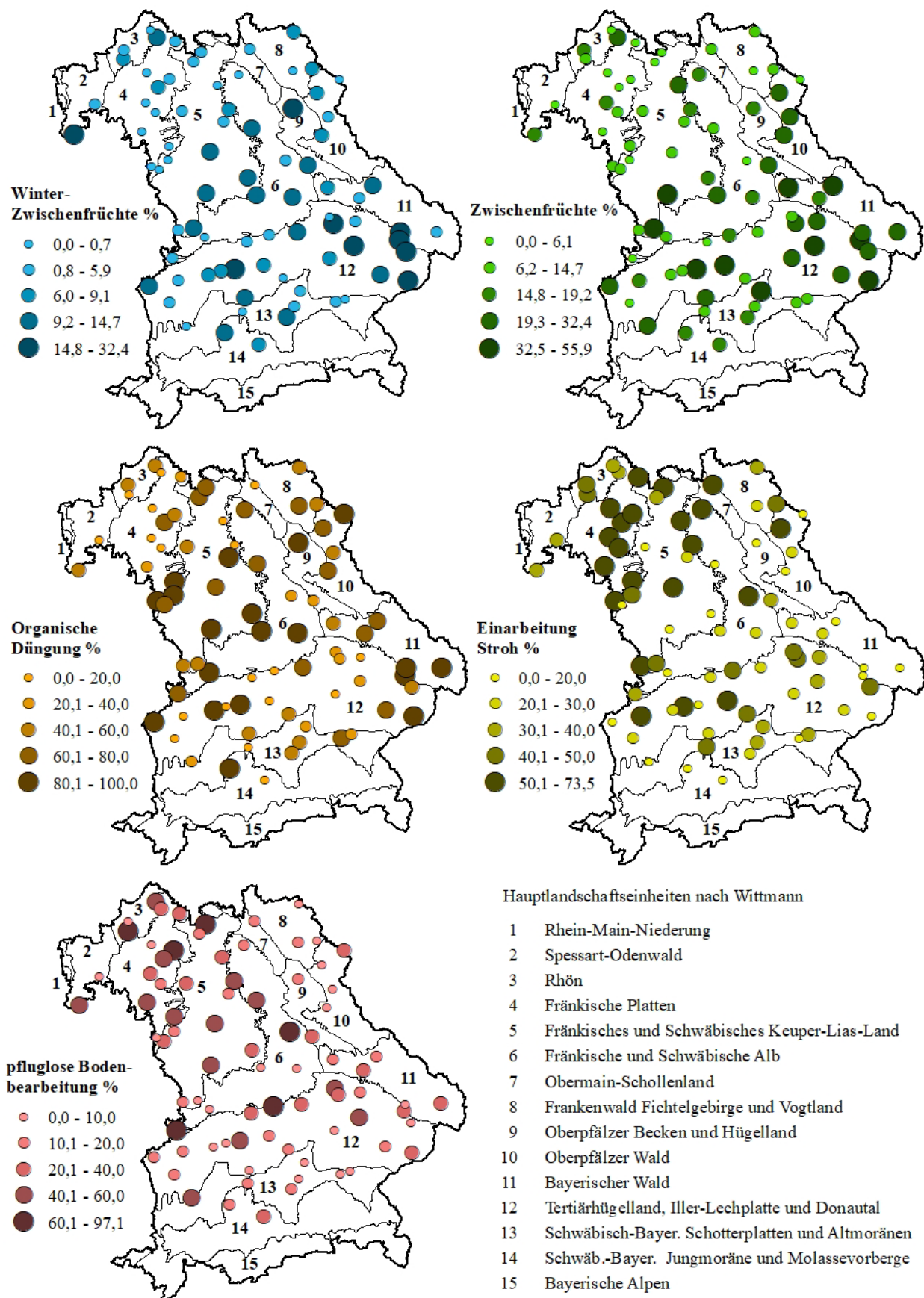


Abb. 16: Anteile (%) der Bewirtschaftungsjahre für die Bewirtschaftungsparameter je Acker-BDF im Beobachtungszeitraum von 1985 bis 2018

Bayernweit betrug der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Ackerflächen im Jahr 2018 7 % an der gesamten Ackerfläche, der Anteil des ökologischen Grünlands 15 % vom gesamten Grünland. Die bayernweite Zunahme der ökologisch bewirtschafteten Flächen spiegelt sich auch im BDF-Programm wider (Abb. 17), wobei die ökologisch bewirtschafteten Grünlandflächen im BDF-Programm zumindest zum Ende des Beobachtungszeitraums den bayernweiten Anteil übertreffen und daher im BDF-Programm überproportional vertreten sind.

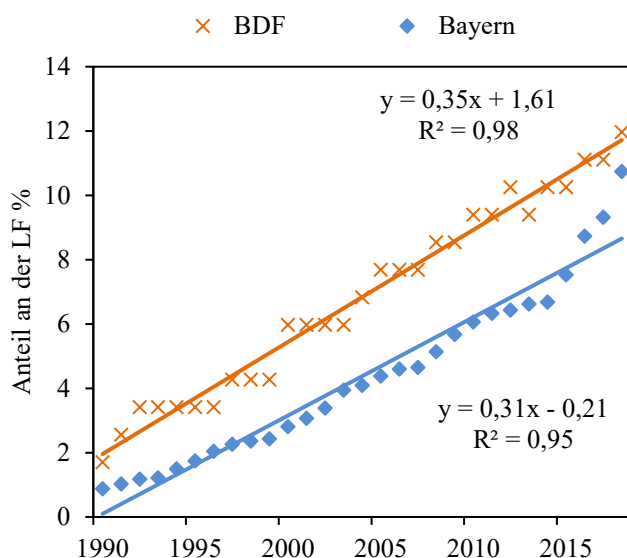


Abb. 17: Anteil der BDF mit ökologischer Bewirtschaftung (Acker, Grünland, Flächen mit Nutzungsänderung und Sonderkulturen, n=117) über den Beobachtungszeitraum im Vergleich zur bayernweiten Entwicklung an der landwirtschaftlich genutzte Fläche (LF, incl. Acker, Grünland, Sonderkulturen), Quelle: 1990-2002: Angaben der Anbauverbände Demeter, Bioland, Biokreis und Naturland (LVÖ, 2021), ab 2003: basierend auf den Angaben der in Bayern zugelassenen und beliebigen Öko-Kontrollstellen (LfL, 2021)

2 Bodenphysik

Bodenphysikalische Parameter wurden im BDF-Programm für jede Untersuchungsfläche erhoben, um deren Standorteigenschaften anhand der Bodenarten und anhand von Kennwerten des Wasserhaushalts (Gesamtporenvolumen, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität) zu beschreiben. Daneben wurden Eigenschaften des Bodengefüges (Rohdichte, Aggregatstabilität) bestimmt, die durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst werden können (vergl. Band 1, Übersicht Bodenprobenahmen 1985-2018). Im Vordergrund steht dabei, den langfristigen Einfluss bestimmter landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf das Bodengefüge zu erkennen (LfL, 2005).

Die Bestimmung von Bodeneigenschaften bildet zudem die Grundlage für die Interpretation anderer Messgrößen. So dienen die Hauptbodenarten der Einordnung von Schadstoff-Vorsorgewerten nach Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999) oder erlauben die Bewertung von Individuenzahlen von Regenwürmern (vergl. Band 5 der Schriftenreihe 35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung). Die Bodenarten der BDF gehören zudem zu den Standorteigenschaften, die die Repräsentativität der Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Vergleich zur landwirtschaftlichen Fläche Bayerns maßgeblich bestimmen. Die Kenntnis der Bodenarten und deren Bestimmung anhand der Texturanalyse gehört daher zu den zentralen Aufgaben der Bodenphysik im BDF-Programm und wurde regelmäßig auf dem Stand der aktuellen Labormethodik wiederholt.

2.1 Texturanalyse

2.1.1 Bodenarten im Oberboden

Acker

Bei den Acker-BDF kommen mit 35 Standorten am häufigsten **Lehme** im Oberboden vor. Ungefähr zwei Drittel der Lehme werden dabei von den Bodenarten Ls2, Ls3 und Sl4 (vergl. Bodenartendreieck in Abb. 18 und Tab. 5) gebildet. Die zweithäufigste Hauptbodenarten-Gruppe im Oberboden bilden die **Schluffe** mit 20 Acker-BDF (Bodenarten Lu und Ut4). **Tone** sind auf 16 Acker-BDF zu finden (überwiegend Lt3, Tu3 und Tu4). Sie besitzen Tonanteile von im Durchschnitt 40 %. Lehmige, bzw. tonige **Sande** (meist Sl2 und St2) weisen nur 9 Acker-BDF auf. Der Tonanteil liegt bei diesen Böden zwischen 5 und 12 %.

Ackerböden mit hohen Tonanteilen über 40 % befinden sich vor allem im Bereich der Fränkischen Platten und im Übergang zum Keuper-Lias-Land und der Fränkischen Alb. Tonböden mit Tonanteil über 30 % kommen bei Acker-BDF außerdem im Einflussbereich der Donau und der Iller-Lechplatten vor. Hohe Schluffanteile von über 50 % konzentrieren sich auf Acker-BDF im Tertiärhügelland, kommen aber auch lokal in Franken im Bereich der südlichen Fränkischen Platten bei gleichzeitig hohem Tonanteil um die 30 % und der Fränkischen Alb vor.

Grünland

Bei den Grünland-BDF gehören je die Hälfte der Standorte zu den **Lehmen** (9 BDF) und **Tonen** (8 BDF). Sechs der Lehmstandorte gehören zur Bodenart Lt2, drei Standorte haben die Bodenart Ls2. Bei den Tonböden (Lt3, Tu3, Tu2) unter Grünlandnutzung beträgt der Tonanteil im Durchschnitt 42 %. Ein Grünlandstandort weist einen stark tonigen **Schluff** als Bodenart auf (Ut4, Tonanteil 19 %, Schluff 70 %).

Tonige und lehmige Böden der Grünland-BDF verteilen sich auf die im BDF-Programm repräsentierten, typischen Grünlandstandorte der Alpen, Jungmoränen- und Molassevorberge und der Mittelgebirgslandschaften. Die Standorte mit den höchsten Tonanteilen befinden sich im Isartal bei Mittenwald (58 %) und Bad Tölz (45 %) und auf einer Alm bei Bayrischzell (45 %). Der Schluff-Standort im Tertiärhügelland besitzt mit 70 % den bei weitem höchsten Schluffanteil der Grünland-BDF (vergl. Abb. 18 Bodenartendreieck).

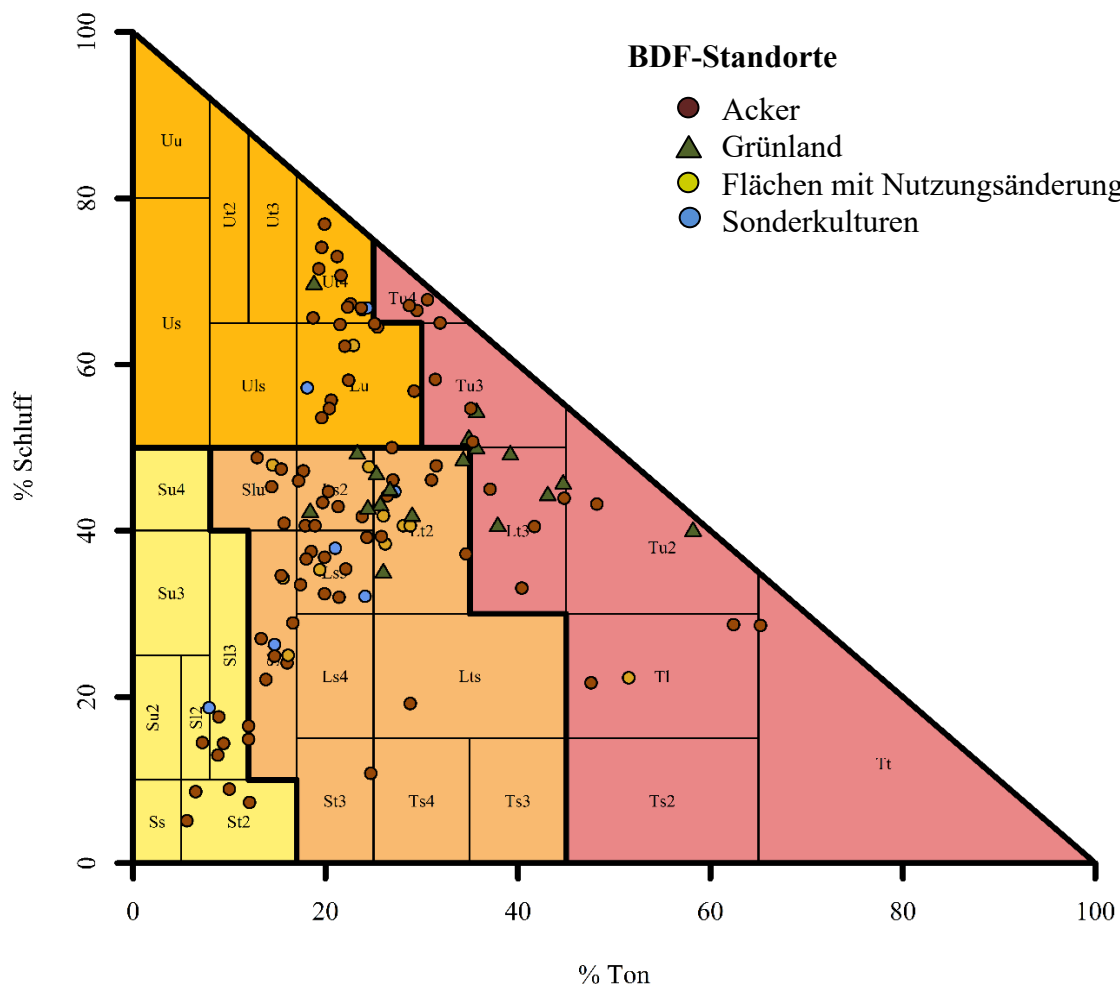


Abb. 18: Bodenartendreieck für den Oberboden aller BDF-Standorte (nach Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5), 2005)

2.1.2 Bodenarten im Unterboden

Acker

Bei den Acker-BDF setzt sich die Bodenart des Oberbodens bei Lehmen und Tonen meist im Unterboden fort, während bei 11 der 20 Oberboden-Schluffe auch Tone unterhalb der Pflugsohle zu finden sind. Sand unter Lehm kommt einmal, Ton unter Lehm zweimal bei den Acker-BDF vor. Unter den 16 Tonen des Oberbodens wurden dreimal Lehme und einmal ein Schluff festgestellt.

Die häufigste Bodenart bilden auch im Unterboden die **Lehme** mit 38 Standorten. Mit 25 Acker-BDF sind **Tone** die zweithäufigste Bodenart im Unterboden, darunter 20 schluffige Tone (Tu2, Tu3, Tu4, vergl. Tab. 5). Ihr Tonanteil liegt mit 37 % im Mittel etwas niedriger, ihr Schluffanteil mit 54 % etwas höher als bei den Tonen des Oberbodens. Bei 9 Acker-

BDF besteht der Unterboden aus **Schluffen** mit durchschnittlich 24 % Tonanteil und 61 % Schluffanteil. Schluffe kommen im Unterboden wesentlich seltener vor als im Oberboden, ihre Korngrößenzusammensetzung ist im Durchschnitt vergleichbar. **Sande** bilden mit 8 Standorten auch im Unterboden die am wenigsten häufige Bodenart (Tab. 5).

Die regionale Verteilung der Böden mit den höchsten Ton-, bzw. Schluffanteilen entspricht grundsätzlich der des Oberbodens. Fränkische Alb und die Fränkischen Platten mit angrenzenden Regionen (Keuper-Lias, Obermain-Schollenland) sind die Landschaftseinheiten mit den BDF-Standorten mit den höchsten Tongehalten (bis zu 66 % bei Bad Windsheim) in Bayern. Tone kommen im Unterboden aber auch unter den Schluffen des Tertiärhügellands und entlang von Donau und Lech vor. Hohe Schluffanteile im Unterboden von über 65 % besitzen Acker-BDF, die meist im Tertiärhügelland, vereinzelt in Franken zu finden sind.

Tab. 5: Anzahl der auf den BDF vorkommenden Bodenarten des Ober- und Unterbodens und ihrer Hauptgruppen gruppiert nach Art der Nutzung

Bodenart	Hauptgruppe	Anzahl		Anzahl	
		Acker	Grünland	Acker	Grünland
		Oberboden		Unterboden	
Ls2	Lehme	8	3	6	3
Ls3	Lehme	8		4	1
Ls4	Lehme			3	
Lt2	Lehme	6	6	8	3
Lts	Lehme	1		1	
Sl4	Lehme	7		9	
Slu	Lehme	4		5	2
St3	Lehme	1			
Ts3	Lehme			1	
Ts4	Lehme			1	
gesamt	Lehme	35	9	38	9
Sl2	Sande	1			
Sl3	Sande	4		3	
Ss	Sande			1	
St2	Sande	4		3	
Su2	Sande			1	
gesamt	Sande	9	0	8	
Lu	Schluffe	10		7	2
Ut4	Schluffe	10	1	2	1
gesamt	Schluffe	20	1	9	3
Lt3	Tone	4	5	4	4
Tl	Tone	2			
Tt	Tone	1		1	
Tu2	Tone	1	1	4	1
Tu3	Tone	4	2	8	1
Tu4	Tone	4		8	
gesamt	Tone	16	8	25	6
Summe		80	18	80	18

Grünland

Da es beim Grünland keine Pflugsohle gibt, stammen die Unterbodenwerte aus einer Tiefe von 15-30 cm. Die dort bestimmten Hauptbodenarten sind meist identisch mit denen des Oberbodens. Bei zwei Grünlandflächen mit toniger Deckschicht im Oberboden kommen darunter Schluffe vor, bei einem Standort folgt auf Lehm im Oberboden ein Ton im Unterboden.

Es kommen bei den Grünlandstandorten neun **Lehme**, drei **Schluffe** (Lu und Ut4) sowie sechs **Tone** (Lt3, Tu2 und Tu3) mit einem Tonanteil von im Mittel 38 % vor (Tab. 5)

Lehme und Tone kommen sowohl im Grünland-Schwerpunkt des Alpen- und Voralpenraums und im Bayerischen Wald vor. Die beiden fränkischen Grünlandstandorte besitzen Tone im Unterboden. Hohe Schluffanteile im Unterboden sind nicht nur am typischen Lössstandort im Tertiärhügelland, sondern auch am bayerischen Alpenrand und im Regen-Tal bei Cham anzutreffen.

2.2 Bodengefüge - Status und Veränderung

Als Bodengefüge wird die Architektur und die Strukturbildung des Bodens beschrieben. Die Hohlräume bieten Lebensraum für Organismen und bilden das Versorgungsnetz für den Wasser- und Lufthaushalt, die Durchwurzelbarkeit sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen. Des Weiteren ist das Bodengefüge der steuernde Faktor für die Bearbeitbarkeit der Böden.

Die Gefügeuntersuchungen auf BDF wurden im zurückliegenden Beobachtungszeitraum für 25 ausgewählte Ackerstandorte im Frühjahr in der Kultur Winterweizen durchgeführt, mit dem Ziel die Unterbodenverdichtung zu dokumentieren. Um die Veränderung der Qualität des Bodengefüges sowie die möglichen Einflussfaktoren darauf quantifizieren zu können wurden die Ergebnisse der letzten und ersten Probenahme im Beprobungszeitraum von 1995 bis 2017 verglichen (Abb. 19).

Die Luftkapazität charakterisiert den Porenanteil, der den schnellen Wasser- und Gastransport sicherstellt und Grobporenanteil genannt wird. Sie ist entscheidend für die Versickerung von Niederschlagswasser (Infiltration verhindert Erosion) in tiefere Bodenschichten sowie für die Wasserhaltefähigkeit in Trockenphasen (nutzbare Feldkapazität). Zeitweiliger Wasserstau über einer verdichteten Pflugsohle kann in der unteren Krume zu reduktiven Bedingungen führen, insbesondere dann, wenn dort Stroh vom Vorjahr vergraben liegt. Eine Bodenverdichtung bedeutet eine Veränderung des Gefüges und hat negative Auswirkungen auf die Bodenfunktionen, was zu Einschränkungen des Wurzelwachstums führt (Harrach und Vorderbrügge, 1991; Sommer und Brunotte 2003), auch wenn die Pflugsohle i.d.R. nur einige Zentimeter dick ist und die Pflanzenwurzeln diese kompakte Zone insbesondere im Frühjahr bei ausreichender Feuchte durchdringen können.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Gefügekennwerte erlauben eine Bewertung der Verdichtungsneigung im Unterboden bei den BDF mit Ackernutzung. Alle untersuchten Ackerböden wiesen eine sogenannte „Pflugsohle“ auf, die sich durch niedrigere Werte der Luftkapazität deutlich vom Unterboden darunter abgrenzen lässt. Im Mittel lag die LK in der Pflugsohle am zweiten Probenahmeterrin bei 7,7 %. Dabei lag die Luftkapazität in der Pflugsohle bei gut der Hälfte der untersuchten Standorte nahe am kritischen Wert von 5 %, in wenigen Fällen auch darunter. Tonige Böden hatten generell einen niedrigeren Grobporenanteil (im niedrigsten Fall nur 2,8 % LK) und neigten tendenziell eher zur Verdichtung, wohingegen sandige Böden dies eher ausgleichen können, mit dem Nachteil der geringeren Wasser und Nährstoffhaltefähigkeit (nutzbare Feldkapazität). Unter der Pflugsohle lagen bei den untersuchten Acker-BDF die Gefügekennwerte mit wenigen Ausnahmen in einem Bereich, der auf eine ausreichende Funktionsfähigkeit schließen lässt, so lagen zuletzt nur 3 Standorte unter dem kritischen Wert von 5 %.

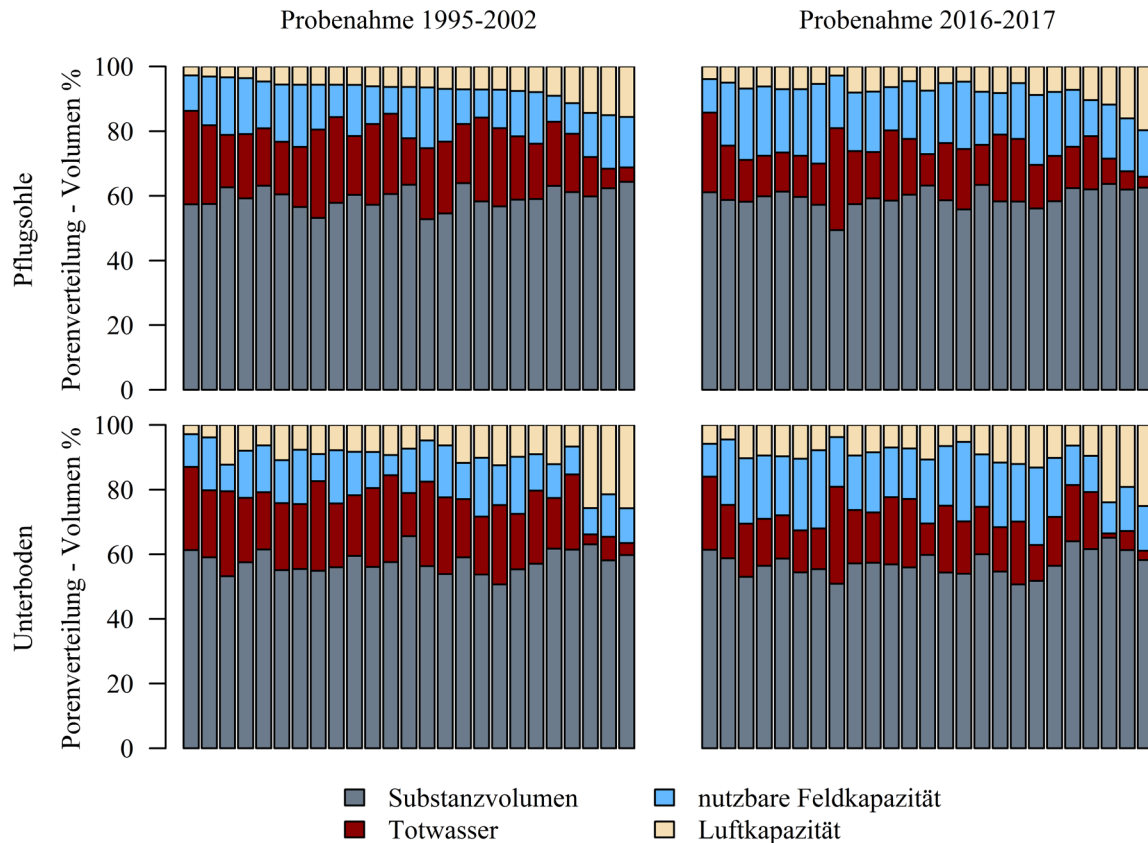


Abb. 19: Vergleich der bodenphysikalischen Parameter Substanzdichte, Totwasser, nutzbare Feldkapazität und Luftkapazität zwischen Pflugsohle und Unterboden sowie den beiden Probenahmeserien.

Über den Beobachtungszeitraum konnten Veränderungen auf allen Standorten (vergl. Abb. 19, Abb. 20, Tab. 6), jedoch keine generelle Verschlechterung der Luftkapazität in der Pflugsohle oder im Unterboden festgestellt werden. Es wurde über alle BDF sogar eine leichte Zunahme in der Pflugsohle von im Mittel 7,3 auf 7,7 % und ein gleichbleibendes Niveau der Luftkapazität im Unterboden darunter von 10,3 % gemessen. In der Pflugsohle wurde auf 10 Standorten eine jährliche Abnahme um im Mittel $-0,1 \text{ \% a}^{-1}$ und auf 15 Standorten eine Zunahme der Luftkapazität um im Durchschnitt $+0,1 \text{ \% a}^{-1}$ beobachtet, wobei die größten Zu- und Abnahmen sowohl auf tonigen als auch auf sandigen bzw. schluffigen Böden vorkamen. Die Standorte mit Abnahmen haben durchschnittlich einen etwas höheren Tonanteil im Unterboden (28 %), als die Standorte mit Zunahmen (24 %), bei gleichzeitig im Mittel gleich hohem Sandanteil. Der Schluffanteil liegt bei den Standorten mit Abnahmen bei durchschnittlich 44 %, bei den Standorten mit Zunahmen bei 48 %.

Nach wie vor liegen die Kennwerte für die Ausprägung der Gefüge der untersuchten BDF innerhalb der für bayerische Verhältnisse bekannten Bereiche (vgl. Bayer. Geol. Landesamt, 1986, 1992; Horn et al., 1991, LBP, 1997; LfL, 2005) und weisen überwiegend auf ausreichend funktionsfähige Gefügestrukturen der landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns hin. Die Ergebnisse lieferten, trotz der Tendenz zu schwererem Maschineneinsatz in der Landwirtschaft, somit keinen Hinweis auf eine generell zunehmende Schadverdichtung im Unterboden von Ackerflächen.

Tab. 6: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle und im Unterboden von 25 Acker-BDF im Zeitraum 1995-2017 als Anzahl BDF und Anteil an den untersuchten BDF (%)

	LK-Abnahme	LK-Zunahme
Änderung Pflugsohle	9 (36 %)	16 (64 %)
Änderung Unterboden	12 (48 %)	13 (52 %)

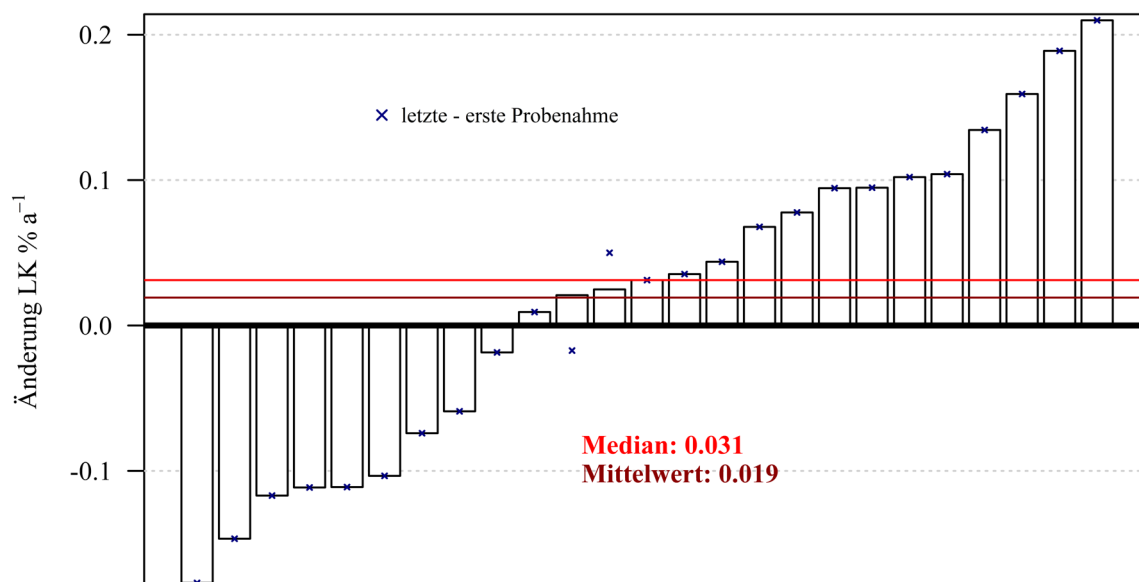


Abb. 20: Entwicklung der Luftkapazität in der Pflugsohle als jährliche Änderung von 25 Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\% a^{-1}$

Es ist zu berücksichtigen, dass nicht jede Verdichtung des Bodens eine Schadverdichtung darstellt. In bestimmten Situationen ist dieser Effekt erwünscht. Zum Beispiel wird nach dem Pflug häufig der Packer eingesetzt, um den überlockerten Oberboden rückzuverfestigen und den Kapillarwasseraufstieg zu gewährleisten. Anders ist dies jedoch im nicht regelmäßig gelockerten krumennahen Unterboden zu beurteilen. Hier bewirken Bodenverdichtungen über das Maß der Bodenfestigkeit hinaus das Gegenteil. Eine so genannte plastische Verformung kann zu einer nachhaltigen Störung der Bodenfunktionen führen (Geischeder, 2011).

Da auch bei den untersuchten BDF gut die Hälfte der Standorte zum zweiten Probenahmezeitpunkt noch nahe am kritischen Wert von 5 % LK in der Pflugsohle lag, ist eine bodenschonende Bewirtschaftung weiterhin entscheidend. Positiv auf die Bodenstruktur wirken sich Bewirtschaftungsparameter aus, die den Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden erhöhen, sowie das Bodenleben in Form von Regenwürmern fördern (vergl. Kapitel 4 Humus und Kapitel 5 Regenwürmer). Johnston et al. (2018) sowie Briones und Schmidt (2017) weisen dazu nach, dass reduzierte Bodenbearbeitung und Strohverbleib die mechanische Störung im Boden reduziert und zur Vermehrung von *Lumbricus terrestris* führt. Weitere Studien zeigen, dass langjährige organische Düngung in Verbindung mit der Anreicherung organischen Materials die Lagerungsdichte verringern und die Aggregatstabilität erhöhen kann (Haynes und Naidu, 1998), sowie die Porosität des Oberbodens vergrößert (Schlüter et al., 2011). Jedoch sind die Parameter wie Feldkapazität, Gesamtporenvolumen oder auch Lagerungsdichte auch stark von Standortbedingungen sowie insbesondere von der Textur geprägt.

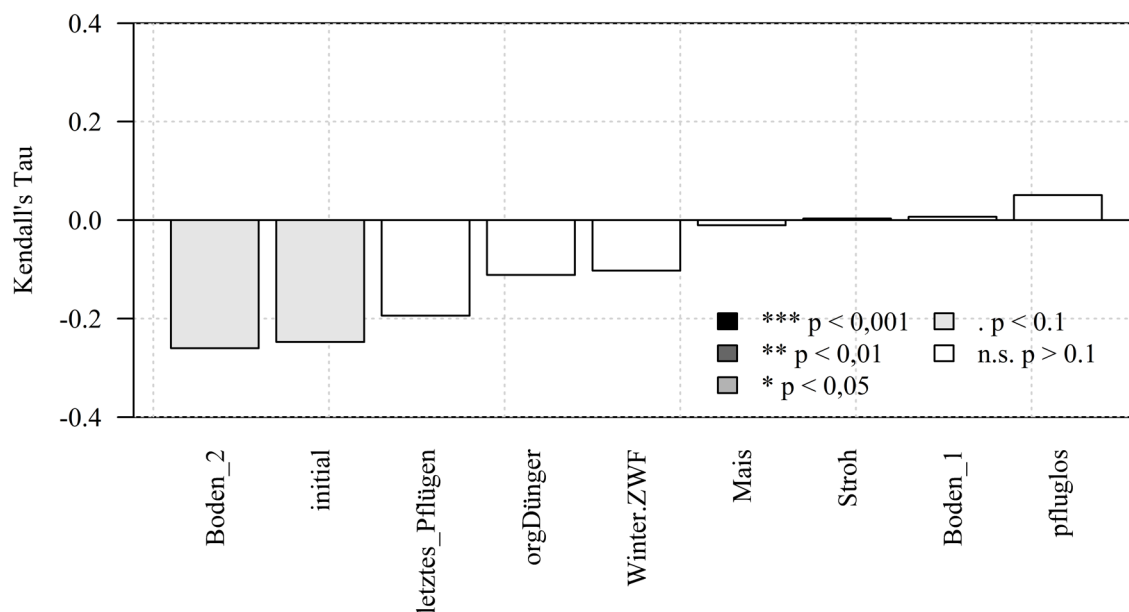


Abb. 21: Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der Entwicklung der Luftkapazität mit den ausgewählten Variablen (Farbskala nach p-Wert)

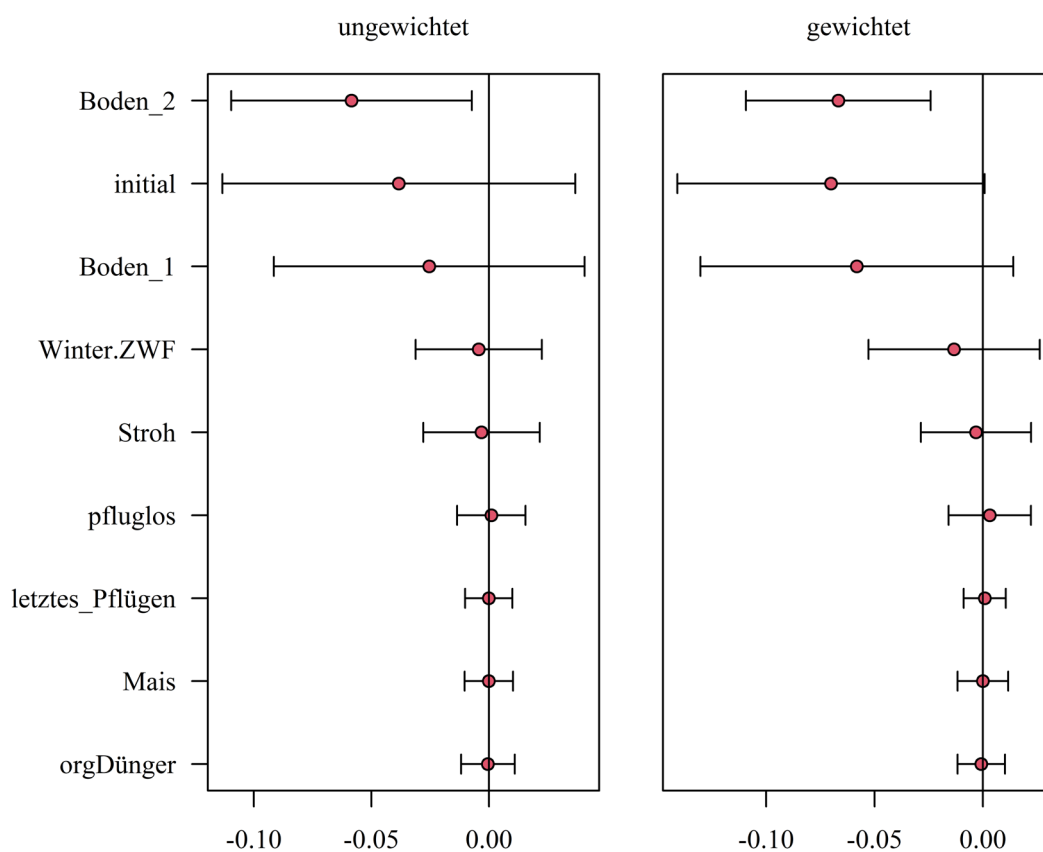


Abb. 22: Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten (standardisiert) für das ungewichtete und das mit dem RMSE gewichtete gemittelte Model für die Entwicklung Luftkapazität der bayerischen Acker BDF (full average Methode).

Ein Einfluss bestimmter Bewirtschaftungsparameter auf den Trend der Luftkapazität konnte in der vorliegenden Beprobungsreihe nicht nachgewiesen werden. Zum einen lassen sich anhand von nur zwei Probenahmezeitpunkten noch keine soliden Trends bestimmen, zum anderen ist die Anzahl von 25 BDF hinsichtlich der hohen Variabilität der Bewirtschaftung relativ gering. Die statistischen Tests legen nahe, dass Standortfaktoren die entscheidendere Rolle spielen und tonige aber auch ertragreiche, schluffige Böden eher zu einer Verdichtung neigen. Dass die stärksten Veränderungen aber sowohl auf tonigen, als auch auf sandigen Standorten zu beobachten waren, lässt vermuten, dass dem Entscheidungsspielraum des Landwirts beim bodenschonenden Maschineneinsatz eine bedeutende Rolle zukommt. Diese These sollte durch Fortführung der bodenphysikalischen Untersuchungen im BDF-Programm weiter überprüft werden.

Die in Form eines Screenings erhobenen Gefügedaten auf den BDF haben die Anfälligkeit bestimmter Böden für Schadverdichtungen bestätigt und gezeigt, dass Verdichtungswerte zeitlichen Veränderungen unterliegen, auch wenn die genauen Ursachen aufgrund der geringen Wiederholungszahl noch nicht abgeleitet werden konnten. Die gewonnenen Erkenntnisse stützen die auf Basis von Feldexperimenten abgeleitete Forderung, Maschinen und Arbeitsverfahren besonders bei zur Verdichtung neigenden Böden bodenschonend auszurichten, um das Bodengefüge funktionsfähig zu erhalten (LfL, 2005 und BMELV 2013). Der technische Fortschritt in der Reifen- und Fahrzeugentwicklung sollte künftig vermehrt dazu genutzt werden, die mechanische Belastung der Böden zu senken. Hier bestehen auch die Einsatzmöglichkeiten für neue autonome Technologien wie Agrarrobotik.

Tab. 7: Übersicht über die verwendeten Parameter, deren Kurz-Bezeichnung und Beschreibung der Parameter

Bezeichnung	Beschreibung
Standortparameter	
Boden_1	Hauptkomponente I, beschreibt Gradient von sandigen Böden mit niedriger Ackerzahl zu schluffigen mit hoher Ackerzahl
Boden_2	Hauptkomponente II, beschreibt den Tongehalt der Acker BDF
Bewirtschaftungsparameter	
Mais	Anteil Jahre mit Mais (Körner- und Silomais) am gesamten Beobachtungszeitraum
Winter.ZWF	Anteil Jahre mit Zwischenfruchtanbau über den Winter (Aussaat im Herbst, Umbruch/Bearbeitung im folgenden Jahr nach dem Winter) am gesamten Beobachtungszeitraum
Stroh	Anteil der Jahre am gesamten Beobachtungszeitraum, in denen Getreidestroh nach der Ernte auf dem Feld verbleibt
Pfluglos	Anteil der Jahre am gesamten Beobachtungszeitraum, in denen gepflügt wurde (wendende Bodenbearbeitung)
letztes_Pflügen	Anzahl an Jahren seit dem letzten Pflügen (mit Pflug)
orgDünger	Anteil der Jahre mit organischer Düngung am gesamten Beobachtungszeitraum

Bodenphysikalische Parameter wie Textur und Gefügekennwerte können zum einen wichtige Erklärungen zu anderen Bodenkennwerten wie Humus, Schadstoffe und Regenwürmern liefern und leisten zum anderen im langjährigen Monitoring einen wichtigen Beitrag, um den Zustand und die Veränderung der Böden hinsichtlich Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit sowie Schadverdichtung unter gegebenen Bewirtschaftungssystemen aufzuzeigen.

Die Untersuchungen der Unterböden unterhalb der Pflugsohle haben über die Jahre gezeigt, dass es keine Anhaltspunkte für flächendeckende Schadverdichtung in Bayern gibt. Dennoch muss in Zukunft auch aus Vorsorgegründen weiterhin verstärkt auf folgende Bodenschutzziele geachtet werden und deren Umsetzung auch in weiteren Probenahmeserien im BDF-Programm untersucht werden:

Die Erhaltung der guten Gefügestruktur und Durchlässigkeit sowie einer hohen nutzbaren Feldkapazität im Oberboden und die Durchlässigkeit unterhalb der Bearbeitungstiefe, insbesondere in der Bodenartengruppe der Schluffe und Tone, die gefährdet sind für anhaltende Schadverdichtungen.

Die Förderung der Stabilität der Oberflächenstruktur und Aggregate zum Schutz vor Verschlammung und Erosion. Gefährdet sind auch hier vorrangig die fruchtbaren Schluffböden.

Dies machen auch die sich weiter verändernden Rahmenbedingungen wie weiter fortschreitende Veränderung in der Landwirtschaft, getrieben von Klimawandel, Technik oder gesellschaftlich sowie politischen Ansprüchen notwendig.

3 Bodenschadstoffe

Unter Schadstoffen versteht man Stoffe oder Stoffgemische, die schädlich für Menschen, Tiere, Pflanzen, andere Organismen oder Ökosysteme sind. Das viel verwendete Zitat von Paracelsus „Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift. Allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist“, macht deutlich, dass die Bestimmung der Konzentration und Verfügbarkeit potenziell schädlicher anorganischer und organischer Schad- und Spurenstoffe im Boden von entscheidender Bedeutung ist.

Böden sind Naturkörper unterschiedlichen Alters, die je nach Art des Ausgangsgesteins und Reliefs, sowie dem vorherrschenden Klima und einer bestimmten streuliefernden Vegetation mit charakteristischen Lebensgemeinschaften durch bodenbildende Prozesse entstanden sind (Scheffer, 2010). Wegen der geogenen (=gesteinsbedingten) Faktoren und durch Prozesse der Bodenbildung (=Pedogenese), weisen natürlich entstandene Böden, auch ohne menschliches Zutun, einen charakteristischen Stoffbestand an anorganischen und organischen Inhaltsstoffen, darunter auch Schad- und Spurenstoffen, auf. Durch die Tätigkeit des Menschen, Industrie, Verkehr und Haushalten (Immissionen), aber auch durch Düngung mit mineralischen und organischen Düngemitteln wie Wirtschaftsdünger, Klärschlämmen und Bioabfällen, oder durch die Aufbringung von Bodenmaterialien bzw. Baggergut können Schadstoffe zusätzlich in den Boden gelangen. Durch Bodenabtrag, Tiefenverlagerung innerhalb des Bodens (z.B. mit dem Sickerwasser), Ausgasung in die Atmosphäre (z.B. Quecksilber, leicht flüchtige organische Stoffe), Beerntung und Beweidung werden Schad- und Spurenstoffe andererseits auch wieder aus dem Boden ausgetragen. Organische Schadstoffe können auch biologisch zu ungiftigen Stoffen ab- oder umgebaut werden.

Wichtige Ziele der Bodendauerbeobachtung im Hinblick auf Schadstoffe sind:

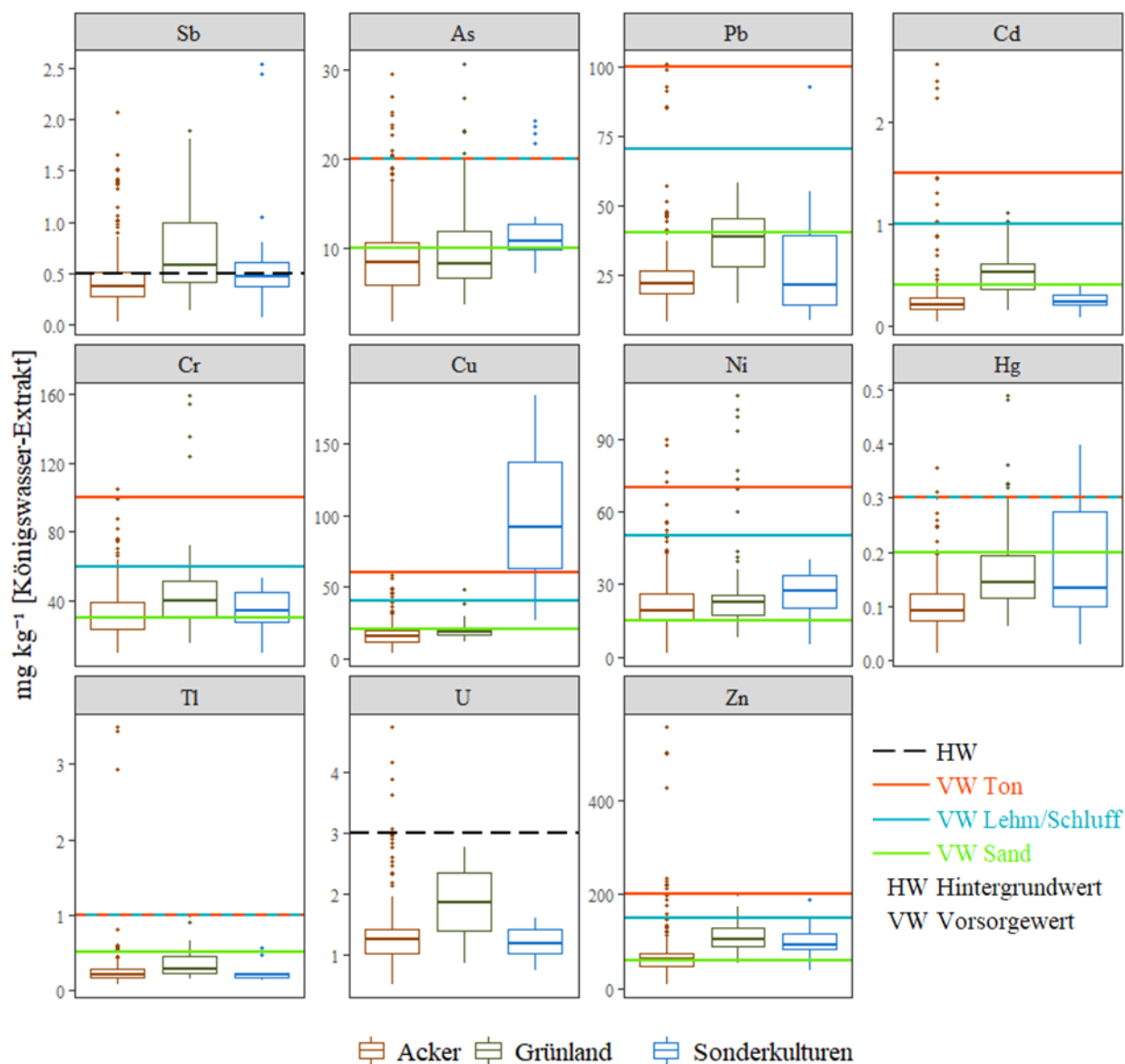
- Erfassung der Schadstoffgehalte landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern für verschiedene Landschaftseinheiten und Nutzungen.
- Messung der Schadstoffgehalte und langfristiger Veränderungen in Ober- und Unterböden.
- Erfassung der Stoffeinträge durch Dünger, Luft und Pflanzenschutzmittel.
- Aufbau eines Datenpools für Gesetzes-Novellierungen v.a. im Bodenschutz- und Düngerecht.
- Gewinnung von Boden-Rückstellproben, um neuartige Schadstoffe (z.B. Per- und Polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS), Mikroplastik) nachuntersuchen oder Störfälle (vorher/nachher) dokumentieren zu können.
- Überprüfung, ob landwirtschaftlich bewirtschaftete Böden noch die Voraussetzungen für die Produktion gesunder, schadstoffarmer Lebens- und Futtermittel erfüllen.
- Dokumentation, wie sich gesetzliche Neuregelungen auf Schadstoffeinträge in Böden auswirken (z.B. „Benzin-Bleigesetz“ auf Einträge über die Luft, oder Änderungen der Futtermittel-Verordnung auf Schadstoffeinträge durch Wirtschaftsdünger).

3.1 Anorganische Stoffe in Böden

Im Rahmen des BDF-Programms wurden folgende anorganische Stoffe in Ober- und Unterböden untersucht: Aluminium (Al), Arsen (As), Bor (B), Barium (Ba), Beryllium (Be), Wismut (Bi), Calcium (Ca), Cadmium (Cd), Kobalt (Co), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Quecksilber (Hg), Kalium (K), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Natrium (Na), Nickel (Ni), Phosphor (P), Blei (Pb), Rubidium (Rb), Schwefel (S),

Antimon (Sb), Selen (Se), Zinn (Sn), Strontium (Sr), Thallium (Tl), Uran (U), Vanadium (V) und Zink (Zn).

Abb. 23 zeigt die Gesamtgehalte (bestimmt im Königswasserextrakt des Bodens) von 11 aus Sicht des Bodenschutzes und der Landwirtschaft besonders wichtiger Schad- und Spurenelemente in den Oberböden der 80 Acker-, 18 Grünland- und 7 Sonderkultur-BDF (3 Hopfen-, 1 Obst- und 3 Wein-BDF) mit über 30-jähriger Beobachtungszeit.



Sb	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Tl	U	Zn
Antimon	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Thallium	Uran	Zink

Abb. 23: Gesamtgehalte ausgewählter elf chemischer Elemente im Königswasser-Extrakt der BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen im Vergleich zu typischen Hintergrundwerten (Sb, U) und Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV, 2021 – sie gilt seit 01.08.2023) [gesamter Beobachtungszeitraum und für insgesamt 4 Beprobungen im Abstand von 10 Jahren].

Die Einstufung der Gehalte erfolgt, soweit möglich, nach den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV, 2021), die nach Haupt-Bodenarten differenziert

sind. Werden Vorsorgewerte überschritten, besteht demnach die Besorgnis des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung. Schädliche Bodenveränderungen sind nach Bundesbodenschutz-Gesetz (BBodSchG, 1998) Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, hier der landwirtschaftlichen Nutzung, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Bei Überschreitung von Vorsorgewerten ist eine schädliche Bodenveränderung jedoch nicht bestätigt. Es bedarf weiterer Prüfungen besonders hinsichtlich der Pflanzenverfügbarkeit des Schadstoffs und ob Pflanzenqualität oder Pflanzenwachstum tatsächlich beeinträchtigt werden. Für Antimon und Uran sind in der BBodSchV keine Vorsorgewerte festgelegt. Deshalb wurden hier typische Hintergrundwerte in Böden als Vergleichsmaßstab herangezogen.

Die Höhe der Gesamtgehalte in BDF-Oberböden ist für die verschiedenen Elemente und Nutzungen sehr unterschiedlich, wie Abb. 23 und Tab. 8 zeigen.

Tab. 8: Median und 90 % der Werte (5-95%-Perzentil) der Gesamtgehalte in BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen (gesamter Beobachtungszeitraum - die in BBodSchV geregelten Elemente sind blau markiert).

Nutzung	stat. Wert	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Tl	U	Zn
Acker	90% der Werte	3,8-18,2	0,13-0,57	14,6-57,2	7,3-34,1	0,05-0,187	7,1-42	12,8-40,8	0,13-0,95	0,11-0,46	0,67-2,62	32-136
	Median	8,4	0,21	30,4	15,3	0,091	19,4	21,9	0,38	0,20	1,24	61
Grünland	90% der Werte	5,1-21,8	0,22-0,96	21,3-98,2	13,7-29,3	0,084-0,326	12-85,4	22-53,7	0,23-1,63	0,15-0,75	0,94-2,68	65-161
	Median	8,2	0,52	40,1	18,8	0,143	23,0	38,7	0,59	0,29	1,86	106
Sonderkulturen	90% der Werte	7,7-23,3	0,1-0,35	11-49,6	28,3-165,3	0,047-0,388	6,7-37,5	10,1-54,1	0,16-1,95	0,14-0,52	0,84-1,51	46-151
	Median	10,9	0,24	34,5	91,8	0,133	27,4	21,2	0,47	0,20	1,17	93

Bei der überwiegenden Zahl der BDF wurden in Oberböden keine Vorsorgewerte überschritten. Tab. 9 zeigt die Anzahl der BDF mit Überschreitungen der Vorsorgewerte im Beobachtungszeitraum.

Tab. 9: Anzahl BDF mit Vorsorgewert (VW)-Überschreitungen im Oberboden (für Quecksilber noch vor Inkrafttreten der neuen Bundesbodenschutzverordnung zum 01. August 2023) differenziert nach Hauptbodenarten und Nutzungen.

4 Beprobungen im Abstand von 10 Jahren: 1985/86, 1996-99, 2005/06 und 2015/16												
	80 Acker-				18 Grünland-				7 Sonderkultur-BDF			
	Ton	Lehm/Schluff	Sand	< VW	Ton	Lehm/Schluff	Sand	< VW	Ton	Lehm/Schluff	Sand	< VW
As	5	3	0	72	2	1	-	15	-	1	0	6
Pb	1	1	0	78	0	0	0	18	-	1	0	6
Cd	1	0	4	75	0	0	5	13	-	0	0	7
Cr	0	4	0	76	1	0	-	17	-	0	0	7
Cu	0	2	0	78	0	1	-	17	-	6	1	0
Ni	1	1	14	64	0	2	7	9	-	0	1	6
Hg	0	0	4	76	0	0	-	18	-	0	0	7
Tl	1	0	0	79	1	0	-	17	-	0	0	7
Zn	2	2	11	65	0	3	7	8	-	2	2	3

- Bodenart für Nutzung nicht besetzt

Vorsorgewert-Überschreitungen traten auf Acker- und Grünland-BDF besonders bei der Hauptbodenart Sand bzw. den in Hauptbodenart Sand eingestuftten, schluffig-lehmigeren

Böden und häufiger bei Cd, Ni und Zn auf. Das liegt zum einen am strengeren Vorsorgewert für die Hauptbodenart Sand aber v.a. auch daran, dass nach BBodSchV bei $\text{pH} < 6$ für diese Elemente wegen der höheren Schwermetall-Verfügbarkeit bei niedrigem pH jeweils ein strengerer Vorsorgewert anzuwenden ist. So gilt für einen Boden der Hauptbodenart Lehm/Schluff und $\text{pH} < 6$ für Cd, Ni und Zn der strengere Vorsorgewert für Sand, bei Ton analog der Wert für die Hauptbodenart Lehm/Schluff. Vorsorgewert-Überschreitungen treten aber auch auf, wo wegen des Bodenausgangsgesteins der Boden geogen vorbelastet ist, also wo der natürliche Hintergrundwert höher ist (s.a. Hintergrundwerte in Bayern: <https://www.lfu.bayern.de/boden/hintergrundwerte>, LfU, 2011). Bei Quecksilber wurden auf BDF nur sehr geringe Gehalte in Oberböden gemessen. Nach der im ausgewerteten Beobachtungszeitraum gültigen BBodSchV traten bei Quecksilber nur auf 4 Acker-BDF mit Hauptbodenart Sand Vorsorgewertüberschreitungen im Oberboden auf (Maximalwert dort: $0,15 \text{ mg Hg kg}^{-1}$). Für alle anderen Nutzungen und Bodenarten konnten keine Vorsorgewertüberschreitungen für Hg festgestellt werden. Mit Inkrafttreten der novellierten BBodSchV zum 01.08.2023 wurden die Vorsorgewerte für Quecksilber geändert: der Vorsorgewert der Hauptbodenart Sand wurde auf $0,2 \text{ mg}$ (vorher $0,1 \text{ mg}$) angehoben, die Vorsorgewerte der Bodenarten Lehm/Schluff und Ton jedoch auf $0,3 \text{ mg Hg kg}^{-1}$ (vorher $0,5$ bzw. 1 mg) abgesenkt. Daraus resultieren auch einige Vorsorgewert-Überschreitungen bei BDF mit Hauptbodenart Lehm/Schluff und Ton. Bei der Hauptbodenart Sand werden durch die Änderung nun keine Vorsorgewerte mehr in Oberböden überschritten. Insgesamt sehr niedrig waren auch die Gehalte an Sb, Tl und U in BDF-Oberböden. Bei Tl aber auch As, Pb sowie Cu traten auf Acker- und Grünland-BDF nur sehr selten Vorsorgewertüberschreitungen auf.

Auf Sonderkultur-BDF jedoch wiesen alle BDF für Cu Vorsorgewert-Überschreitungen im Oberboden auf. In geringerem Umfang trifft das auch für Zn zu. Cu- und Zn-Präparate werden im Hopfen- und Weinbau zur Bekämpfung von Pilzerkrankungen nach Pflanzenschutzgesetz eingesetzt.

Neben der Höhe der Schadstoffgehalte im Boden, will das Bodenmonitoring auch langfristige Gehaltsveränderungen erfassen.

Abb. 24 zeigt exemplarisch für die Entwicklung der Elementgehalte aller 11 eingehend betrachteter chemischer Elemente auf Acker- und Grünland-BDF, wie sich die Cd- und Zn-Gehalte im Oberboden von Acker-BDF im Beobachtungszeitraum entwickelt haben. Abb. 25 fasst die zeitliche Entwicklung der Gesamt-Gehalte der 11 anorganischen Schad- und Spurenstoffe in BDF-Oberböden seit 1985 auf Acker-, Grünland- und Sonderkultur-BDF zusammen.

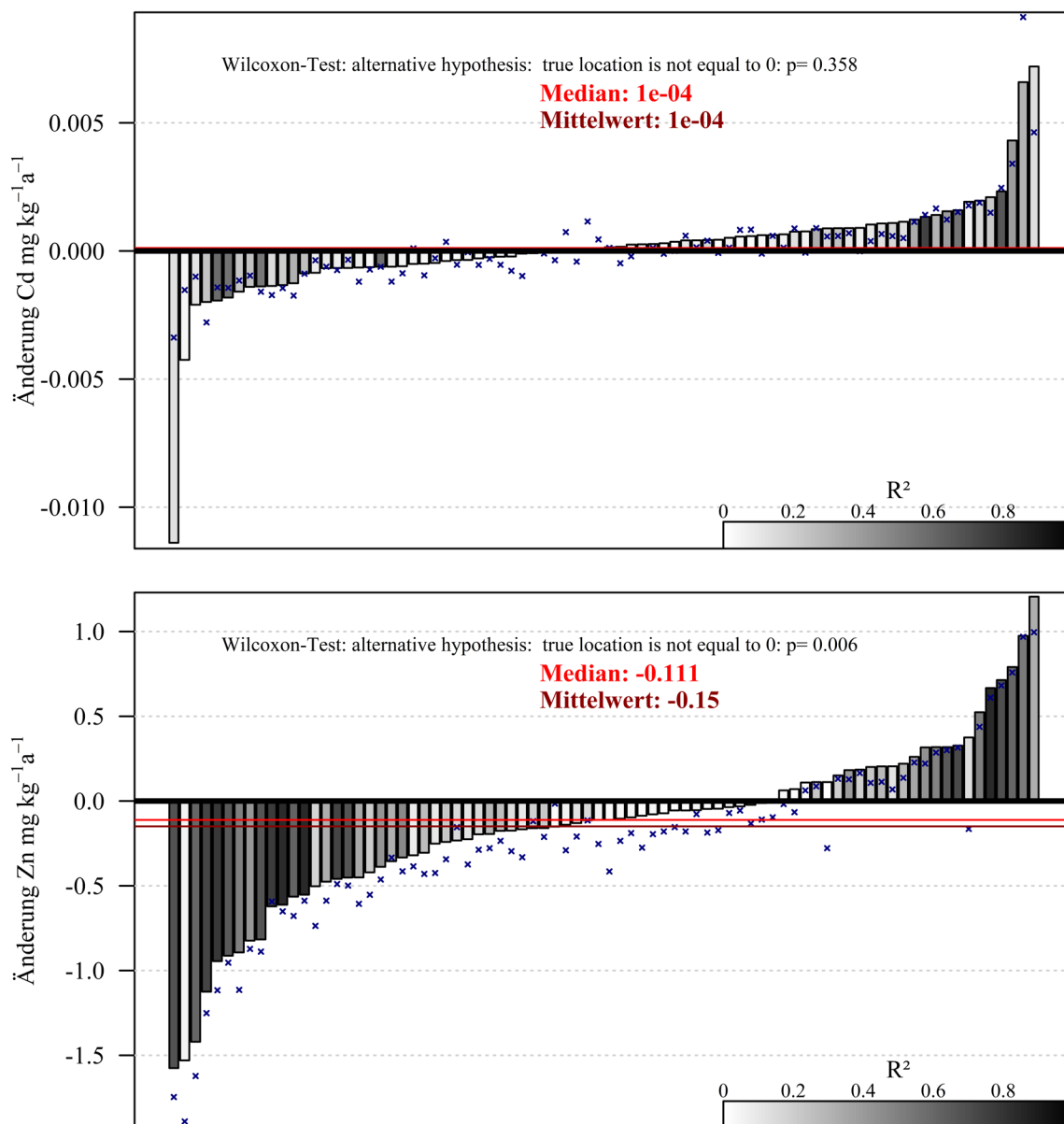


Abb. 24: Exemplarisch für die Entwicklung der Elementgehalte aller 11 betrachteter chemischer Elemente auf Acker- und Grünland-BDF: Entwicklung der Cd- (oben) und (unten) Zn-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg⁻¹ a⁻¹; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

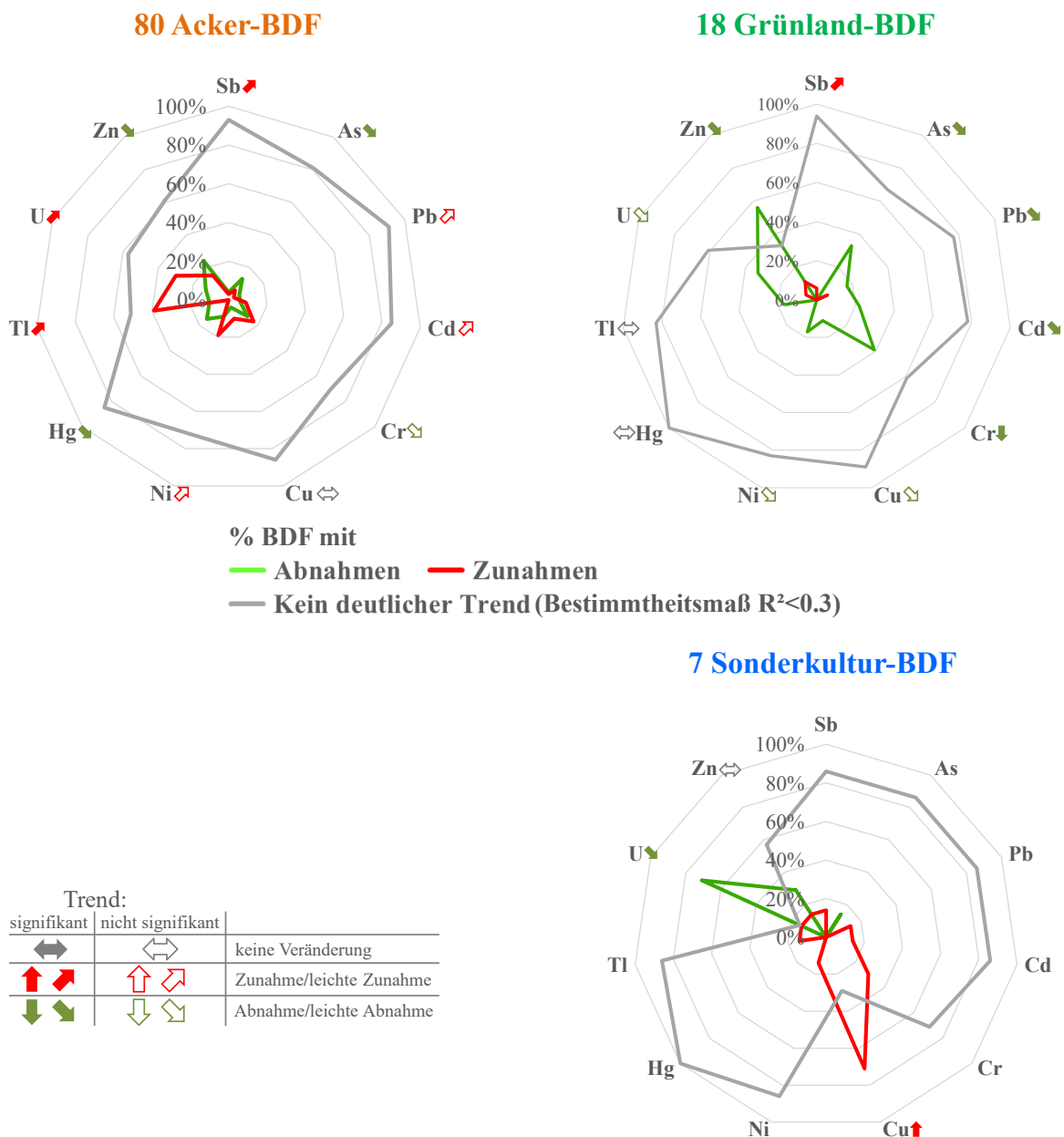


Abb. 25: Entwicklung der Gesamtgehalte elf anorganischer Stoffe in Oberböden von BDF seit 1985 (Anteil BDF in % der BDF unter jeweiliger Nutzung und Trends über alle BDF, unabhängig vom Bestimmtheitsmaß).

Die Anzahl BDF mit Gehaltsabnahmen und -zunahmen ist in Tab. 10 ersichtlich; dort ist auch ausgewiesen bei wieviel BDF die lineare Regression im Beobachtungszeitraum ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$ ergeben hat.

Tab. 10: Anzahl BDF mit Gehaltsabnahmen (Gehaltsabnahmen sind grün gekennzeichnet!) und Gehaltszunahmen (gesamt je Nutzung und BDF mit Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0.3$).

Element	80 Acker-BDF				18 Grünland-BDF				7 Sonderkultur-BDF			
	Abnahmen		Zunahmen		Abnahmen		Zunahmen		Abnahmen		Zunahmen	
	gesamt	$R^2 > 0.3$	gesamt	$R^2 > 0.3$	gesamt	$R^2 > 0.3$	gesamt	$R^2 > 0.3$	gesamt	$R^2 > 0.3$	gesamt	$R^2 > 0.3$
As	51	10	29	5	12	6	6	0	4	1	3	0
Cd	35	5	45	7	14	4	4	0	3	0	4	1
Cr	46	10	34	14	15	7	3	0	3	0	4	2
Cu	30	3	50	8	13	2	5	0	1	0	6	5
Hg	65	12	15	0	10	0	8	0	4	0	3	0
Ni	36	7	44	15	12	3	6	0	4	0	3	1
Pb	34	5	46	2	13	3	5	1	1	0	6	1
Sb	25	3	55	2	6	0	12	1	0	0	7	1
Tl	20	8	60	31	8	3	10	0	2	0	5	1
U	27	10	53	24	11	6	7	1	5	5	2	1
Zn	55	19	25	12	14	10	4	2	4	2	3	1

Für die meisten Elemente und BDF konnte im Beobachtungszeitraum kein eindeutiger Trend der Entwicklung der Gesamtgehalte im Oberboden (Abnahme/Zunahme) festgestellt werden. Eine Abnahme/Zunahme ist nur eindeutig, wenn das Bestimmtheitsmaß der einzelnen BDF $R^2 \geq 0.3$ ist! Besonders bei Acker-BDF war der Anteil BDF mit Ab- oder Zunahmen gering. Bei Grünland-BDF haben bei den meisten Elementen die Gehalte abgenommen. Dies trifft auch auf die Sonderkulturflächen, ausgenommen Cu zu. Bei den meisten Sonderkultur-BDF haben die Cu-Gehalte im Oberboden seit 1985 zugenommen trotz rückläufiger Aufwandmengen (5 der 7 Sonderkultur-Flächen zeigten Gehaltszunahmen). Cu ist ein wichtiges und häufig angewandtes Fungizid im Hopfen- und Weinbau. Aufgrund der geringen Anzahl von Hopfen- und Wein-BDF, ist die dargestellte Entwicklung der Kupfergehalte nicht allgemein auf Hopfen- und Weinflächen in Bayern übertragbar. Die Entwicklung der Gesamtgehalte im Oberboden (Trend der Ab-/Zunahme) für die übrigen Elemente und für alle BDF (auch die mit $R^2 < 0.3$) ist in Abb. 25 jeweils als Pfeil hinter dem Elementsymbol dargestellt und in Tab. 11 ersichtlich.

Tab. 11: Entwicklung der Gesamtgehalte (Median) in BDF-Oberböden in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ und % des Initialwertes nach 30 Jahren mit Angabe der Signifikanz des Trends (Gehaltsabnahmen sind grün gekennzeichnet!).

Element	80 Acker-BDF				18 Grünland-BDF				7 Sonderkultur-BDF			
	Trend	% Initialw.	signifikant		Trend	% Initialw.	signifikant		Trend	% Initialw.	signifikant	
	$\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$	nach 30 a	($p < 0,05$)		$\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$	nach 30 a	($p < 0,05$)		$\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$	nach 30 a	($p < 0,05$)*	
As	-0,00923	- 3,1	X		-0,03824	- 13,9	X		-0,00352	- 0,9		
Cd	0,00012	1,8			-0,00218	- 11,9	X		0,00008	1,1		
Cr	-0,01773	- 1,8			-0,11907	- 8,1	X		0,01022	0,9		
Cu	0,01081	2,2			-0,02996	- 4,9			1,49786	67,8		
Hg	-0,00036	- 11,5	X		-0,00020	- 4,2			-0,00021	- 5,1		
Ni	0,01299	2,0			-0,02774	- 3,5			-0,00944	- 1,0		
Pb	0,02021	3,0			-0,07312	- 5,6	X		0,04245	6,2		
Sb	0,00146	11,2	X		0,00296	14,7	X		0,00327	21,6		
Tl	0,00048	7,5	X		0,00013	1,4			0,00022	3,5		
U	0,00112	2,7	X		-0,00442	- 6,7			-0,00347	- 8,9		
Zn	-0,11143	- 5,2	X		-0,39302	- 10,0	X		-0,13771	- 4,2		

*Berechnung der Signifikanz nicht sinnvoll, wegen zu geringer Anzahl bei den einzelnen Sonderkulturen.

Besonders hoch ist die Zunahme an Cu im Oberboden von Sonderkultur-BDF. Gegenüber dem Ausgangsgehalt (Initialwert zu Beginn des Bodenmonitorings) haben dort die Gehalte um 68 % (Median) zugenommen. Bei ausgewählten BDF konnte auch eine Erhöhung der Cu-Gehalte im Oberboden durch organische Düngung mit Schweinegülle nachgewiesen werden (ausführlich beschrieben in Band 3 „Bodenschadstoffe“). Nicht immer und für jedes Element und jede Nutzungsform lassen sich die Gehaltsveränderungen im Boden plausibel bzw. so gut erklären wie für Cu. Jedoch sind Rückgänge bei As, Hg, Zn oder nur im Grünland bei Pb und Cd (Anmerkung: nicht immer ist der Zusammenhang signifikant) gut mit einem allgemeinen Rückgang der Umweltbelastung (verringerte Einträge aus der Luft) und reduzierterer Verwendung dieser Elemente zu erklären. Andererseits werden Elemente wie Cd und U über Mineraldünger v.a. bei Ackernutzung (im Grünland wird meist nur organisch gedüngt) in Böden eingetragen, weil geogen bedingt, Rohphosphate aus sedimentären Lagerstätten Cd und U enthalten können. So lässt sich beispielsweise erklären, warum Cd und U im Oberboden von Acker-BDF leicht angestiegen sind, im Grünland aber abgenommen haben (Utermann, 2008 und 2009).

Außer Gesamtgehalten wurden 2005/06 bisher einmalig, die für Pflanzenwurzeln verfügbaren Gehalte verschiedener Schad- oder Spurenstoffe im Boden untersucht. Sie werden im Extrakt des Bodens mittels einer Ammonium-Nitrat-Lösung bestimmt. Meist sind damit nur rd. 1 % der Gesamtgehalte (Mikrogramm statt Milligramm!) im Boden messbar. Hauptsächlich wurden Acker-BDF und diejenigen 7 Elemente betrachtet, für die die Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV, 1999 und 2021) für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze Prüf- und Maßnahmenwerte im Hinblick auf Pflanzenqualität und Wachstumsbeeinträchtigungen festgelegt hat. Prüfwerte sind nach Bundes-Bodenschutz-Gesetz (BBodSchG, 1998) Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt. Maßnahmenwerte sind Werte für Einwirkungen oder Belastungen, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel, von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind. Die Untersuchung der Acker-BDF haben keine erhöhte Verfügbarkeit von Pb, Cd und Tl (hinsichtlich negativer Beeinflussung der Pflanzenqualität) noch As, Cu, Ni und Zn (hinsichtlich Wachstumsbeeinträchtigungen der Pflanzen) ergeben – eine schädliche Bodenveränderung konnte bei den untersuchten BDF also nicht festgestellt werden (ausführlich beschrieben in Band 3 der Veröffentlichungsreihe 35 Jahre BDF).

3.2 Organische Schadstoffe in Böden

Aus der Vielzahl organischer Schadstoffe werden im Rahmen von BDF Umweltchemikalien (PAK, PCB) und Rückstände persistenter (nicht mehr zugelassener) Pflanzenschutzmittel untersucht. Aktuell eingesetzte Pflanzenschutzmittel sind nicht Beobachtungsgegenstand der Bodendauerbeobachtung. Die Gehalte Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe (16 PAK der „priority pollutant list“ der U.S. Environmental Protection Agency (EPA), darunter auch Benzo(a)pyren) in BDF-Oberböden waren durchwegs sehr niedrig. Die strengeren Vorsorgewerte der BBodSchV (3 mg kg⁻¹ TM Boden für ΣPAK₁₆ und 0,3 mg für Benzo(a)pyren) für Böden ≤ 8% Humusgehalt wurden bei BDF-Oberböden max. nur zu einem Drittel erreicht. Im zeitlichen Verlauf haben die PAK-Gehalte im Beobachtungszeitraum abgenommen. Polychlorierte Biphenyle (6 Indikator-PCB nach Ballschmiter) wurden nur bei der Ersterhebung 1985/86 untersucht und äußerst geringe Konzentrationen (ΣPCB₆ < 0,006 mg kg⁻¹ – der strengere Vorsorgewert für Böden ≤ 8% Humusgehalt

liegt bei $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$) in Oberböden der BDF gemessen. Eine erneute Untersuchung wurde daher als nicht sinnvoll erachtet. Die PAK- und PCB-Gehalte im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF unterschieden sich nur wenig voneinander.

Persistente Rückstände von seit den 1980er Jahren verbotener Pflanzenbehandlungsmittel aus der Gruppe der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW), darunter Lindan (γ -Hexachlorcyclohexan (HCH)), Hexachlorbenzol (HCB) sowie Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) und seine Metaboliten konnten schon bei Ersterhebung 1985/86 kaum in Oberböden von BDF nachgewiesen werden. Aus diesem Grund sind Wiederholungsuntersuchungen nur auf ausgewählten BDF mit Werten über der Nachweisgrenze bei Erstuntersuchung durchgeführt worden. Die Gehalte haben im Beobachtungszeitraum abgenommen und liegen derzeit nahe der analytischen Bestimmungsgrenzen.

3.3 Einträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Böden

3.3.1 Durch Wirtschafts- und Mineraldünger

Über die Düngung können neben Nähr- und Spurenstoffen auch unerwünschte Stoffe in den Boden eingetragen werden. Bei der Vielzahl der eingesetzten Mineraldünger und deren unterschiedlicher Nährstoff- und Spurenstoffzusammensetzung war es im Rahmen des Bodenmonitoring-Programms nicht möglich, alle auf den BDF aufgebrauchten Mineraldünger zu untersuchen. Für Mineraldünger wird daher auf Literaturangaben zurückgegriffen.

Umfangreiche Untersuchungen und Ergebnisse liegen von den BDF jedoch zur Entwicklung der Schadstoff- und Spurenelementgehalte von Wirtschaftsdünger vor. Im Beobachtungszeitraum wurden insgesamt 574 Wirtschaftsdünger untersucht, darunter 272 Rinder- und 127 Schweinegülle-Proben. Da zu wenig schweinehaltende Betriebe am Bodendauerbeobachtungsprogramm teilnahmen, wurde seit 1993 Schweinegülle von weiteren Betrieben mit intensiver Schweinehaltung (Zusatzbetriebe) beprobt und untersucht. Aufgrund der starken Umstrukturierung in der Landwirtschaft v.a. bei der Viehhaltung konnte von keinem Betrieb (BDF- oder Zusatzbetrieb) über alle 6 Beprobungen durchgängig Schweinegülle untersucht werden. Bei Rindergülle sind 13 BDF durchgängig untersucht worden. Ab 2006 wurden erstmals auch Gärreste untersucht – ein Wandel von Gülle zu Gärresten ist somit auch bei BDF zu beobachten. Für As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Tl und U sind nur geringe Gehalte in Rinder- und Schweinegülle gemessen worden, die im Beobachtungszeitraum größtenteils abgenommen haben. Entsprechend sind auch die daraus errechneten Eintragsfrachten, bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger Stickstoff-Düngung von $170 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in Böden gering (DüV, 2017) (siehe Tab. 12).

Tab. 12: Schwermetallfrachten (Medianwerte 11 ausgewählter Elemente) bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweinegülle in $\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

	Beprobung	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Tl	U	Zn
Rindergülle	1985/86		1,48	31,3	152	0,40	23,7	25,9				856
	2018	2,31	0,59	12,1	153	0,09	15,5	5,1	0,23	0,20	0,58	687
Schweinegülle	1985/86		0,92	18,0	789	0,12	20,3	11,7				1.872
	2018	1,32	0,34	8,8	397	0,03	18,2	2,0	0,18	0,05	1,08	1.408

Sb wird erst seit 1999 in sehr geringen Konzentrationen gemessen (s. Tab. 12), die zeitliche Veränderung für Sb wurde daher noch nicht berechnet.

Bei Cu und Zn jedoch sind deutlich höhere Gehalte in Rinder- und Schweinegülle gemessen worden. Entsprechend höher sind auch die daraus berechneten Eintragsfrachten (s. Abb. 26).

Wie Abb. 26 zeigt, ist bei Cu und Rindergülle der Medianwert der Eintragsfrachten im Beobachtungszeitraum mehr oder weniger unverändert ($\sim 150 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die Zn-Frachten schwanken dagegen stärker, der Median bleibt im Beobachtungszeitraum aber in etwa auf demselben Niveau.

Demgegenüber haben bei Schweinegülle die Cu- und Zn-Frachten im Beobachtungszeitraum, besonders gegenüber der Erstuntersuchung abgenommen. Die Eintragsfrachten bei Schweinegülle schwankten für beide Elemente viel stärker als bei Rindergülle. Für Zink zeigt sich bei Schweinegülle ein ähnlicher, aber viel ausgeprägterer Verlauf in der Zeitachse als bei Rindergülle.

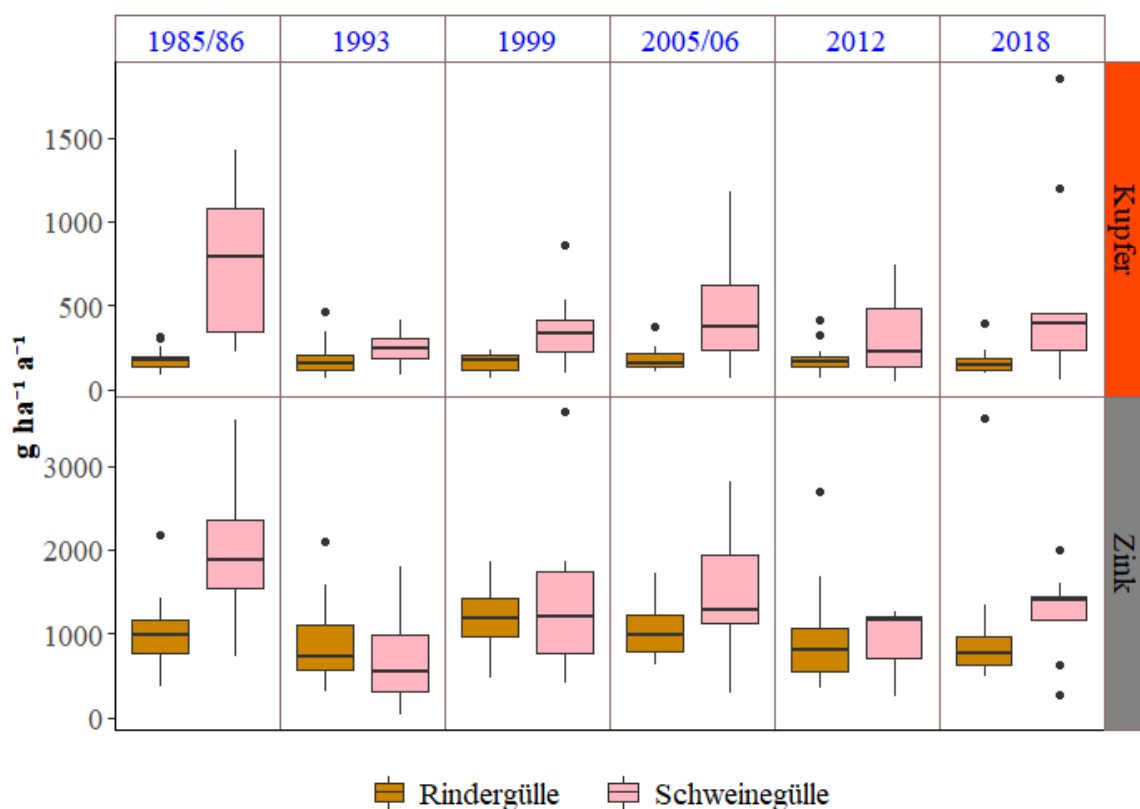


Abb. 26: Cu- und Zn-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung ($170 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) mit Rinder- bzw. Schweinegülle.

Besonders für Schweinegülle und Cu spiegelt der zeitliche Verlauf gesetzliche Änderungen, wie Verschärfungen der Futtermittel-Verordnung (besonders zwischen 1986 und 2003) gut wider, wie Tab. 13 zeigt. Auch das Verbot antibiotischer Leistungsförderer (seit 01.01.2006) hatte Einfluss auf die Höhe der Cu- und Zn-Frachten.

Tab. 13: Futtermittelverordnung (FuttMV) - Regelungen für Kupfer 1986 bis 2018 für Schweine und Rinder [alle Angaben in mg kg⁻¹ bei 88 % TM].

Tierart/Futtermittel	FuttMV 1986	LFGB 2003	EU-VO 2004	EU-VO 2018
Ferkel	175 (bis 16 Wo.)	175 (bis 16 Wo.)	170 (bis 12 Wo.)	150 (Saugferkel + Absetzferkel bis 4 Wo nach Absetzen)
				100 (Wo. 5-8 nach Absetzen)
Mastschweine		35	25	25
	16 Wochen – 6 Monate	100		
	ab 6 Monate	50		
Zuchtsauen	50	35	25	25
Rinder vor dem Wiederkäueralter				15
	Milchaustauschfutter	30	30	15
	sonstige Alleinfutter	50	50	15
andere Rinder	35	35	35	30

FuttMV: Futtermittelverordnung, LFGB: Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch, Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 vom 25. Juli 2003, gültig ab 26. Januar 2004, DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2018/1039 DER KOMMISSION vom 23. Juli 2018 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1039&from=ET>).

Über die meisten Mineraldünger werden nur geringe Schadstoffmengen in Böden eingetragen. Phosphathaltige Ein- und Mehrnährstoffdünger können aber je nach Herkunft des Rohphosphates, wenn es aus sedimentären Lagerstätten stammt, zum Teil erhebliche Mengen an Cd (bis 35 mg Cd kg⁻¹) und U (max. 206 mg U kg⁻¹) enthalten (Smidt et al., 2011). Für Cd ist in der Düngemittelverordnung (DüMV, 2012) ein Grenzwert von 1,5 mg Cd kg⁻¹ bzw. für Düngemittel mit P₂O₅-Gehalten >5% von 50 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ festgelegt. Auch in der neuen EU Düngeprodukteverordnung (EU 2019/1009) sind Grenzwerte für Schwermetalle festgelegt, z.B. gilt für ein anorganisches Makronährstoff-Düngemittel ein Grenzwert von 3 mg Cd kg⁻¹ bzw. für solche mit >5% P₂O₅-Massenanteil, ein Grenzwert von 60 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅). Eine dem Pflanzenbedarf besser angepasste Phosphordüngung, hat gegenüber 1980 zu einem starken Rückgang des Phosphatdünger-Verbrauchs in Bayern (1985: 66 kg P₂O₅ ha⁻¹ LF und 2019: 13 kg P₂O₅ ha⁻¹ LF) und damit viel geringeren Cd- und U-Einträgen in Böden geführt (bei mineralischen P-Düngern >5% P₂O₅-Massenanteil und Ansatz des Grenzwertes der Düngemittelverordnung entspräche das heute einem Cd-Eintrag von max. 0,7 g Cd ha⁻¹ LF a⁻¹ gegenüber 3 g Cd ha⁻¹ LF a⁻¹ zu Beginn des Monitorings 1985).

3.3.2 Über die Luft

Die Schadstoff-Depositionen aus der Luft (Immissionen) haben für 6 anorganische Schad- und Spurenstoffe (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni und Zn) seit 1985 deutlich abgenommen (Abnahme

um >50 bis >90 %, siehe Abb. 27). Besonders deutlich ist der Rückgang der Einträge über die Luft bei Cd (Rückgang um 82 % von 1 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ (1985) auf 0,18 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ (2019)) und bei Pb. Da 1988 verbleites Benzin verboten wurde, haben besonders zwischen 1985 (rd. 68 g Pb ha⁻¹ a⁻¹) und 1992 (<17 g Pb ha⁻¹ a⁻¹) die Einträge für Pb stark abgenommen - seitdem nehmen sie langsamer ab und liegen derzeit bei nur mehr 4-5 g Pb ha⁻¹ a⁻¹.

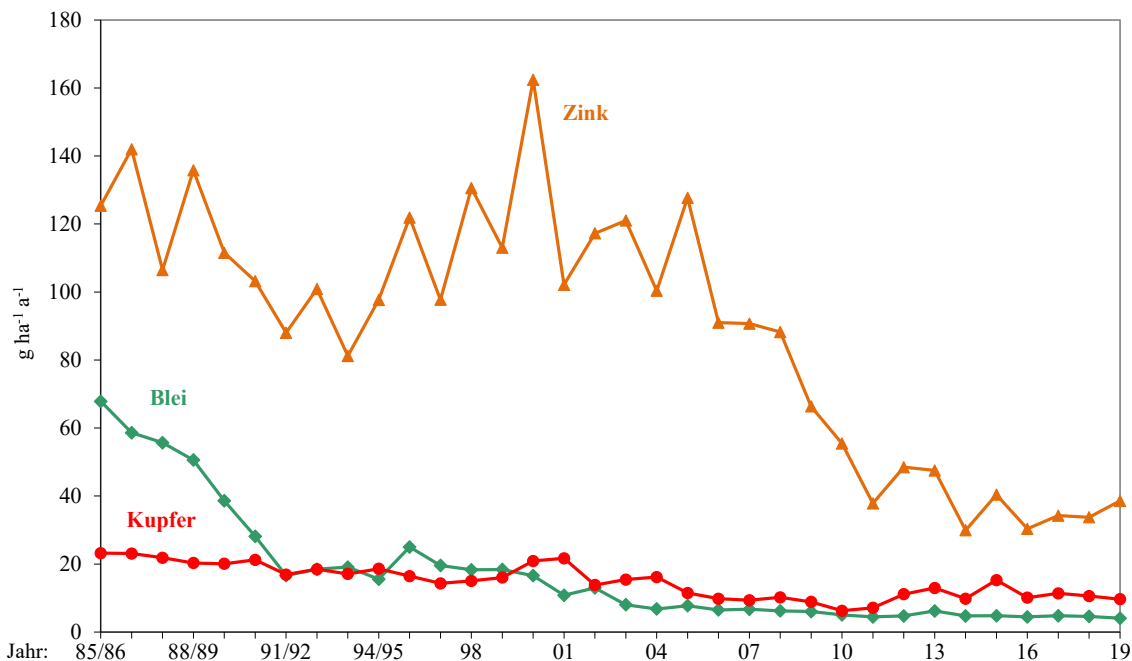


Abb. 27: Mittlere Blei-, Kupfer- und Zink-Einträge in ländlichen Gebieten Bayerns durch Immissionen (1985-2019).

3.3.3 Durch Cu- und Zn-Spritzungen bei Sonderkulturen

Wegen der fungiziden Wirkung werden bei Sonderkulturen (Hopfen, Obst, Wein) seit langem (weit vor Beginn der Bodendauerbeobachtung) Cu- und Zn-Präparate als Pflanzenschutzmittel eingesetzt. Besonders hoch waren die Einträge an Cu bei den 3 Hopfen-BDF. Seit 1985 wurden dort insgesamt 275-580 kg Reinkupfer ha⁻¹ in die Böden eingebracht – zum Vergleich, bei den 3 Wein-BDF waren es nur 42-99 kg ha⁻¹. Die Aufwandmengen an Reinkupfer bei den Hopfen-BDF haben von 1985 bis etwa zur Jahrtausendwende z.T. sogar noch zugenommen; jedoch anschließend stark abgenommen. Heute liegen die Aufwandmengen unter 4 kg Cu ha⁻¹ a⁻¹ (Höchstmenge nach Pflanzenschutzgesetz) und somit deutlich niedriger als zu Beginn des Monitorings (Einsatz kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel im Hopfen in Deutschland in kg Cu ha⁻¹ a⁻¹: ~39 (1975) und ~16 (1995), nach ENGELHARD, 2008 in STRUMPF, 2011). Da sich Cu im Boden anreichert, weisen die Oberböden von Sonderkultur-BDF deutlich höhere Cu-Gehalte (bis 150 mg Cu kg⁻¹) auf als Acker- und Grünland-BDF (meist <60 mg Cu kg⁻¹). Im Beobachtungszeitraum haben die Gehalte im Oberboden der Hopfen-BDF um 35-54 mg Cu kg⁻¹ und auf Wein-BDF um 16-51 mg Cu kg⁻¹ zugenommen. Weil die Ernte-Entzüge sehr gering sind (nach Portner et. al. ca. 500 g Cu ha⁻¹ a⁻¹ durch Hopfendolden) und der Hopfen- und Weinbau als Dauerkultur betrieben wird, wird sich trotz deutlich geringerer Aufwandmengen dieser Trend fortsetzen. Da Cu ein Mikronährstoff ist und Pflanzen über Mechanismen verfügen, um nicht zu viel an Cu aufzunehmen, stellen die hohen Bodenwerte jedoch kein Anbau-Risiko für die Sonderkulturen hinsichtlich einer Verschlechterung der Pflanzenqualität dar noch führen sie

dort zu Mindererträgen und Wachstumsbeeinträchtigungen. Bei besonders Cu-sensitiven Kulturen jedoch, könnte es bereits ab Cu-Gehalten $>50 \text{ mg kg}^{-1}$ zu Nachbauproblemen kommen (Kratz et al., 2009).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Schadstoffgehalte im Boden von BDF meist niedrig sind (häufig unterhalb bzw. im Bereich der Vorsorge- und Hintergrundwerte) und sich überwiegend auch nicht stark verändert haben. Schädliche Bodenveränderungen traten bei BDF keine auf. Schadstoffe können über die Luft, durch Dünger und Pflanzenbehandlungsmittel eingetragen werden, meist aber sind die Einträge gering und im Beobachtungszeitraum rückläufig. Relevant sind die Cu- und Zn-Einträge über die organische Düngung mit Rinder- und Schweinegülle - für die Düngung mit Schweinegülle konnte bei ausgewählten BDF eine Erhöhung der Cu-Gehalte im Oberboden nachgewiesen werden. Besonders Cu-Spritzungen auf Sonderkultur-BDF führten im Beobachtungszeitraum jedoch zu Gehaltszunahmen im Boden. Sehr gering sind die Gehalte der untersuchten organischen Schadstoffe PAK, PCB, CKW in Oberböden von BDF - auch dort konnte, soweit Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt wurden, ein starker Rückgang auf z.T. nahe der Bestimmungsgrenzen gemessen werden.

4 Humus

Die organische Bodensubstanz (Humus) hat entscheidenden Einfluss auf nahezu alle Bodeneigenschaften und -funktionen und spielt eine zentrale Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Eine nachhaltige Landwirtschaft ist ohne einen ausgeglichenen Humushaushalt nicht denkbar, denn die Bodenfruchtbarkeit wird wesentlich vom Gehalt an organischer Substanz im Boden bestimmt. Der Humus ist von zentraler Bedeutung für die Ausbildung einer stabilen Bodenstruktur durch Gefügebildung und Aggregation. Dadurch beeinflusst er wesentlich den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens, die Durchlüftung und mikrobielle Aktivität, die Infiltration und Speicherung von Wasser, die Stabilität der Bodenaggregate sowie die Befahrbarkeit und Bearbeitbarkeit des Bodens. Bodenschadverdichtung und Erosion können durch eine optimale Humusversorgung vermindert werden. Als wichtiger Wasserspeicher ist Humus auch hinsichtlich der Anpassung an Klimaextreme/-änderungen von großer Bedeutung. Zudem stellt die organische Bodensubstanz nicht nur eine Nahrungsquelle für Bodenorganismen, sondern auch eine langsam fließende Nährstoffquelle für die Pflanzen dar, da beim Abbau von Humusbestandteilen organisch gebundene Elemente (z.B. Stickstoff, Phosphor, Schwefel) in pflanzenverfügbare Verbindungen umgewandelt werden. Der Humus bindet austauschbar die für die Pflanzenernährung wichtigen Kationen und Anionen und schützt sie so vor Auswaschung, ein Vorgang, der insbesondere bei sandigen Böden von Bedeutung ist. Darüber hinaus steuert die organische Bodensubstanz aufgrund verschiedener Adsorptionsmechanismen die Auswaschung und Abbaurate von Pflanzenschutzmitteln und Umweltchemikalien. Neben der Bedeutung für die Fruchtbarkeit und Funktionalität von Böden stellt der Humus das größte terrestrische Kohlenstoffreservoir der Erde dar und spielt somit eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Klimaregulation (Scharlemann et al., 2014). Veränderungen der Bewirtschaftung und globale Umweltveränderungen können zu einem Rückgang der Humusversorgung führen. Es besteht daher die Notwendigkeit eines Monitorings der Humusentwicklung, d.h. die regelmäßige Erfassung von Humuskenngrößen wie den Gehalt organischen Kohlenstoffs (Corg) und Gesamt-Stickstoffs (Nt) in repräsentativen Acker- und Grünlandböden, um Rückschlüsse hinsichtlich der langfristigen Entwicklung der Humusversorgung von Ackerböden abzuleiten und Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

Die kontinuierliche Erhebung von Humuskenngrößen im BDF-Programm im Zeitraum 1986-2016 ermöglichte eine Analyse der Humusentwicklung von Standorten unter verschiedener landwirtschaftlicher Nutzung (Acker, Grünland, Sonderkulturen, wechselnde Acker-/Grünland-Nutzung). Die Ergebnisse zeigten ein standörtlich differenziertes Bild der Entwicklung der Corg- und Nt-Gehalte im Beobachtungszeitraum. In den 80 ackerbaulich genutzten BDF waren für einen Großteil der Standorte (64 %) keine wesentlichen Veränderungen der Corg-Gehalte ersichtlich (Abb. 28). Ein erkennbarer Rückgang der Corg-Gehalte wurde für 20 % der Acker-BDF festgestellt, für 16 % der Standorte zeigte sich ein Anstieg im Beobachtungszeitraum (Abb. 30). Im Mittel ergab sich eine nur sehr geringe Abnahme der Corg-Gehalte von 3 % (-0,57 mg g⁻¹) gegenüber dem Ausgangszustand.

Ein ähnliches Bild ergab sich für die 18 BDF unter Grünlandnutzung. Hier zeigte ebenfalls ein Großteil der Standorte (67 %) keine auffallenden Corg-Veränderungen, an jeweils 17 % der Standorte kam es zu einer Ab- bzw. Zunahme der Corg-Gehalte (Abb. 29 und Abb. 30). Im Mittel ergab sich im Beobachtungszeitraum keine signifikante Veränderung der Corg-Gehalte.

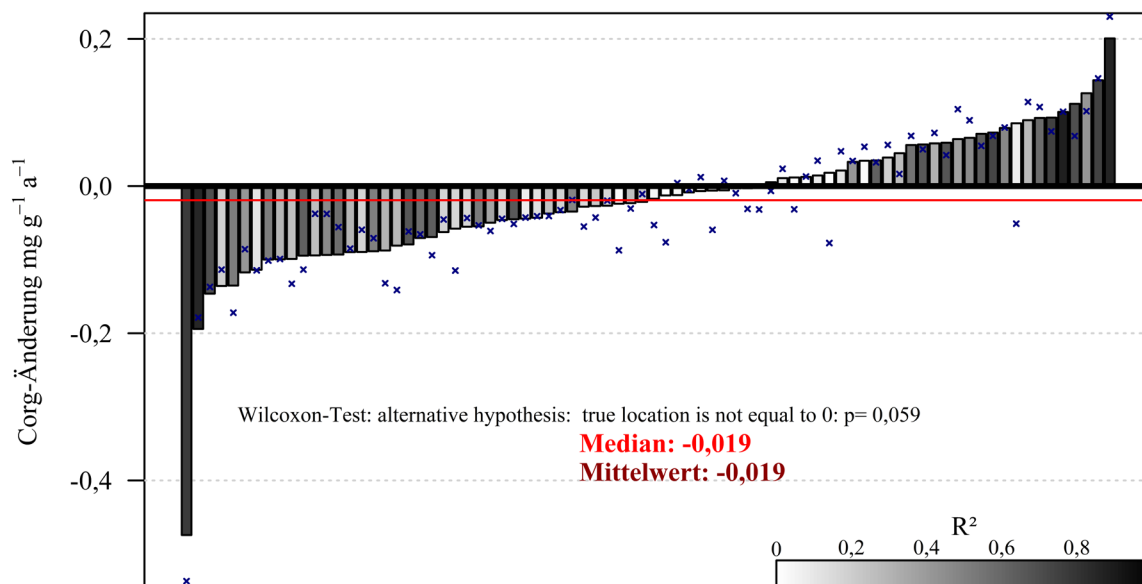


Abb. 28: Entwicklung der Corg-Gehalte als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg g}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert – Anfangswert an.

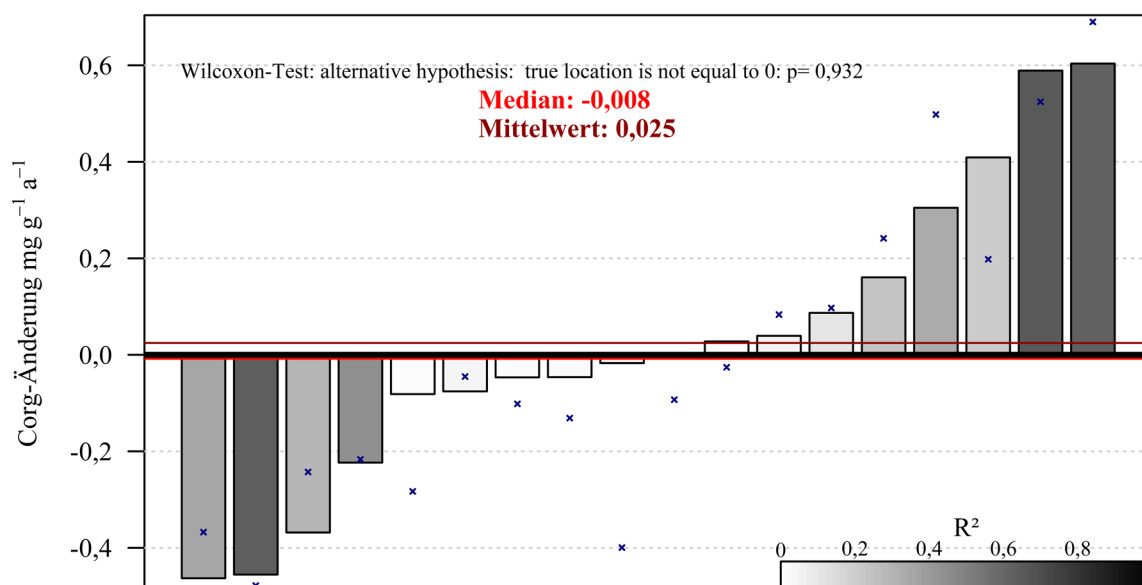


Abb. 29: Entwicklung der Corg-Gehalte als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg g}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert – Anfangswert an.

Die 12 Standorte mit wechselnder Acker-/Grünland-Nutzung zeigten in der Regel eine Zunahme der Corg-Gehalte nach Umstellung von Acker zu Grünland und einen Rückgang nach Grünlandumbruch.

Die Entwicklung der Nt-Gehalte war grundsätzlich verschieden von der Corg-Entwicklung. Für Acker-BDF ergab sich im Mittel eine leichte, aber signifikante Zunahme der Nt-Gehalte ($+0,06 \text{ mg g}^{-1}$) im Beobachtungszeitraum, wobei für den Großteil der Standorte (74 %) im Beobachtungszeitraum eine Zunahme der Nt-Gehalte zu beobachten war.

ebenfalls keine wesentlichen Änderungen ersichtlich waren. Allerdings war der Anteil von Standorten mit einem deutlichen Anstieg der Nt-Gehalte deutlich größer (20 %) als der Anteil mit einem Rückgang (6 %). Ähnlich verhielt es sich im Grünland: Nt-Zunahmen wurden für 33 % der Standorte ermittelt, ein Rückgang für lediglich 11 % der Standorte, der Großteil (56 %) zeigte keine wesentlichen Veränderungen. Aufgrund der entgegengerichteten Veränderungen von Corg- und Nt-Gehalten kam es zu einer deutlichen Abnahme des C/N-Verhältnisses von im Mittel -0,62 für Acker-BDF und -0,36 für Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum.

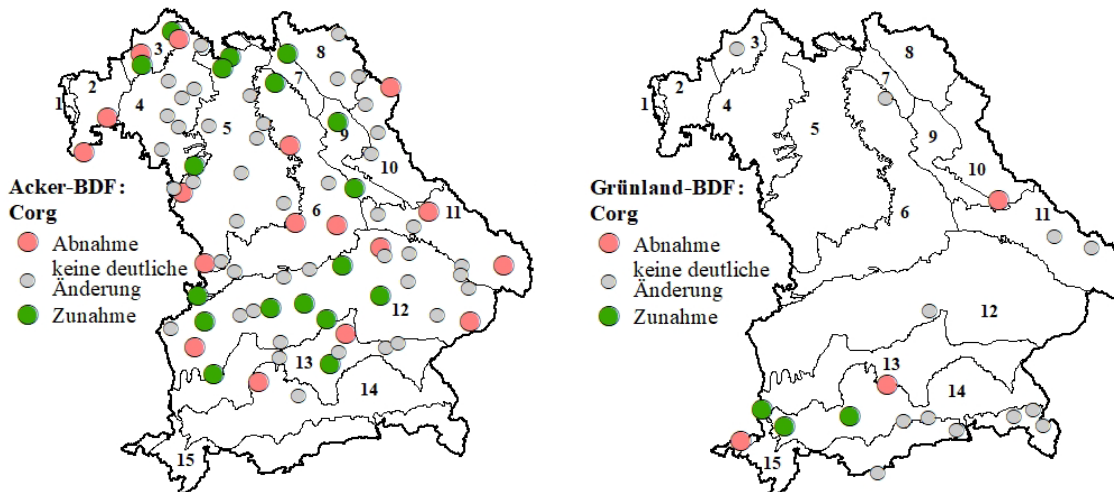


Abb. 30: Veränderung der Corg-Gehalte (mg g^{-1}) der Acker-BDF (links) und Grünland-BDF (rechts) über den Beobachtungszeitraum

Der beobachtete Corg- und Nt-Anstieg in einem Teil der Acker-BDF scheint vorwiegend auf veränderte Bewirtschaftungsweisen zurückzuführen sein. Als wichtigster Faktor für eine Zunahme der Corg- und Nt-Gehalte wurde der Anteil der Jahre mit Ökolandbau als Betriebsform am gesamten Beobachtungszeitraum identifiziert. Ursächlich für den Corg- und Nt-Anstieg in langfristig ökologisch bewirtschafteten Flächen könnte ein durch die Fruchtfolge bedingter höherer Eintrag bzw. eine veränderte Qualität (mehr wurzelbürtige organische Substanz) der organischen Substanz sein (Leifeld & Fuhrer, 2010; Kirchmann et al., 2016; García-Palacios et al., 2018; Hirte et al., 2021). Daneben scheint der Anteil der Jahre, in denen Stroh nach der Ernte auf dem Feld verblieb sowie eine Zunahme der organischen Düngung im Beobachtungszeitraum in Zusammenhang mit dem Corg- und Nt-Anstieg zu stehen. Dies bestätigt die Bedeutung der Rückfuhr entzogener organischer Substanz in Form von organischen Düngern und Stroh für einen ausgeglichenen Humushaushalt (Liu et al., 2014; Maillard & Angers, 2014; Kolbe et al., 2015). Zudem bestand ein Zusammenhang zwischen dem Zeitraum nach dem letzten Pflügen und dem beobachteten Corg- und Nt-Anstieg. Allerdings ist anzumerken, dass eine reduzierte Bodenbearbeitung meist nur in einer Umverteilung von Humus in obere Bodenschichten resultiert und diese Umverteilung aufgrund der isolierten Betrachtung der obersten 15 cm der Böden im BDF-Programm fälschlicherweise als Netto-Anstieg interpretiert würde (Powlson et al., 2014; Krauss et al., 2022). Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer durchgängigen Beprobung des Oberbodens sowie optimalerweise auch einer Erfassung des Unterbodens in Bodenmonitoringprogrammen.

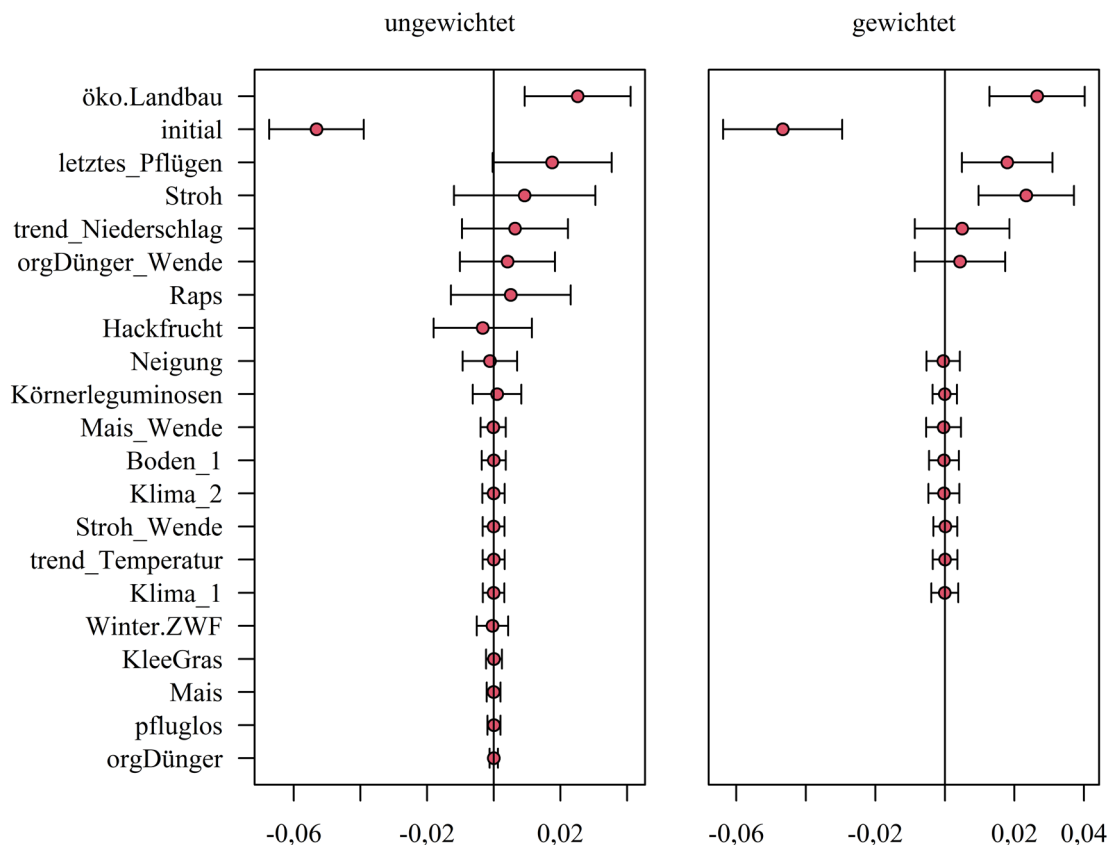


Abb. 31: Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten (standardisiert) für das ungewichtete und das mit dem RMSE gewichtete gemittelte Modell für die Entwicklung der Corg-Gehalte der bayerischen Acker-BDF (full average Methode).

Als potenzielle Ursache für den Corg- und Nt-Rückgang in einem Teil der Acker-BDF wurde ein hoher initialer Corg- bzw. Nt-Gehalt zu Beginn des BDF-Programms identifiziert (Abb. 31). Dies könnte darauf hindeuten, dass ein vorangegangener Grünlandumbruch und ein darauf erfolgter Humusverlust, der sich oft über mehrere Jahrzehnte erstrecken kann, die Humusdynamik dieser Standorte noch heute beeinflusst (Poeplau et al., 2011). Möglicherweise spielt hier aber auch der Klimawandel eine Rolle, da besonders Standorte mit hohen Corg-Gehalten von einem Abbau der organischen Substanz aufgrund der Temperaturerhöhung betroffen sein könnten. Ein Zusammenhang zwischen hohen initialen Corg-Gehalten und einem Corg-Rückgang in landwirtschaftlich genutzten Böden wurde auch in anderen Ländern und Regionen Mittel- und Nordeuropas gefunden (Bellamy et al., 2005; Goidts & van Wesemael, 2007; Saby et al., 2008; Goidts et al., 2009; Hanegraaf et al., 2009; Reijneveld et al., 2009; Guillaume et al., 2021). Ein vermuteter negativer Zusammenhang zwischen dem Anteil humuszehrender Kulturen wie Hackfrüchten (Kartoffeln, Zuckerrüben) und Mais in der Fruchtfolge und der Corg- und Nt-Entwicklung konnte nur tendenziell beobachtet werden. Da der Mais- und Hackfruchtanbau mit der Rückführung von organischen Düngern verbunden ist, ist eine losgelöste Betrachtung dieses Faktors im BDF-Programm nur bedingt möglich. Auch kann nicht geklärt werden, ob der Hackfruchtanteil oder die damit verbundene geringere Menge an Stroh bedeutsamer für die Entwicklung der Humusgehalte ist, da beide Faktoren ebenfalls zusammenhängen.

Für Grünland-BDF konnte aufgrund der geringen Stichprobenzahl keine detaillierte Untersuchung möglicher Einflussfaktoren auf die beobachteten Änderungen der Corg- und Nt-Gehalte durchgeführt werden. Nachweisbare Zusammenhänge mit den ermittelten Trends der Corg-Gehalte wurden lediglich für den Anteil an Jahren mit eingesetztem Mineraldünger (positiv) festgestellt sowie tendenziell eine negative Korrelation mit dem initialen Corg-Gehalt. Wie bereits für Ackerböden vermutet könnte auch hier ein Zusammenhang mit dem Klimawandel bestehen. Durch den allgemeinen Temperaturanstieg besteht die Gefahr eines langfristigen Humusabbaus aufgrund einer verstärkten Mineralisation der organischen Substanz (Kirschbaum, 1995; Knorr et al., 2005; Walker et al., 2018). Die Analyse der steuernden Faktoren der Humusentwicklung an den BDF-Standorten erbrachte keine Hinweise auf eine Beteiligung von Klimafaktoren an den beobachteten Corg- und Nt-Veränderungen. Das könnte allerdings auch auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass der Klimawandel sich auf alle BDF-Standorte in ähnlicher Weise in Form einer allgemeinen Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur sowie einem Rückgang der Niederschläge im Beobachtungszeitraum auswirkt und daher Klimafaktoren in den Modellen keine wesentliche Rolle spielen.

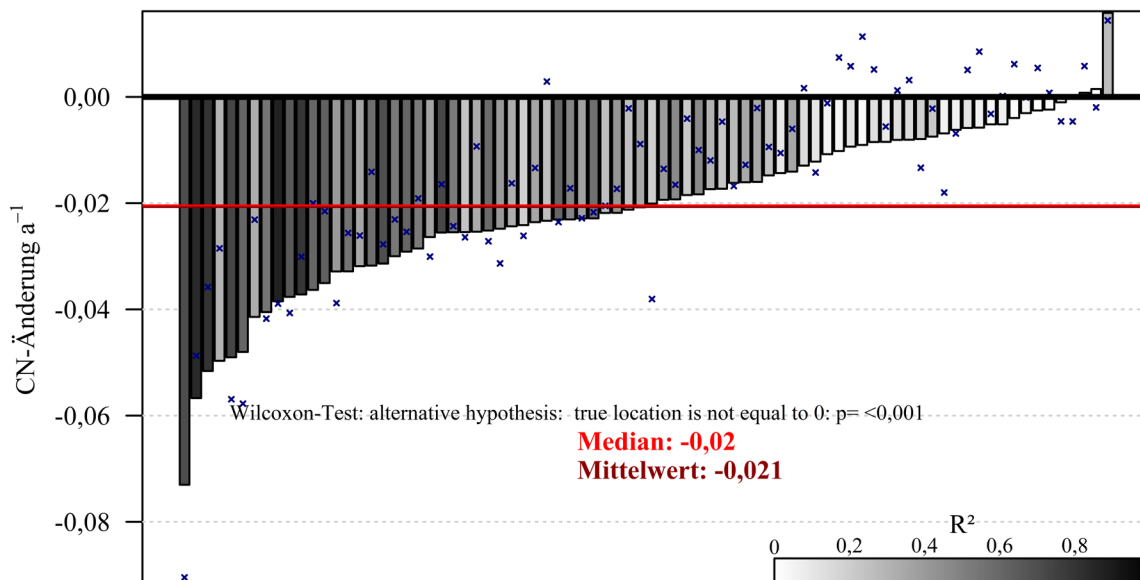


Abb. 32: Entwicklung des C/N-Verhältnisses als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum; unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert – Anfangswert an.

Eine deutliche Verengung des C/N-Verhältnisses, die sowohl für Acker- als auch Grünland-BDF beobachtet wurde, könnte ein erster Hinweis auf einen verstärkten Abbau der organischen Bodensubstanz im Zuge des Klimawandels sein (Abb. 32). Bei etwa der Hälfte der Acker-BDF war die Abnahme des C/N-Verhältnisses auf eine stärkere Abnahme von Corg im Vergleich zu Nt zurückzuführen. Dies könnte möglicherweise mit einem präferentiellen Abbau labiler partikulärer organischer Substanz (POM) bedingt durch die Temperaturerhöhung zusammenhängen, die sich durch ein weites C/N-Verhältnis auszeichnet (Cotrufo et al., 2019; van Wesemael et al., 2019; Peplau et al., 2021; Lavalée et al., 2019). Eine Ausweitung des Untersuchungsprogramms auf verschiedene (klimasensitive) Fraktionen der organischen Bodensubstanz bzw. mikrobiellen Kenngrößen könnte zukünftig wichtige Einblicke in die Humusdynamik von Acker- und Grünlandböden im Klimawandel ermöglichen (Just et al., 2021). Dennoch ist ein möglicher Beitrag des Klimawandels an den

beobachteten Humusveränderungen grundsätzlich nur schwer vom Einfluss anderer, kurz- bis mittelfristig wirkender Faktoren wie veränderten Bewirtschaftungsweisen zu trennen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im bisherigen Beobachtungszeitraum keine gravierenden Veränderungen der Humusentwicklung in landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns aufgetreten sind. Ein nennenswerter Rückgang der Humusgehalte wurde nur für einen relativ kleinen Anteil der BDF-Standorte festgestellt, wobei hier nicht Bewirtschaftungsfaktoren ursächlich sind, sondern vermutlich vorangegangene Landnutzungswechsel bzw. der Klimawandel. Angesichts eines potenziellen Humusabbaus im Zuge des Klimawandels besteht Bedarf für ein vorausschauendes Humusmanagement, um die Böden an den Klimawandel anzupassen und ihre Ertragsfähigkeit und Funktionalität sicherzustellen. Von zentraler Bedeutung ist dabei eine ausreichende Zufuhr organischer Substanz. Neben einer standortgerechten vielfältigen Fruchtfolge mit einem ausgewogenen Verhältnis von humusmehrenden und humuszehrenden Kulturen sind insbesondere die Belassung von Ernterückständen, der Zwischenfruchtanbau zur Gründüngung, Untersaaten sowie die Anwendung von organischen Düngern, insbesondere Stallmist, bewährte Möglichkeiten, um eine ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz sicherzustellen (West & Post, 2002; Freibauer et al., 2004; Liu et al., 2014; Poeplau & Don, 2015; Conant et al., 2017; Paustian et al., 2019; Ledo et al., 2020; Mayer et al., 2022). Daneben bieten zahlreiche innovative Ansätze wie Mischkultursysteme, Dauerkulturen, Agroforstsysteme und ganzheitliche Weidekonzepte nicht nur die Chance einer optimierten Humusversorgung und Bodenfruchtbarkeit, sondern möglicherweise auch weitere Vorteile hinsichtlich Ertragsstabilität, Biodiversität, Mikroklima, Tierwohl und Klimaresilienz. Regelmäßige Humusuntersuchungen sind dabei die Basis einer sicheren Bewertung und Optimierung der Humusversorgung.

5 Regenwürmer

Regenwürmer sind wichtige Nützlinge im Boden landwirtschaftlicher Nutzflächen, die durch ihre vielseitigen Leistungen die Bodenfruchtbarkeit verbessern (Bertrand et al. 2015, Blouin et al. 2013, Ehrmann 2015, Limtiri et al. 2014). Sie reagieren auf viele Faktoren (Bewirtschaftung, Standortbedingungen, Klima u.a.) und sind in Agrarökosystemen als praxisnahe, aggregierende Indikatoren (Paoletti et al. 1998, Fründ et al. 2011, Limtiri et al. 2014) für ein Bodenmonitoring geeignet (Pérés et al. 2011).

Nach 35 Jahre wird für 80 Acker-BDF, 18 Grünland-BDF und 7 Sonderkulturen-BDF in Bayern die langfristige Entwicklung der Regenwürmer unter dem Einfluss anthropogener und natürlicher Faktoren aufgezeigt. Diese Trendanalyse erfolgte über die Diversität (Shannon Index) der Regenwürmer und die Bestandsdichte der tiefgrabenden Zeigerart *L. terrestris*, da die von 1985 bis 2018 auf den BDF angewandte Austreibungsmethode für diese Indikatoren ausreichend robust ist. Um zukünftig einen besseren Erfassungsgrad zur Gesamtabundanz und -biomasse der Regenwürmer im Boden zu erzielen, wurde ab 2010 die Austreibungsmethode um eine Handauslese erweitert. Die Anwendung der Methodenkombination seit ca. 10 Jahren liefert fundierte Kennwerte zur Gesamtabundanz, -biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer für die landwirtschaftlichen Nutzungstypen. Zudem wurden die in der letzten Messkampagne mit der erweiterten Methode gewonnenen Abundanz- und Biomassedaten der Regenwürmer für Korrelationsanalysen und explorative Modellanalysen herangezogen, um die auf ihren Bestand wirkenden und steuernden Bewirtschaftungs- und Klimafaktoren zu ermitteln. Abschließend wurden daraus Empfehlungen zur gezielten Förderung von Regenwürmern und damit eines biologisch aktiven Bodens abgeleitet.

5.1 Acker

Insgesamt wurden 17 Regenwurmarten auf den seit 1985 beprobten Acker-BDF (96 Standorte) nachgewiesen. Davon traten 7 Arten mit einer hohen Stetigkeit auf, die von besonderer Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit sind. Von den restlichen 10, auf den Acker-BDF meist selten nachgewiesenen Regenwurmarten, gelten fünf auch in Deutschland als selten. Auf einem Feldstück kommen im Mittel 4 Regenwurmarten vor.

Als Kennwerte zur Regenwurmbesiedlung von bayerischen Äckern wurde mit der seit 2010 auf 80 Acker-BDF durchgeführten Methodenkombination eine durchschnittliche Siedlungsdichte der Regenwürmer (Abundanz) von 144 Individuen pro Quadratmeter und eine Regenwurmbiomasse von 46 g/m² ermittelt. Über die Austreibungsmethode wurden im Mittel ca. 25 % der Individuen der Regenwürmer und ca. 40 % der Regenwurmbiomasse erfasst. Ein Großteil wurde erst über die anschließende Handauslese gefunden. Wenngleich die Effektivität der Austreibungsmethode abhängig vom Standort, der Bodenfeuchte und der Bewirtschaftung im Acker stark variieren kann, so belegen die Ergebnisse dennoch die Wichtigkeit der Anwendung einer Methodenkombination.

Die Analyse der langfristigen Trendentwicklung der Regenwürmer, die ausschließlich über die Daten der Austreibungsmethode erfolgte, zeigte für die 80 durchgängig als Acker genutzten BDF eine positive Trendentwicklung in der Diversität der Regenwürmer, dargestellt über den Shannon-Index, als auch in der Abundanz von *Lumbricus terrestris* (Abb. 33). Für beide Indikatoren war dies signifikant (Wilcoxon-Test $p < 0,05$), wenngleich es für die Diversität nur knapp ausfiel. Ein positiver Bestandstrend über die vergangenen 35 Jahre wurde von *Lumbricus terrestris* auf insgesamt 56 Acker-BDF (70 %) beobachtet, davon ergab sich für 16 Acker-BDF (20 %) ein durch den linearen Trend gut erklärbarer Anstieg (Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$). Die Analysen zeigten deutlich, dass die Bodenbearbeitung

der entscheidende, die Zunahme von *Lumbricus terrestris* erklärende, Schlüsselfaktor unter Ackernutzung ist (Abb. 34). Insbesondere ein längerer zeitlicher Abstand zum letzten Pflugeinsatz wirkte sich günstig auf die Art aus.

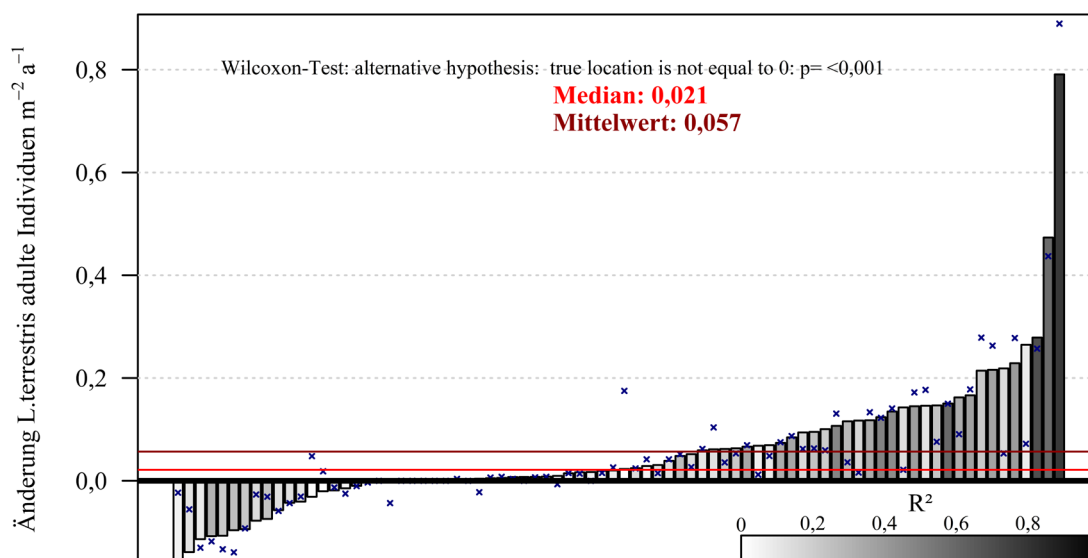


Abb. 33: Entwicklung der Abundanz adulter Individuen von *Lumbricus terrestris* als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in Individuen $m^{-2} a^{-1}$; unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x bedeutet die Differenz Endwert – Anfangswert

Zahlreiche Studien bestätigen eine positive Wirkung einer pfluglosen Bodenbearbeitung auf Regenwürmer und auf die tiefgrabende Art *Lumbricus terrestris* (Johnson-Maynard, et al 2007, Krück et al. 2001, Capelle et al. 2012, Pelosi et al. 2014, Ehrmann 2016, Briones & Schmidt 2017, Moos et al. 2017, Walter et al. 2017a). Die positiven Reaktionen sind ausgeprägter, wenn die pfluglose Bodenbearbeitung über eine längere Zeit erfolgt (>10 Jahre) und organisches Material wie Erntereste an der Bodenoberfläche verbleiben (Briones & Schmidt 2017). In Bayern stieg in den letzten 35 Jahren der Anteil der jährlich pfluglos bewirtschafteten Acker-BDF von unter 20 % im Jahr 1985 auf aktuell knapp 40 % an (vergl. Kapitel 1.3.3). Diese zunehmende pfluglose Bodenbearbeitung führte wahrscheinlich zu dem beobachteten Anstieg der Siedlungsdichte des tiefgrabenden Tauwurms *Lumbricus terrestris*. Für den Bodenschutz wurden also bereits positive Erfolge erzielt.

Dennoch sind unter den zukünftig zu erwartenden trockeneren und wärmeren Bodenbedingungen ungünstige Auswirkungen auf Regenwürmer und ihre Populationsgröße möglich (Johnston et al. 2018). So fanden die Zunahmen von *Lumbricus terrestris* auf den bayerischen Acker-BDF von der ersten (1985-1988) bis zur dritten (2000-2010) Probenahmeserie statt, während es danach zu keinem weiteren Anstieg kam, obwohl die Anzahl der pfluglos bearbeiteten Äcker weiter zunahm. Dies könnte ein Warnzeichen sein und weist auf die Notwendigkeit zur Vorsorge hin, um auf ggf. zukünftig auftretende ungünstige Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit zu reagieren bzw. um diese abzumildern.

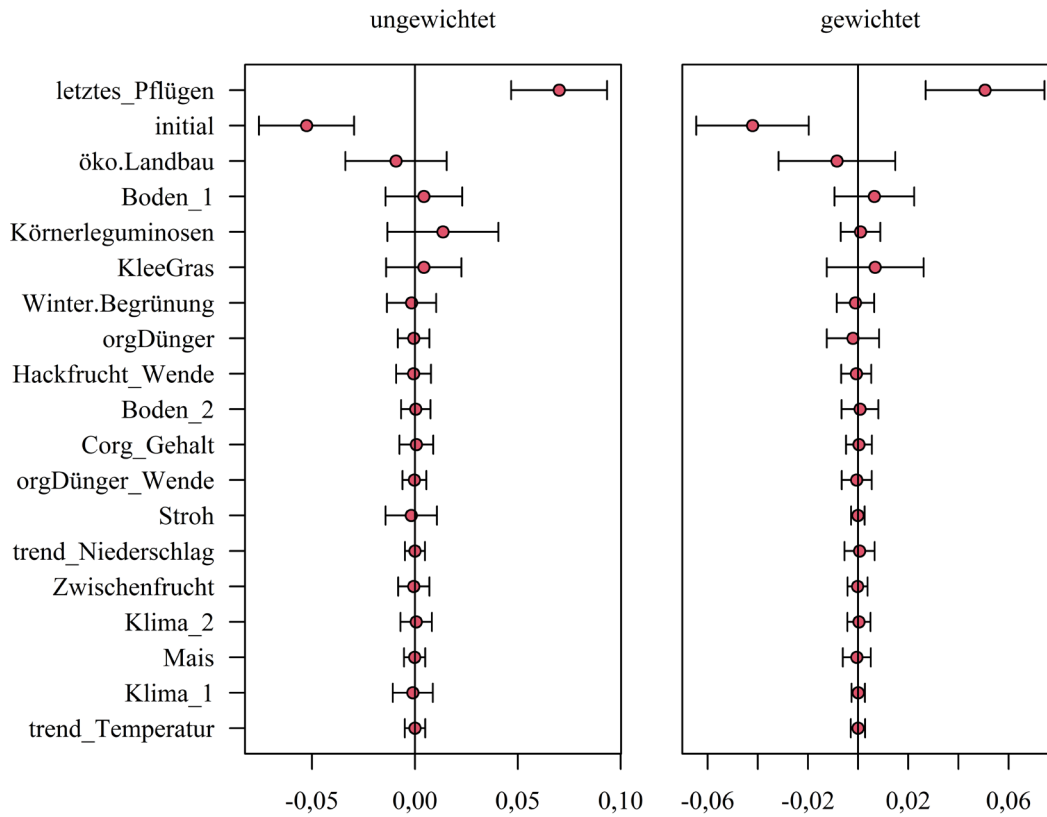


Abb. 34: Geschätzte Koeffizienten für die Änderung der Abundanz adulter Tiere von *Lumbricus terrestris* in Ackerböden mit Konfidenzintervallen für ein gemittelttes Modell (model selection averaging)

Anhand der seit 2011 in der 4. Probenahmeserie auf den Acker-BDF gewonnenen Regenwurmdaten (Austreibungsmethode und Handauslese) wurde eine Analyse zu den die Gesamtabundanz und -biomasse der Regenwürmer steuernden Einflussfaktoren durchgeführt. Diese ergab, dass vor allem der Anbau von Klee gras den Regenwurmbestand von Äckern steigern kann und ein längerer zeitlicher Pflugabstand sich vor allem positiv auf die Gesamtbio masse der Regenwürmer auswirkt (Abb. 35). Letzteres ist wahrscheinlich vor allem auf *Lumbricus terrestris* zurückzuführen, da diese Art besonders von einer pfluglosen Bodenbearbeitung profitiert (Briones & Schmidt 2017, Moos et al. 2017). Viele Studien belegen die positive Wirkung von Klee gras gemenge sowie von Luzerne gras auf Regenwürmer (Ehrmann 1996, Schmidt et al. 2001, Schmidt et al. 2003), deren Wirkung auch noch deutlich in der nachfolgenden Kultur erkennbar ist (Walter et al. 2020). Bereits 2 Jahre nach der Ansaat von Klee gras streifen auf einem Acker fanden Prendergast-Miller et al. (2021) eine um das vierfach höhere Regenwurmabundanz. Klee gras liefert somit günstige Lebensbedingungen für Regenwürmer und trägt zum Aufbau von Populationen bei.

Als weiterer den Regenwurmbestand in den bayerischen Ackerböden steuernder Faktor wurde zudem ein Standorteinfluss ermittelt. Von sandigen Böden mit geringerer Ertragsfähigkeit hin zu schluffigen, ertragsreicheren Böden nahm die Gesamtabundanz signifikant zu. Der in der Korrelationsanalyse (Kendall's Tau) festgestellte positive Zusammenhang der Regenwurmabundanz und -biomasse mit dem Corg-Gehalt der Acker-BDF deutet ebenfalls auf einen günstigen Einfluss von fruchtbaren Ackerböden mit guter Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit hin.

Die organische Düngung konnte in der Modellanalyse nicht als erklärender, den Regenwurmbestand beeinflussender, Faktor ermittelt werden. Als Folge der Korrelation der organischen Düngung mit dem Anbau von Hackfrüchten, könnte möglicherweise der positive Effekt einer organischen Düngung durch den negativen Einfluss eines Hackfruchtanbaus (mehr Bodenbearbeitung, geringerer Getreideanteil in der Fruchtfolge, weniger Erntereste) überdeckt sein. Viele Studien belegen die positive Wirkung einer organischen Düngung auf Regenwürmer (z.B. Whalen et al. 1998, Leroy et al. 2008, Sizmur et al. 2017, Burmeister et al. 2020), da verrottendes organisches Material eine Nahrungsressource für das Bodenleben darstellt. So gilt auch der Humuserhalt durch eine organische Düngung, wie er v.a. im ökologischen Landbau praktiziert wird, als ein entscheidender Faktor für die Erhaltung eines guten Regenwurmbestandes in landwirtschaftlich genutzten Böden (Blakemore 2018). Zudem fand sich in der Korrelationsanalyse (Kendall's Tau) ein signifikant positiver Zusammenhang der Regenwurmbiomasse von Äckern mit dem ökologischen Landbau.

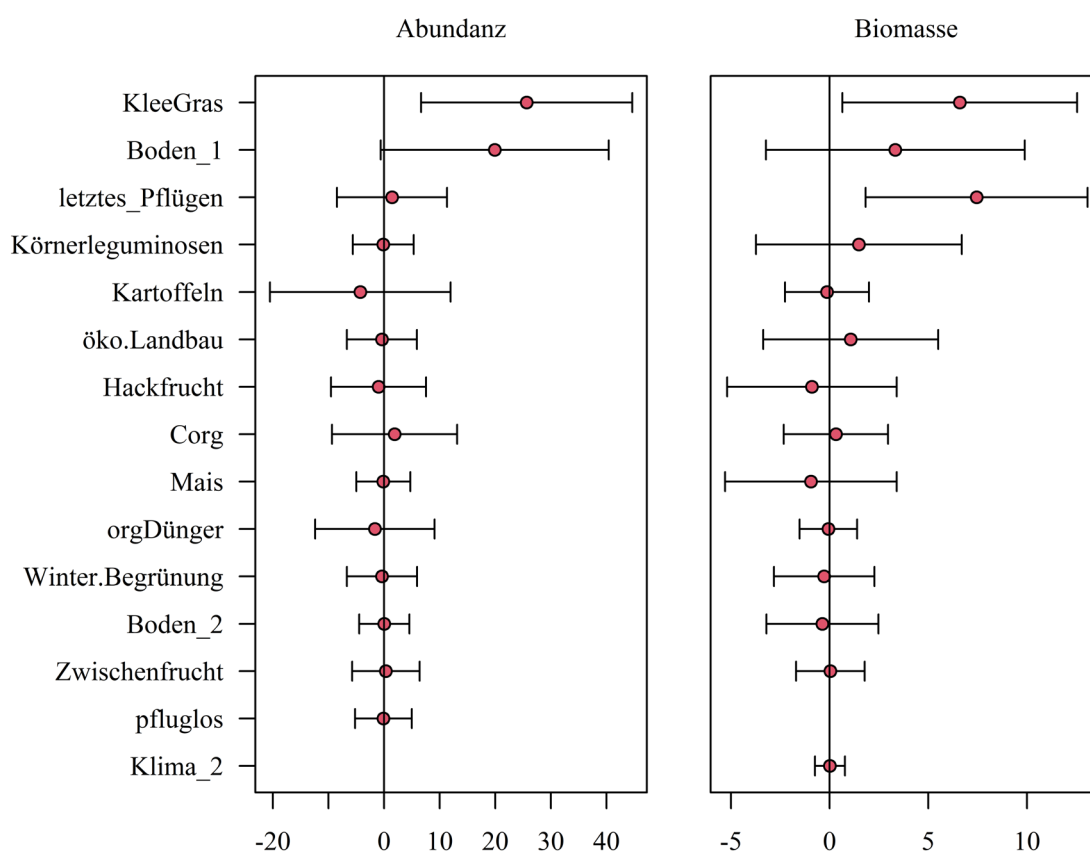


Abb. 35: Konfidenzintervalle der Faktoren der Modellierung (model selection averaging) für die Gesamtabundanz und Gesamtbiomasse der Regenwürmer im Acker (full averaged coefficients); Datengrundlage der 4. Probenahmeserie ab 2011 (Erfassungsmethode über Austreibungsmethode und ergänzender Handauslese)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es bei Regenwürmern auf den Acker-BDF zu einer insgesamt positiven Trendentwicklung seit 1985 kam. Dabei hatte der Rückgang der voll wendenden Bodenbearbeitung eine wesentliche Rolle. Dennoch sind im Hinblick auf die zukünftig zu erwartenden trockeneren und wärmeren Bedingungen im Rahmen des Klimawandels die bodenschonenden Bewirtschaftungsweisen auf den Äckern weiter

voranzutreiben, um einen guten Regenwurmbestand zu erhalten und die damit verbundenen funktionalen Leistungen für die Bodenfruchtbarkeit. Basierend auf den Ergebnissen der Korrelationsanalysen und der explorativen Modellanalysen zu den auf Regenwürmer wirkenden Einflussfaktoren können folgende Maßnahmen als besonders zielführend abgeleitet werden:

- pfluglose Bodenbearbeitung mit Streuauflage an der Bodenoberfläche, v.a. ein längerer Zeitabstand zum Pflügen
- ein vermehrter Anbau von Klee grasgemenge in der Ackerfruchtfolge
- Humuserhalt
- ökologischer Landbau

5.2 Grünland

Seit 1985 wurden insgesamt 20 Regenwurmarten im Boden der Grünland-BDF (20 Standorte) nachgewiesen. Davon traten 7 Arten mit einer hohen Stetigkeit auf. Unter den restlichen 13 auf den Grünland-BDF erfassten Regenwurmarten gelten sieben auch in Deutschland als selten. Im Mittel waren 6 Regenwurmarten auf einer Grünlandfläche feststellbar. Im Vergleich zum Acker kommen im Boden unter Grünland streubewohnende Arten mit einer höheren Stetigkeit vor.

Zur Erfassung des Regenwurmbestandes wurde ab 2010 auch auf den Grünland-BDF die Austreibungsmethode um eine Handauslese ergänzt. Im Vergleich zum Acker war im Boden unter Grünland ein höherer Anteil des Regenwurmbestandes über die Austreibungsmethode nachweisbar, im Mittel ca. die Hälfte der Individuen der Regenwürmer und 74 % ihrer Biomasse. Dennoch ist auch im Grünland für einen guten Erfassungsgrad der Regenwürmer die Anwendung einer Methodenkombination, bestehend aus einer Kombination von Austreibung und Handauslese, unerlässlich.

Die seit 2010 über die Methodenkombination auf den Grünland-BDF ermittelte Siedlungsdichte der Regenwürmer (Abundanz) lag im Mittel bei 261 Individuen pro Quadratmeter mit einer Regenwurmbiomasse von 127 g/m². Der Regenwurmbestand unter Grünland ist damit deutlich höher als unter einer Ackernutzung. Erfolgte auf einer BDF eine Landnutzungsänderung reagierte die Zeigerart *Lumbricus terrestris* i.d.R. von Acker zu Grünland mit einer positiven Bestandsentwicklung und umgekehrt.

Ähnlich wie für die Acker-BDF wurde die langfristige Entwicklung der Regenwürmer seit 1985 im Boden der Grünland-BDF über die Diversität der Regenwürmer (Shannon-Index) und die Bestandsdichte der tiefgrabenden Zeigerart *L. terrestris* aufgezeigt, da beide Indikatoren mit der seit 1985 durchgehend angewandten Austreibungsmethode ausreichend robust erfasst werden. Die seit 2010 über die Handauslese erfassten Regenwurmdaten blieben bei der langfristigen Trendanalyse unberücksichtigt.

In den vergangenen 35 Jahren war keine signifikante Trendentwicklung weder in der Diversität der Regenwürmer noch in der Abundanz der Zeigerart *Lumbricus terrestris* auf den 18 durchgängig als Grünland genutzten BDF feststellbar. Die Anzahl der BDF für die ein zu- oder abnehmender Trend auftrat, hielten sich ungefähr die Waage. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die Anzahl von 18 Grünland-BDF, die überwiegend im Alpenvorland und den Mittelgebirgen liegen, wahrscheinlich keine ausreichend repräsentative Anzahl und Verteilung für Bayern darstellen, um gesicherte Aussagen über einen allgemein gültigen Trend für das Grünland seit 1985 treffen zu können. Dennoch liefern sie wichtige Hinweise.

Auffallend war, dass im Mittel der Grünland-BDF, ähnlich wie auf den Acker-BDF, von der ersten (1985 - 1988) über die zweite (1989 - 1999) bis zur dritten (2000 - 2010) Probenahmeserie ein deutlicher Anstieg der Siedlungsdichte der Zeigerart *Lumbricus terrestris* zu beobachten war (Abb. 36). In der Folge kam es allerdings von der dritten zur vierten Probenahmeserie zu einem deutlichen Bestandsrückgang, der dazu beitrug, dass bezogen über den gesamten Beobachtungszeitraum keine über den linearen Trend gut erklärbare Veränderung nachweisbar war. Dieser Effekt zeigte sich auch für die Diversität der Regenwürmer, wenngleich in schwächerer Ausprägung. Auf zwei Grünland-BDF, die von 2012 bis 2021 jährlich untersucht wurden, zeigt sich ein kontinuierlich voranschreitender Rückgang der Zeigerart. Jährliche Erfassungen auf Intensiv-BDF können somit dazu dienen, Bestandsveränderungen, die in einem deutlich längeren zeitlichen Abstand beobachtet werden, besser einzuordnen. Zudem lassen sich damit kurzfristige Veränderungen bzw. Populationschwankungen der Regenwürmer klarer von langfristigen Trends differenzieren.

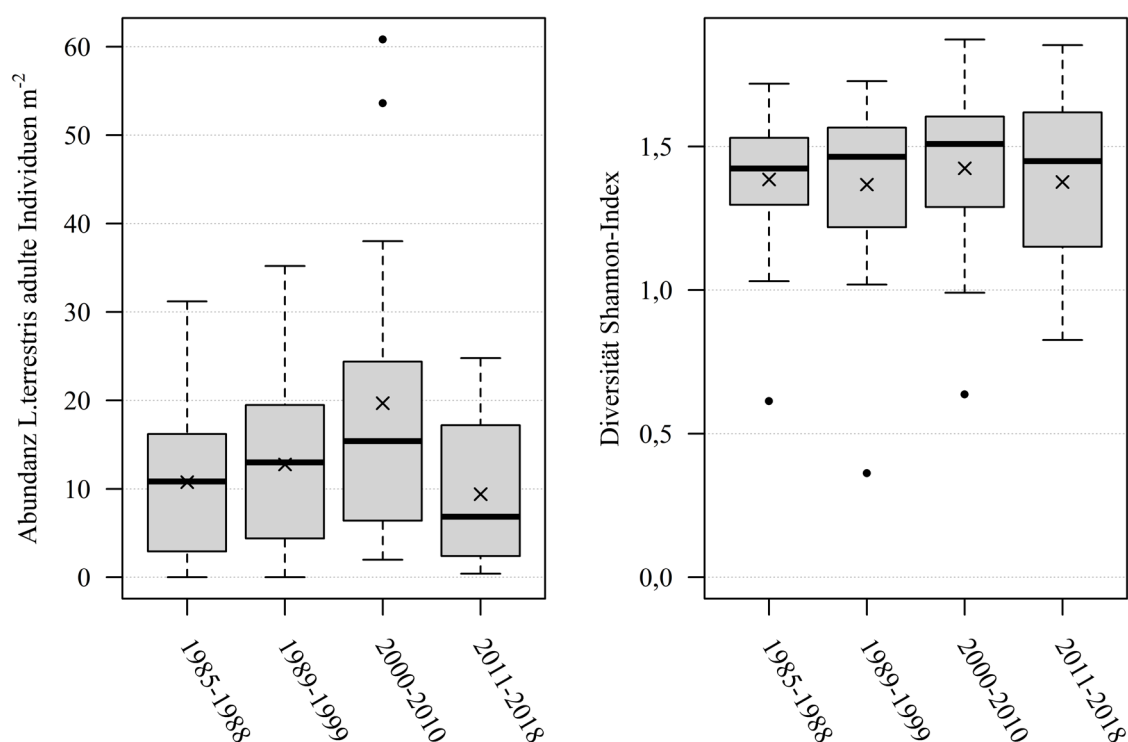


Abb. 36: Durchschnittliche Abundanz (Individuen m⁻²) adulter Tiere von *Lumbricus terrestris* (links) und der Diversität der Regenwürmer auf den Grünland-BDF in Bayern von der 1. bis zur 4. Probenahmeserie

Für den zunächst erfolgten Bestandsanstieg von *Lumbricus terrestris* auf den Grünland-BDF bis zur dritten Probenahmeserie ist ein Einfluss mehrerer Faktoren wahrscheinlich, die sich möglicherweise in ihrer Wirkung addieren. Einerseits wird die organische Düngung diskutiert, da in der Korrelationsanalyse zu den die Regenwürmer beeinflussenden Faktoren ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der Regenwurmbiomasse und der organischen Düngung gefunden wurde (Abb. 37). Zudem wird ein günstiger Einfluss von milden Wintern als Folge des Klimawandels vermutet. Vor allem in den höher und kühler gelegenen Grünland-BDF (Alpenvorland, Mittelgebirgen) könnte der beobachtete Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur um 1,3°C (s. Band 1, Kap. 5.4.3.1) positiv die Aktivität von

Lumbricus terrestris beeinflusst haben, da die Bodentemperatur ein die Regenwurmbundanz und -biomasse bestimmender Einflussfaktor im Dauergrünland ist (Kanianska et al. 2016).

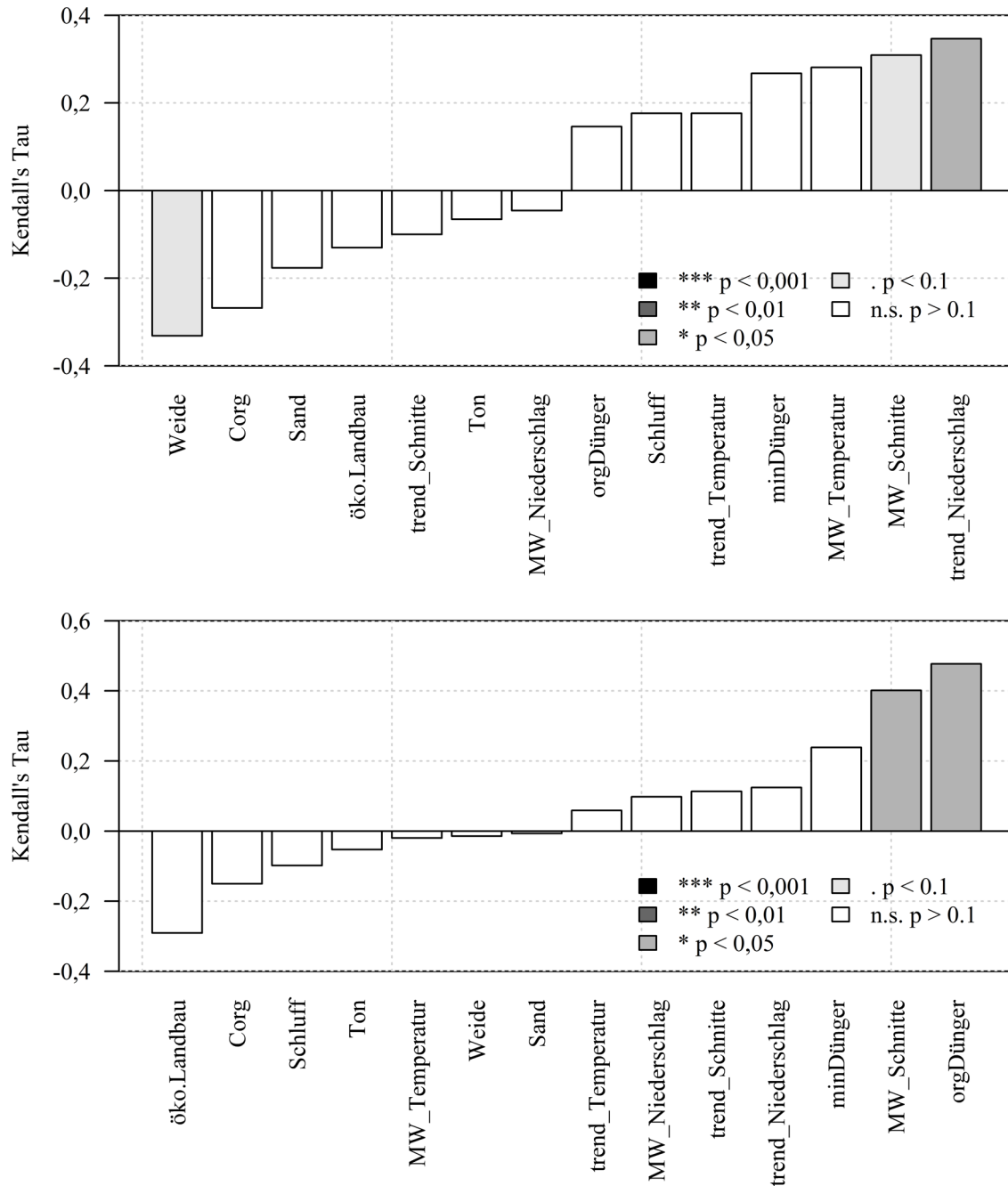


Abb. 37: Rangkorrelationskoeffizient (Kendall's Tau) für den Zusammenhang der von 2011 bis 2018 auf den Grünland-BDF ermittelten Regenwurm-Gesamtbandanz (oben) und Regenwurm-Gesamtbiomasse (unten) mit den ausgewählten Variablen (Farbskala nach p-Wert)

Als Ursache für den im letzten Jahrzehnt, von der dritten zur vierten Probenahmeserie, beobachteten Bestandsrückgang von *Lumbricus terrestris* auf den Grünland-BDF wird eine zunehmende Trockenheit diskutiert, da Regenwürmer von steigenden Temperaturen als Folge des Klimawandels nur bei ausreichend hoher Bodenfeuchte profitieren (Singh et al. 2019). In der Korrelationsanalyse (Kendall's Tau) fand sich auch ein signifikant positiver Zusammenhang der Regenwurmabundanz bei im Beobachtungszeitraum von zehn Jahren weniger stark abnehmenden Niederschlägen (Abb. 37). Extreme Trockenphasen wie Dürre können sich schädlich auf Regenwurmgemeinschaften auswirken (Singh et al. 2019), und es kann Jahre dauern bis sich eine Regenwurmpopulation davon erholt (Ehrmann 2012). Zukünftige Klimaszenarien mit stark verringerten Niederschlägen im Sommer lassen tendenziell eine geringere Häufigkeit aktiver Regenwürmer im Spätsommer und Herbst erkennen (Singh et al. 2021). Unter extremen Trockenbedingungen gewinnt vermutlich die Vielfalt und Zusammensetzung der Pflanzenarten im Grünland für Regenwürmer an Bedeutung. Günstig auf *Lumbricus terrestris* wirken sich Leguminosen (Milcu et al. 2008, Singh et al. 2021) sowie v.a. in Dürreperioden kleine Pflanzenarten mit einem geringen Deckungsgrad aus (Mariotte et al. 2016).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zunächst eine positive Entwicklung der Regenwürmer im Grünland erfolgte, vermutlich aufgrund von milderem Wintern und durch organische Düngung. Im letzten Jahrzehnt fiel der Regenwurmbestand der tiefgrabenden Art allerdings auf das Ausgangsniveau zurück, möglicherweise als Folge von zunehmenden Trockenperioden. Saisonal unterschiedliche Effekte sind ebenfalls möglich. Zukünftig gilt es, die Herausforderungen des Klimawandels anzunehmen, um ungünstige Effekte auf den Regenwurmbestand und deren Leistungen im Boden zu vermeiden. Resilientere Bedingungen könnten möglicherweise eine höhere Pflanzenartenvielfalt im Grünland, nicht nur für die Biodiversität, sondern auch für die Regenwürmer im Boden, bieten.

5.3 Sonderkulturen

Die Anzahl von nur 7 beprobten Sonderkulturen-BDF (3 Wein-, 3 Hopfen- und 1 Obst-BDF) ist bei weitem nicht ausreichend, um repräsentative Kennwerte für Regenwürmer zu ermitteln oder den Entwicklungstrend für den Nutzungstyp repräsentativ abzubilden. Vielmehr liefert diese geringe BDF-Anzahl erste Anhaltspunkte.

Auf den Sonderkulturen erfolgte auch seit 2010, ergänzend zur Austreibung, eine Handauslese, um den Erfassungsgrad des Regenwurmbestandes zu optimieren. Im Boden der Sonderkulturen war mit der Methodenkombination im Mittel die geringste Abundanz (61 Individuen/m²) und Artenvielfalt (3 Arten) der Regenwürmer feststellbar. Die durchschnittliche Bestandsdichte der tiefgrabenden Art *Lumbricus terrestris* lag dort allerdings deutlich höher als bei den Acker-BDF. Wahrscheinlich profitiert die Art in den Sonderkulturen von der Bodenruhe auf den Wegen zwischen den Anbaureihen. Dadurch erreicht die Gesamtbio-masse der Regenwürmer mit im Mittel 43 g/m² unter Sonderkulturen fast den durchschnittlichen Wert wie auf den Acker-BDF. Aufgrund der höheren Dominanz von *Lumbricus terrestris* war in den Sonderkulturen der durchschnittliche Erfassungsgrad über die Austreibungsmethode mit 61 % vergleichsweise gut.

Die langfristige Trendanalyse der Regenwürmer auf den Sonderkulturen, die wie bei den Acker- und Grünland-BDF ausschließlich mit den Daten der Austreibungsmethode erfolgte, lässt eine positive Bilanz zu. Auf keiner der sieben BDF kam es zu einem erkennbaren Rückgang, weder in der Abundanz der tiefgrabenden Zeigerart *Lumbricus terrestris*, noch

in der Diversität der Regenwürmer. So war auf allen sieben Sonderkulturen-BDF zumindest ein geringer positiver Bestandstrend für *Lumbricus terrestris* feststellbar (s. Beispiel für Wein in Abb. 38). Für die Diversität traf dies für fünf Sonderkulturen-BDF zu. Diese positive Entwicklung ist wahrscheinlich auf eine zunehmend bodenschonende und humusmehrende Bewirtschaftung zurückzuführen. So deuten die Bewirtschaftungsdaten der Sonderkulturen vermehrt auf eine Winterbegrünung, die Anwendung von Mulchsaatverfahren und organische Düngung mit Rebhäcksel hin - Maßnahmen, die auch positiv auf den Erosionsschutz wirken.

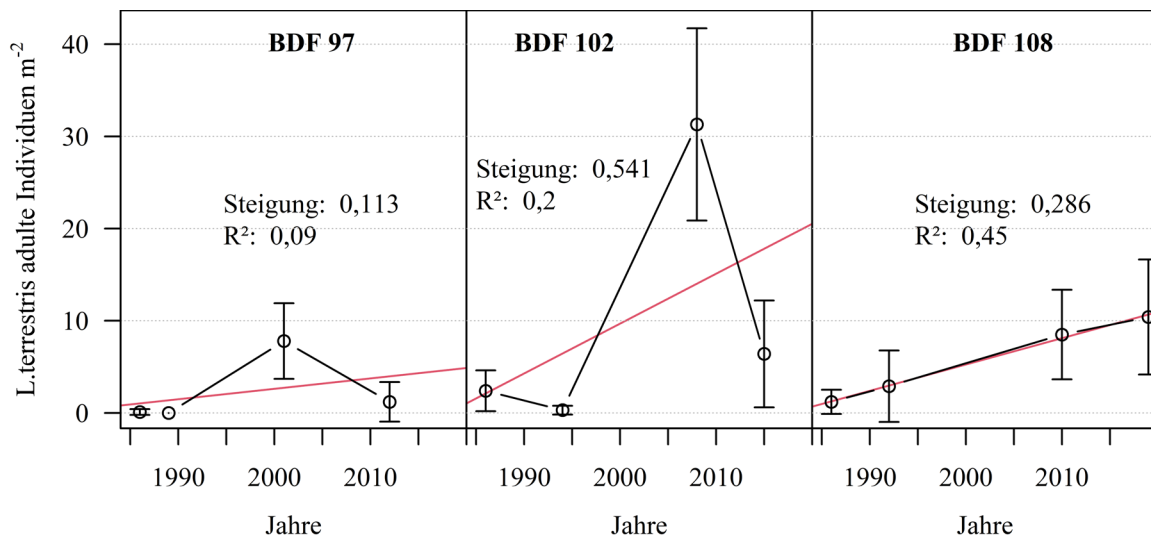


Abb. 38: Trendentwicklung der Abundanz adulter Tiere der Zeigerart *Lumbricus terrestris* (Individuen/m²), für die 3 Wein-BDF (BDF 97,102,108) von der 1. bis 4. Probenahmeserie. Je Probenahmetermin ist der Mittelwert aus 10 Stichproben mit Standardabweichung angegeben, rot eingezeichnet ist die berechnete lineare Trendlinie.

Die geringe Regenwurmabundanz und -artenvielfalt unter Sonderkulturen ist einerseits eine Folge der flachgründigen, steilen und südexponierten Standorte der Weinbauflächen, die Regenwürmern ungünstige Lebensbedingungen bieten. Zum anderen spielt vermutlich die Kupferanreicherung im Boden eine Rolle. Die Kupfergehalte auf den Hopfen-, Obst-, Wein-BDF liegen fast durchwegs über den jeweiligen Vorsorgewerten und auf allen 7 Sonderkultur-BDF war ein Anstieg des Kupfergehaltes im Boden über die 35 Jahre zu beobachten, wengleich die ausgebrachten Mengen im Rahmen von Pflanzenschutzmittelbehandlung in den letzten Jahren zurückgingen (s. Band 3: Schadstoffe). Eine Kupferanreicherung kann zu Bestandsrückgängen bei Regenwürmern führen (Paoletti et al. 1998, Eijsackers et al. 2005, Riepert 2009, Jänsch & Römbke 2009), ihre Grabaktivität mindern (Eijsackers et al. 2005) und die Biodiversität verringern (Jänsch & Römbke 2009, Riepert 2009). Insbesondere endogäische Regenwurmarten reagieren empfindlich auf eine Kupferbelastung (Paoletti et al. 1998, Riepert 2009). Ein erstes Anzeichen könnte die geringe Artenvielfalt der Regenwürmer auf den BDF-Sonderkulturen sein. Auf zwei Hopfen-BDF waren über den gesamten Beobachtungszeitraum keine endogäischen Arten nachweisbar.

Aufgrund der im Rahmen des Klimawandels zunehmend zu erwartenden trockeneren und wärmeren Bodenbedingungen sowie unter Berücksichtigung der Kupferbelastung ist bei

Sonderkulturen die Anwendung von humusmehrenden, bodenschonenden Praktiken sehr wichtig, wie z.B. eine Bodenbedeckung durch Begrünung, Strohbedeckung und organische Düngung. Dadurch können größere Regenwurmpopulationen aufgebaut werden (Pères et al. 1998, Vrsic 2011, Paoletti et al. 1998), die wahrscheinlich zudem aufgrund der bereitgestellten günstigeren Lebensraumbedingungen mit einem guten Nahrungsangebot resilienter sind. Auch eine ökologische Bewirtschaftung z.B. im Obstbau kann ungünstige Umwelteinflüsse im Vergleich zu einer konventionellen Bewirtschaftungsweise reduzieren (Castro et al. 2019).

6 Vegetation

Die spontan auftretende Vegetation auf Ackerflächen, die sogenannte ‚Ackerwildkraut-Flora‘ oder auch ‚Segetal-Flora‘, hat Bedeutung in verschiedener Hinsicht. Bei Landwirten sind manche Arten, v.a. der Gräser, gefürchtet als Konkurrenz der Nutzpflanzen um die standörtlichen Ressourcen wie Nährstoffe, Wasser oder Licht. Im Gegensatz dazu wird die Segetal-Flora von Naturschützern als wertvoll angesehen. Sie ist Teil der allgemein bedrohten Biodiversität und unterliegt seit Jahrzehnten einem starken Rückgang (z.B. Hilbig 1987, Hilbig & Bachthaler 1992, Korneck et al. 1998, Schumacher & Schick 1998).

Die Segetal-Flora trägt zu verschiedenen ökosystemaren Dienstleistungen bei, z.B. dient sie vielen Insektenarten als Futterquelle (Blaix et al. 2018). Außerdem können die Ackerwildkraut-Arten als Indikatoren für verschiedene Parameter dienen, die bei physikalisch-chemischen Messungen einen großen Aufwand bedeuten würden (Ellenberg et al. 1991).

Deshalb soll im Folgenden dargestellt werden, wie sich die Diversität der Ackerwildpflanzen in den vergangenen 35 Jahren auf den Acker-BDF entwickelt hat. Im Mittelpunkt stehen dabei die Artenzahlen in den Bodendauerbeobachtungs-Flächen.

6.1 Methoden

Für die vegetationskundliche Datenerhebung wurde die Grundfläche von 1.000 m² jeweils in vier Teilparzellen von 250 m² unterteilt. Zur Untersuchung der Vegetation der BDF wurden Vegetationsaufnahmen durchgeführt: gemäß des Verfahrens von Braun-Blanquet (1964) wurden alle Arten der höheren Blütenpflanzen erfasst und ihre jeweiligen Deckungsgrade nach einer 7-teiligen Skala (Tab. 14) geschätzt. Für die Deckungsgrad-Stufen wurden Mittelwerte festgelegt, die in die quantitativen Analysen eingingen. Alle vier Teilparzellen wurden vollständig beprobt.

Tab. 14: Schätzskala der Aufnahmemethode von Braun-Blanquet (1964), hier für Vegetationsaufnahmen in Acker- und Sonderkulturflächen angewandt.

Stufen	Deckungsgrad in % bzw. Abundanz	Mittelwert (%)
r	1 - 3 Exemplare ('rarus' = selten)	0,05
+	mehr als 3 Exemplare, Deckung < 1%	0,55
1	1 % - 5 % Deckung	3
2	5 % - 25 % Deckung	15
3	25 % - 50 % Deckung	37,5
4	50 % - 75 % Deckung	62,5
5	75 % - 100 % Deckung	87,5

Bei jedem Beprobungsdurchgang wurde die Fläche zum annähernd gleichen phänologischen Zeitpunkt aufgenommen. Die Aufnahmezeitpunkte lagen auf Ackerflächen, abgestimmt auf die angebaute Ackerfrucht, vor der Ernte. In den Sonderkulturen wurden die Aufnahmen etwa alle drei Jahre wiederholt, auf den Ackerflächen in einem Zyklus von etwa 5 Jahren seit Beginn der BDF (1985).

Die Nomenklatur der höheren Pflanzenarten folgt Wisskirchen & Haeupler (1998). Die Gattung *Taraxacum* wurde allerdings abweichend nach Oberdorfer (1979) bearbeitet (*Taraxacum officinale*-Gruppe).

Gleichzeitig mit den Vegetationsaufnahmen wurden neben den Vegetations-Daten und den üblichen Meta-Daten (z.B. Bearbeiter und Datum) weitere, auswertungsrelevante Daten erhoben: In den Vegetationsaufnahmen von Äckern und Sonderkulturen wurden die Arten nach den Kategorien 'Kulturart', 'Kulturdurchwuchs' und 'Kulturbegleiter' getrennt erfasst. Im Weiteren wurden auf Äckern und in den Sonderkulturen nur die spontan wachsenden Pflanzen als Vegetation bezeichnet und untersucht (Van der Maarel 2005).

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Entwicklung der Artenzahlen

Aus Abb. 39 geht hervor, dass die mittleren Artenzahlen (für alle Acker-BDF) seit 1985 im ständigen Rückgang begriffen sind. Während die mittleren Artenzahlen zu Beginn des BDF-Programmes noch bei ca. 10 lagen, sind sie zuletzt auf ca. 8 gesunken.

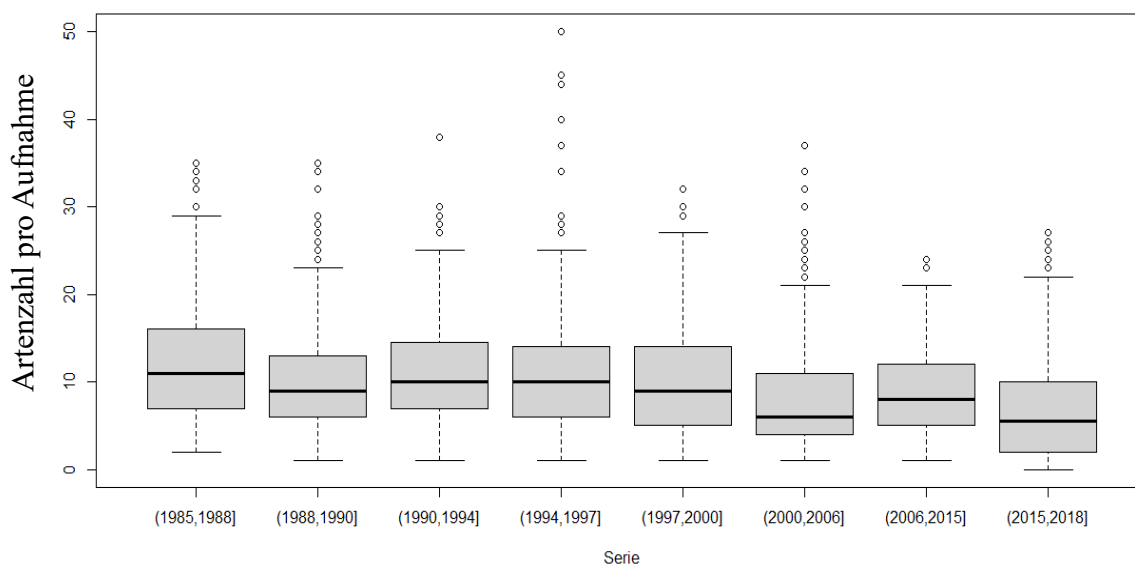


Abb. 39: Artenzahlen für alle Acker-BDF im Laufe der Zeit. Anzahl der untersuchten BDF: 1985-1988: 80, 1988-1990: 80, 1990-1994: 80, 1994-1997: 79, 1997-2000: 67, 2000-2006: 50, 2006-2015: 57, 2015-2018: 64

Damit reihen sich die Ergebnisse in einen allgemeinen Trend ein, der in Mitteleuropa schon seit den 1950er Jahren anhält, als der Strukturwandel und die technische Modernisierung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung begannen (Meyer et al. 2013). Dieser Trend scheint ungebrochen zu sein.

In der obigen Abb. 39 wurde gezeigt, dass die Artenzahlen für alle Acker-BDF zusammen im Laufe der Jahrzehnte abnehmen. Dabei wurden die einzelnen Kulturarten nicht unterschieden. Wenn man diesen Schritt jedoch unternimmt, zeigt sich, dass sich die Kulturarten bezüglich der Artenzahlen durchaus unterscheiden: Während die Kulturarten Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrübe im Bereich von 8-8,5 Arten pro Aufnahme liegen, ist der Wert bei Winterraps, Kartoffeln, Silomais und Hafer im Bereich 10,5-14 (dies allerdings bei z.T. niedrigen Aufnahmezahlen für die einzelnen Kulturarten).

Dagegen weisen die BDF-Weinanbauflächen und Obst mit über 20 spontan auftretenden Pflanzenarten recht hohe Zahlen auf. Allerdings muss man einschränkend bemerken, dass es für Obst (1) und Wein (3) nur sehr wenige Bodendauerbeobachtungsflächen gibt. Dort sind allerdings die Artenzahlen über Jahrzehnte hinweg konstant hoch.

6.2.2 Gewinner und Verlierer im Laufe der Jahrzehnte

In der Tab. 15 sind einige Pflanzenarten aufgelistet, die markante Änderungen in der Häufigkeit im Laufe der Jahrzehnte erkennen lassen. Dabei wurde die Häufigkeit des Vorkommens in den Vegetationsaufnahmen aller Acker-BDF aus den Zeiträumen 1986-2000 (n = 1726) und 2001-2014 (n = 508) miteinander verglichen und in der Differenz als Prozentpunkte mit negativem oder positivem Vorzeichen dargestellt. In der Tabelle sind die 13 Pflanzenarten mit den höchsten Verlusten sowie die fünf Arten mit den größten Zugewinnen aufgelistet. Außerdem wurden noch drei weitere für den Ackerbau bedeutsame Arten im mittleren Bereich beigelegt.

Diese kurze Liste repräsentiert in den Anteilen von ab- und zunehmenden Pflanzenarten die Gesamttrends von allen in den BDF-Ackerflächen gefundenen Pflanzenarten, d.h. es gibt insgesamt mehr ‚Verlierer‘ als ‚Gewinner‘.

(Die Zuordnung von Pflanzenarten als ‚Leitunkraut im Getreide‘ wurde übernommen aus Gehring & Thyssen 2019.)

In der Tab. 15 sind einige Pflanzenarten aufgelistet, die markante Änderungen in der Häufigkeit im Laufe der Jahrzehnte erkennen lassen. Dabei wurde die Häufigkeit des Vorkommens in den Vegetationsaufnahmen aller Acker-BDF aus den Zeiträumen 1986-2000 (n = 1726; aus 80 verschiedenen Bodendauerbeobachtungsflächen) und 2001-2014 (n = 508; aus 74 BDF) miteinander verglichen und in der Differenz als Prozentpunkte mit negativem oder positivem Vorzeichen dargestellt. In der Tabelle sind die 13 Pflanzenarten mit den höchsten Verlusten sowie die fünf Arten mit den größten Zugewinnen aufgelistet. Außerdem wurden noch drei weitere für den Ackerbau bedeutsame Arten im mittleren Bereich beigelegt.

Anhand der Tab. 15 können mehrere Trends und Zusammenhänge verdeutlicht werden:

Unter den vier Arten mit den stärksten Abnahmen sind drei relativ **kleinwüchsige** Pflanzenarten zu finden (Acker-Stiefmütterchen, Vogelmiere, Acker-Vergissmeinnicht). Diese haben es besonders schwer in der Konkurrenz mit den Kulturarten und anderen Segetal-Arten, weil sie nur einen schlechten Zugang zu den Ressourcen (v.a. Licht) haben. In hochwüchsigen Mais-Kulturen beispielsweise kommt am Boden nur wenig Licht an.

Gehring & Thyssen (2019) benennen in einer LfL-Broschüre 16 Pflanzenarten bzw. -Gattungen als ‚**Leitunkraut** im Getreide‘. Von diesen sind acht Arten gemäß unseren Untersuchungen als (stark) abnehmend zu betrachten. Die Gründe dafür sind nicht bekannt. Möglicherweise kommt den Bekämpfungsmaßnahmen dabei eine wichtige Rolle zu (Diese Aussage ist nicht trivial, denn der Klimawandel könnte in mancherlei Hinsicht eine deutlich größere Rolle spielen als die landwirtschaftliche Bekämpfung).

Der **Ackerfuchsschwanz** (als weiteres Leitunkraut) ist dagegen offensichtlich in Zunahme begriffen.

Die **Hühnerhirse** (*Echinochloa crus-galli*) dagegen verzeichnet die stärkste Zunahme. Es handelt sich um eine hochwüchsige Grasart, die nicht nur auf Ackerflächen, sondern z.B. auch an Straßenrändern immer häufiger gefunden werden kann. Sie ist unter den gegebenen Bedingungen offensichtlich sehr konkurrenzkräftig. Sie kommt weltweit in warmen Gebieten vor und wurzelt tief (Oberdorfer 1994). Deshalb könnte sie vom Klimawandel profitiert

haben. Auch der Umstand, dass sie gerne in Maisbeständen vorkommt, ist für ihren Erfolg hilfreich.

Tab. 15: Über Jahrzehnte zunehmende und abnehmende Pflanzenarten auf BDF-Ackerflächen (Details im Text)

Pflanzen-Art	Leitunkraut im Getreide	Differenz Häufigkeit	
Acker-Stiefmütterchen	x	-25,3	starke Abnahme
Vogelmiere	x	-23,8	
Quecke		-19,0	
Acker-Vergißmeinnicht		-15,7	
Einjähriges Rispengras	x	-14,8	
Löwenzahn		-14,4	
Kletten-Labkraut	x	-13,2	
Feld-Ehrenpreis		-12,8	
Windhalm	x	-12,7	
Flughafer	x	-11,3	
Vogel-Knöterich		-11,0	
Purpurrote Taubnessel		-10,3	
Persischer Ehrenpreis		-9,8	
Winden-Knöterich	x	-3,5	
Acker-Schachtelhalm		-2,3	
Acker-Kratzdistel		-1,4	
Vielsamiger Gänsefuß		3,4	Zunahme
Acker-Fuchsschwanz	x	4,9	
Kleiner Storchschnabel		5,0	
Weißer Gänsefuß		7,4	
Hühnerhirse		7,7	

Seit Jahrzehnten gibt es einen allgemeinen Trend in Mitteleuropa, dass vor allem spezialisierte Pflanzenarten im Rückgang begriffen sind. Dazu gehören die pflanzensoziologischen Charakterarten (Braun-Blanquet 1964, Dierschke 1994, Hofmeister & Garve 2006), die sich gerade dadurch auszeichnen, dass sie bestimmte Situationen (z.B. Hackfrucht-Kulturen, Getreide-Kulturen, kalkreiche Scherbenäcker, Sandäcker) besonders gut repräsentieren. Vor allem vom Rückgang von ‚extensiv‘ genutzten Ackerflächen sind solche Arten stark betroffen (Meyer et al. 2013). Im BDF-Datensatz sind beispielsweise die pflanzensoziologischen Charakterarten Acker-Vergissmeinnicht (-15,7), Acker-Gauchheil (-7,4) oder die Kleine Wolfsmilch (-2,7) rückgängig (s. Tab. 15).

Das gleiche gilt für Rote-Liste-Arten. Darunter sind weitere stark spezialisierte Pflanzenarten, für die es aktuell wenig Lebensraum in Bayern, vielleicht auch in ganz Mitteleuropa gibt (Schneider et al. 1994).

In den vergangenen Jahrzehnten konnte man davon ausgehen, dass die sogenannten Generalisten zu den Gewinnern zählten: Pflanzenarten, die unter mehreren, verschiedenen Bedingungen (bezüglich Standort und Bewirtschaftung) gut zurechtkommen. Auch stickstoffliebende Arten profitierten von den modernen Entwicklungen mit starken Düngegaben.

Diesen Trend gab es schon seit den 1950er Jahren (Meyer et al. 2013). Allerdings zeigen unsere neuen Daten, dass auch diese Generalisten und stickstoffliebenden Arten nicht mehr vom Rückgang verschont sind (z.B. die Vogelmiere, die mit zu den größten Verlierern zählt, -23,8 Prozentpunkte). Für solche Rückgänge bieten sich die folgenden großen Ursachenkomplexe an: Zum einen der Klimawandel, der in bisher nicht bekannter Weise bisherige Artenzusammensetzungen verändert und Voraussagen über den Erfolg von einzelnen Pflanzenarten fast unmöglich macht. Zum anderen sind die modernen Bekämpfungsmethoden zu nennen, die möglicherweise noch erfolgreicher geworden sind.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit zu den beobachteten Entwicklungen

Die Analysen zur Repräsentativität der Boden-Dauerbeobachtungsflächen haben gezeigt, dass die Acker-BDF sowohl bei den Standort- und Klimaparametern als auch bei den angebauten Kulturen die Verhältnisse auf den bayerischen Ackerflächen gut abbilden, während die Grünland-BDF durch ihre Konzentration im Voralpenland ein insgesamt kühleres und feuchteres Grünland repräsentieren, als bayernweit anzutreffen ist. Die Anzahl von 18 Grünland-BDF ist zudem für statistische Auswertungen relativ gering. Die Acker-BDF sind mit 80 Standorten in einer Anzahl vertreten, die in einem guten Verhältnis von Aufwand (Probenahme) und Auswertbarkeit liegt. Sonderkulturen, die auf einzelnen Flächen untersucht werden, können in der Einzelfallbetrachtung Zusammenhänge beispielsweise zu Bewirtschaftungssystemen nachvollziehbar machen.

Nach 35 Jahren Boden-Dauerbeobachtung in Bayern konnten bereits bei zahlreichen Parametern Veränderungen festgestellt und Zusammenhänge zu gesellschaftlichen bzw. gesetzlichen Entwicklungen, der Bewirtschaftungsweise und dem Klimawandel gezogen werden.

7.1.1 Rechtliche Rahmenbedingungen und allgemeine Entwicklungen

Das Bodenmonitoring in Bayern wurde in den 1980er Jahren als Reaktion auf eine zunehmende Umweltverschmutzung durch Industrie, Verkehr und den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft gefordert. Die Untersuchung von Bodenschadstoffen ist daher ein wesentlicher Bestandteil des Bodenmonitorings. Die Auswirkungen rechtlicher (Neu-)Regelungen sind damit mit einem gewissen zeitlichen Versatz im Boden messbar.

Umweltrechtliche Instrumentarien

Im westlichen Nachkriegsdeutschland ging es zunächst darum, umweltrechtliche Instrumentarien erstmals zu schaffen, ehe diese angepasst und ggf. verschärft werden konnten. Auslöser waren die immer offener Zutage tretenden Umweltprobleme in den 1950-1980er Jahren, die u.a. zu den Protestbewegungen gegen Ende der 1960er und Anfang der 1970er Jahren führten. Mit einem zeitlichen Abstand von 20-40 Jahren wurden folgende wichtige Meilensteine des Umweltrechts in Deutschland (Auswahl im Hinblick auf Schutzgut „Boden“) verabschiedet.

- Das Bundes-Immissionsschutzgesetz und die TA-Luft sollen u.a. den Boden vor schädlichen Umwelteinwirkungen schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorbeugen. Sie trugen wesentlich zur Verringerung der Luftverunreinigungen und deren Einträge in Böden bei. Das Benzin-Blei-Gesetz hat zu einer Verringerung der Bleibelastung der Luft besonders entlang von Straßen beigetragen.
- Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz mit seinen anhängigen Verordnungen (Bioabfall-Verordnung, Klärschlamm-Verordnung) regeln die Abfall- und Klärschlammverwertung.
- Der Schutz des Bodens vor schädlichen Bodenveränderungen und die Sanierung von Altlasten wurden erst zuletzt, mit dem 1998 in Kraft getretenen Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz-Verordnung geregelt. Die Besorgnis des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung besteht insbesondere bei einer Überschreitung von Vorsorgewerten. Diese sind in der auf Grund des Bundes-Bodenschutz-Gesetzes erlassenen Rechtsverordnung (=Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)) festgelegt.

Alle vorgenannten Umweltgesetze trugen durch Grenzwertregelungen wesentlich dazu bei, dass Luft und Abfälle weniger mit Schadstoffen belastet sind. Für landwirtschaftlich genutzte Böden heißt das konkret, dass die Böden besser vor Stoffeinträgen aus der Luft (z.B. Pb, Cd, Hg, PAK₁₆) und Einträgen aus der Verwertung von Abfällen (Klärschlämmen, Bioabfällen) in der Landwirtschaft geschützt werden. Die umweltrechtlichen Regelungen oder deren Verschärfungen sind direkt im Boden der BDF messbar (z.B. Rückgang von Pb im Boden durch das Pb-Verbot in Kraftstoffen oder Rückgang der Hg-Belastung bei Acker-BDF durch verringerte Einträge über die Luft).

Agrargesetze und -verordnungen

- Düngemittelverordnung und EU-Düngeprodukte-VO legen Grenzwerte für eine Reihe anorganischer und weniger organischer Schadstoffe in mineralischen und organischen Düngemitteln fest, u.a. für Cd. Das hat Auswirkungen auf die Stoffeinträge in landwirtschaftlich genutzte Böden durch Düngung.
- EU-Futtermittel-Regelungen enthalten Höchstgehalte für unerwünschte Stoffe in Futtermitteln und Futtermittelzusätzen (Richtlinie 2002/32/EG, 2002): Bis zum Verbot vom 01.01.2006 wurden antibiotische Leistungs- und Wachstumsförderer in der Tierernährung eingesetzt. Alternativ und wegen seiner antibiotischen und leistungsfördernden Wirkung wird dem Tierfutter von Rind und Schwein aber auch Cu und Zn zugesetzt. Die Gehalte an unerwünschten Stoffen in Futtermitteln und Futterzusätzen haben Auswirkungen auf die Einträge durch organische Düngung mit Wirtschaftsdüngern wie Rinder- und Schweinegülle.
- Die EU-Kontaminanten-Verordnung (VERORDNUNG 2023/915 vom 25. April 2023) legt Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten (u.a. Pb, Cd, Dioxine+PCB, PFAS) in Lebensmitteln fest. Die Höchstgehalte sind unter Berücksichtigung des mit dem Lebensmittelverzehr verbundenen Risikos so niedrig festzulegen, wie dies durch eine gute Landwirtschafts-, Fischerei- und Herstellungspraxis vernünftigerweise erreichbar ist. Im Falle eines potenziellen Gesundheitsrisikos sollten die Höchstgehalte für Kontaminanten so niedrig angesetzt werden, wie dies vernünftigerweise erreichbar ist („as low as reasonably achievable“, ALARA-Prinzip).
- Das Pflanzenschutzgesetz regelt Zulassung und Inverkehrbringen sowie die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Für BDF heißt das u.a., dass die Anwendung bestimmter Mittel (z.B. DDT und weitere Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW)) heute nicht mehr zulässig sind, was sich an messbaren Gehaltsabnahmen im Boden widerspiegelt. Cu- und Zn-Präparate sind als Fungizide bei Sonderkulturen nach Pflanzenschutzgesetz zulässig und trugen dort zu hohen Cu-Einträgen in Böden bei. Die zulässigen Aufwandmengen an Reinkupfer wurden inzwischen auf 4 kg ha⁻¹ a⁻¹ begrenzt.

Aufgrund der rechtlichen Regelungen aber auch dem allgemein gestiegenen Umweltbewusstsein finden viele toxische Stoffe wie z.B. PCB, As, Pb, Cd, Hg, Tl heute keine Verwendung mehr oder deren Einsatz wurde stark eingeschränkt, so dass diese Schadstoffe weniger in landwirtschaftlich genutzte Böden, Lebens- und Futtermittel eingetragen werden.

Neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen, die in erster Linie das Einbringen von Stoffen in den Boden bzw. die Umwelt begrenzen, wurden Veränderungen auch durch gezielte agrarpolitische Entscheidungen ausgelöst:

Ein teilweises Pflugverbot erosionsgefährdeter Flächen mit Einführung der Erosionsschutzverordnung im Rahmen der GAP (Gemeinsame Agrarpolitik der EU) und gleichzeitige

Förderung von Direkt- und Mulchsaatverfahren, sowie Winterbegrünung im bayerischen KULAP (Kulturlandschaftsprogramm), spiegelten sich auch in der Bewirtschaftung der BDF-Ackerflächen wider. Dort sank der Pflugeinsatz je Jahr im Beobachtungszeitraum von 80 % der Acker-BDF auf 60 %, während der Anbau überwinternder Zwischenfrüchte vor Sommerungen von 10 % auf 40 % anstieg.

7.1.2 Veränderung von Bewirtschaftungsparametern und Auswirkungen auf die Indikatoren des Bodenzustands

Die wichtigsten Veränderungen der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen, die im BDF-Programm beobachtet wurden, beziehen sich auf den Pflugeinsatz, den Eintrag von organischem Material durch Düngung oder Ernterückstände und Veränderungen in der Häufigkeit des Anbaus bestimmter Kulturen und Zwischenfrüchte. Die Zunahme des Ökolandbaus beeinflusst über Fruchtfolgeentscheidungen, Bodenbearbeitung und Düngung zum einen direkt die genannten Bewirtschaftungsparameter, vereint aber auch Effekte, die darüber hinaus gehen und wurde daher als eigenständiger Parameter ausgewertet. Der Trend zu mehr Ökolandbau seit 1985 zeigt sich bei den BDF viel deutlicher bei Grünland- als bei Ackernutzung.

Eine deutliche Zunahme des Maisanbaus wurde sowohl auf den Acker-BDF (+4 %-Punkte bei Körnermais, +7 %-Punkte bei Silomais) als auch auf den Ackerflächen bayernweit etwa ab 2008 seit Einführung des EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) beobachtet. Der zunehmende Maisanbau ging dabei zu Lasten anderer Sommergetreide, deren Anbau deutlich abnahm. Seit 2010 wurde mit Einführung der Erosionsschutzverordnung der Zwischenfruchtanbau und eine Mulchsaat von Mais auf bestimmten, erosionsgefährdeten Flächen Pflicht. Besonders in den reliefierten Lößgebieten Niederbayerns, in denen der Maisanteil besonders hoch ist, führte diese Entwicklung zu einem Anstieg des Anbaus überwinternder Zwischenfrüchte, der auch durch gezielte Fördermaßnahmen im KULAP verstetigt wurde. Der Rückgang des Pflugeinsatzes hängt ebenso mit dieser Entwicklung zusammen, wie die Zunahme der organischen Düngung. Während bei Anbau von Hackfrüchten im Mulchsaatverfahren kein Pflügen mehr vor der Aussaat möglich ist, bewirkt der zunehmende Energiepflanzenanbau in Form von Silomais eine vermehrte Ausbringung von Biogasgärresten als organischer Dünger. Im BDF-Programm ist der Anstieg organischer Düngung von 40 auf 60 % der BDF allein auf die Gärreste zurückzuführen, die vor allem bei viehlosen Betrieben zunehmend zum Einsatz kamen, während der Anteil an viehhaltenden Betrieben kontinuierlich zurückging.

Die starke Zunahme der Ausbringung von N-reichen Biogasgärresten ist vermutlich eine wichtige Ursache für die beobachtete Zunahme der Nt-Gehalte und die dadurch bedingte Abnahme des C/N-Verhältnisses.

Die Abnahme der Pflughäufigkeit wurde als wichtigster Faktor für die signifikant positive Entwicklung der Regenwurm-Zeigerart *Lumbricus terrestris* auf den Acker-BDF seit 1985 identifiziert. Je länger der zeitliche Abstand zum letzten Pflugeinsatz war, desto günstiger wirkte sich dies auf die Abundanz der tiefgrabenden Art *Lumbricus terrestris* aus, die nachts von der Bodenoberfläche verrottendes organisches Material einsammelt und es in den Boden einbringt. Damit profitiert diese Zeigerart von einer Bodenbedeckung, wie sie z.B. beim Mulchsaatverfahren entsteht. Auffallend war, dass es auf keiner Acker-BDF zu einem deutlichen Rückgang der Schlüsselart kam. Auch für die Diversität der Regenwürmer, dargestellt über den Shannon-Index, der sowohl die Artenzahl als auch die Abundanz der Regenwürmer berücksichtigt, war eine insgesamt positive Trendentwicklung auf den BDF unter Ackernutzung feststellbar.

Auch bei den Humusgehalten zeigte sich ein scheinbar positiver Zusammenhang zwischen pflugloser Bewirtschaftung und zunehmendem Humusgehalt. Dies ist jedoch wahrscheinlich ein Anreicherungseffekt in den obersten 15 cm der Ackerböden aufgrund fehlender Durchmischung des Oberbodens, wie sie durch den Pflugeinsatz stattfinden würde.

Die verringerte Durchmischung des Oberbodens muss auch bei der Interpretation der Bodenschadstoffe berücksichtigt werden. Allerdings hat laut unseren Messungen die verstrichene Zeit nach dem letzten Pflugeinsatz keinen großen Einfluss auf die Entwicklung der Gehalte der eingehender betrachteten 11 chemischen Elemente in Oberböden der Acker-BDF ergeben. So gibt es keinerlei Hinweise, dass sich bei langjährigem Pflugverzicht die Gehalte im Oberboden verringern würden, weil beispielsweise weniger Unterbodenmaterial eingemischt wurde (Nachlieferung geogener chemischer Elemente). Auf der anderen Seite ist besonders für Antimon, Kupfer und Cadmium ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Gehalte im Oberboden und der Dauer des Pflugverzichtes festzustellen. Bei der Umstellung von wendender zu reduzierter Bodenbearbeitung kommt es zu einer Umverteilung von Corg innerhalb des Ap-Horizonts: der in gepflügten Böden im Oberboden homogen verteilte Corg reichert sich nach Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitungstiefen im oberen Bereich der Ackerkrume (in der Regel 0-10 cm) an. Sowohl Cd als auch Cu werden über Dünger (P-haltige Mineraldünger, Gülle) und die Luft in Oberböden von Acker-BDF eingetragen und weisen eine starke Affinität zur organischen Substanz im Boden auf, was obigen Zusammenhang erklären könnte.

Es ist bekannt, dass Regenwürmer vom Eintrag organischer Substanz in den Boden, sei es durch Zwischenfruchtanbau, Ernterückstände, organische Düngung oder mehrjährigem Klee gras in der Fruchtfolge profitieren und auch der Humushaushalt durch diese Maßnahmen positiv beeinflusst wird. Ein positiver Effekt der organischen Düngung und von Zwischenfruchtanbau auf Humus und den Regenwurmbestand, wie dies zahlreiche Exakt-Feldversuche zeigen, konnte auf den Praxisflächen der Acker-BDF allerdings nicht direkt festgestellt werden. Wahrscheinlich spielen hier Wechselwirkungen eine entscheidende Rolle. So korrelierte auf den Acker-BDF die organische Düngung und der Zwischenfruchtanbau positiv mit dem Anbau von Hackfrüchten und Mais. Möglicherweise wird der positive Effekt einer organischen Düngung vom ungünstigen Einfluss eines Hackfruchtanbaus (humuszehrende Wirkung) überlagert bzw. aufgehoben. Der negative Einfluss des Hackfruchtanbaus zeigte sich am deutlichsten bei der Regenwurmbiomasse. Im Gegensatz zur Ackernutzung konnte unter Grünlandnutzung ein positiver Zusammenhang der organischen Düngung mit der Regenwurmbiomasse festgestellt werden.

Die jährliche Anbaufläche von Klee gras ist über den Beobachtungszeitraum des BDF-Programms weitgehend gleichgeblieben, Dennoch zeigte sich bei der explorativen Modellanalyse zu den auf die Gesamtabundanz und -biomasse der Regenwürmer wirkenden Einflussfaktoren, dass vor allem ein Klee grasanbau ein Haupttreiber ist, der sich günstig auf die Biomasse und Abundanz der Regenwürmer auswirkt.

Der Klee grasanbau hat vor allem bei den angebauten Kulturen ökologisch wirtschaftender Betriebe einen hohen Anteil von 25 % (Anteil an der gesamten ökologisch bewirtschafteten Ackerfläche im Jahr 2022 in Bayern, Datengrundlage: InVeKoS 2022) im Vergleich zu nur 5 % bei den konventionell bewirtschafteten Ackerflächen. Dass dieser sich im Beobachtungszeitraum bei den Acker-BDF nicht erhöht hat, lag an der geringen Zunahme der ökologisch bewirtschafteten Ackerflächen im BDF-Programm. Trotzdem hat sich bei der Auswertung der Humusentwicklung gezeigt, dass der Parameter Ökolandbau, neben dem Verbleib von Stroh aus Ernterückständen auf Ackerflächen der wichtigste Faktor für die Corg-Zunahme war. Der Ökolandbau wirkt sich allgemein positiv auf den Humushaushalt aus, da

der Eintrag organischer Substanz aufgrund der weiten Fruchtfolge (höhere Anteile an Klee-gras und anderen humusmehrenden Kulturen) und höherer Anteile organischer Dünger erhöht ist, insbesondere der Eintrag wurzelbürtiger organischer Substanz. Diese Bewirtschaftungsfaktoren können aber auch auf konventionell bewirtschafteten Flächen angewandt zu positiven Effekten führen, sodass es in Zukunft darauf ankommen wird, die besten Praktiken beider Systeme zu kombinieren.

Dass bei der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen unabhängig vom System die „gute fachliche Praxis“ an vorderster Stelle für den Erhalt der Bodenfunktion stehen sollte, machten die Untersuchungen zur Unterbodenverdichtung von Ackerflächen deutlich. Alle 25 untersuchten Acker-BDF wiesen eine Pflugsohle mit deutlich reduzierter Luftkapazität auf, wobei gut die Hälfte nahe oder unter dem kritischen Wert von 5 % Luftkapazität lagen. Im Beobachtungszeitraum konnten sowohl Zu- als auch Abnahmen der Luftkapazität in der Pflugsohle festgestellt werden, jedoch kein eindeutiger Trend in die eine oder andere Richtung. Auffällig war, dass auf der Fläche mit der stärksten Abnahme der Luftkapazität es auch zu einem deutlichen Einbruch der Regenwurmabundanz und -biomasse gekommen ist. Ein weiterer Hinweis darauf, wie wichtig es ist, Bodenverdichtungen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit zu vermeiden.

Der Trend zur Rationalisierung, Mechanisierung und Intensivierung in der bayerischen Landwirtschaft dürfte schon mehrere Jahrzehnte vor Beginn des BDF-Programms begonnen haben und sich nicht nur auf die Funktionsfähigkeit des Bodens, sondern auch auf die Vegetation der landwirtschaftlichen Flächen ausgewirkt haben. Seit Beginn des BDF-Programmes 1985 gibt es einen ungebremsten Rückgang der Vielfalt von Gefäßpflanzen-Arten auf den Acker-BDF. Davon waren vor allem stark spezialisierte Pflanzen-Arten betroffen, die beispielsweise an die Bedingungen auf Kalkscherbenäckern, Sandäckern, krumenfeuchten Äckern oder allgemein an extensive Nutzungsbedingungen angepasst waren. Solche Bedingungen sind heute kaum noch vorhanden. Stark betroffen sind insbesondere kleinwüchsige Pflanzenarten, die in der Konkurrenz um Ressourcen (Licht, Wasser, Nährstoffe) den Kulturarten oft unterlegen sind. Auch sie sind zur Vermehrung der allgemeinen Biodiversität und von ökosystemaren Funktionen notwendig. Ihr Rückgang ist umso bedauerlicher, da sie die Kulturpflanzen nicht im Wachstum behindern. Es steht zu vermuten, dass dieser Trend andauern wird, da auch die Bemühungen um höhere Erträge weitergehen dürften und diese Bemühungen in der Vergangenheit durchaus erfolgreich waren.

7.1.3 Auswirkung des Klimawandels

Im 35-jährigen Beobachtungszeitraum konnten deutliche Veränderungen bei den Klimaparametern Temperatur und Niederschlag in Bayern beobachtet werden. Auswertungen der Daten des Deutschen Wetterdienstes haben gezeigt, dass der auf den BDF beobachtete Trend der Temperaturzunahmen und des Rückgangs des jährlichen Niederschlags in ganz Bayern ähnlich verliefen. Auf den Acker-BDF war im Beobachtungszeitraum eine Temperaturzunahme von 1,5 °C und eine Abnahme des Niederschlags um 109 mm feststellbar. Die höchsten Temperaturzunahmen und gleichzeitig Niederschlagsabnahmen waren bei den Acker-BDF in Unterfranken (Landkreis Bad Kissingen) zu beobachten. Im Grünland fiel der Rückgang beim Jahresniederschlag mit 136 mm noch etwas höher aus als bei den Acker-Standorten, während die Temperaturzunahme mit 1,3 °C etwas niedriger war (vergl. unter Kapitel 1.2 Konzentration des BDF-Grünlands im Alpenvorland).

Dass die Klimaveränderung sich im Beobachtungszeitraum direkt auf Bodenparameter ausgewirkt hat, konnte nicht statistisch nachgewiesen werden. Dennoch zeichneten sich einige Hinweise auf den Einfluss des Klimawandels in Bayern ab. So zeigte sich für Acker-BDF

in trockenen und wärmeren Lagen ein tendenziell negativer Zusammenhang mit der Regenwurmbiomasse. Wenn auf den Grünland-BDF der Rückgang der Niederschlagsmenge geringer ausfiel, zeigte sich dies in einer höheren Regenwurmabundanz.

Der Klimawandel könnte zudem die Humusentwicklung beeinflusst haben. Es ist zu erwarten, dass es durch den Temperaturanstieg (insbesondere im Winter) einerseits zu einem verstärkten mikrobiellen Abbau der organischen Substanz kommt und andererseits der Eintrag an organischer Substanz in Folge zunehmender Trockenperioden stagnieren oder sogar abnehmen könnte. Dies könnte langfristig zu einem Rückgang der Humusgehalte führen. Auch die beobachtete Abnahme des C/N-Verhältnisses könnte zumindest teilweise im Zusammenhang mit dem Klimawandel stehen, da die partikuläre organische Substanz, die sich durch ein weites C/N-Verhältnis auszeichnet, im Zuge der Temperaturerhöhung bevorzugt abgebaut wird. Die Analyse der Humusentwicklung in Ackerböden erbrachte allerdings keine direkten Hinweise auf eine Beteiligung von Klimafaktoren an den beobachteten Corg-Veränderungen, was vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass der Klimawandel sich auf alle Ackerstandorte in ähnlicher Weise auswirkt und eine Überlagerung durch Boden- und Bewirtschaftungsfaktoren anzunehmen ist. Ein möglicher Beitrag des Klimawandels an den beobachteten Corg- und Nt-Veränderungen ist also nur schwer vom Einfluss der Bewirtschaftung zu trennen.

Eine Humusabnahme kann zu einer Verschlechterung der Bodenstruktur und unter Ackernutzung zu einer Abnahme der Regenwurmabundanz und -biomasse führen. Darauf weist die in den Analysen festgestellte, signifikant positive Korrelation des Corg-Gehaltes von Acker-BDF mit der Regenwurmabundanz hin. Für die Regenwurmbiomasse fiel dieser Zusammenhang nicht mehr signifikant, aber immer noch tendenziell positiv aus.

Grundsätzlich stellt der Klimawandel ein Risiko für die Landwirtschaft und die Funktionsfähigkeit des Bodens dar, sei es aufgrund von Ernteaussfällen nach längeren Trockenperioden oder aufgrund von zunehmenden Starkregenereignissen, die durch das Auslösen von Bodenerosion die Bodenfruchtbarkeit verringern, aber auch dazu führen, dass durch engere Bearbeitungsfenster das Risiko von Bodenverdichtung zunimmt. Daher werden bodenschonende Bewirtschaftungsweisen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit in Form von humusmehrender Bewirtschaftung, vielfältiger Fruchtfolge oder reduzierter Bodenbearbeitung zunehmend an Bedeutung gewinnen.

7.2 Empfehlungen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und Risikovorsorge

Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen des Boden-Dauerbeobachtungsprogrammes konnten für den Humuserhalt und den Aufbau stabiler Regenwurmpopulationen unter Ackernutzung bestimmte Maßnahmen als besonders zielführend abgeleitet werden. Dazu gehören der ökologische Landbau, der verschiedene Aspekte, wie eine gute Kreislaufwirtschaft mit Rückführung organischer Substanz und einen hohen Anteil von Klee gras in der Fruchtfolge in sich vereint, Maßnahmen, die auch im konventionellen Landbau erfolgreich eingesetzt werden können. Verbesserte Fruchtfolgen mit Zwischenfruchtanbau und Untersaaten können zudem helfen die Bodenstruktur zu verbessern und die Wasseraufnahmefähigkeit zu erhöhen.

Organische Düngung, gefördert durch zunehmende, auch in viehlosen Betrieben verfügbare Biogassubstratdüngung, wirkt sich ebenso positiv auf die Humusgehalte und das Bodenleben wie Regenwürmer aus (Burmeister et al. 2020), wie pfluglose Mulch- oder Direktsaatverfahren, die zum Erosionsschutz und zur Verbesserung der Bodenstruktur umgesetzt

werden. Um das Mulchsaatverfahren trotz konträrer Ziele, wie dem Glyphosatverbot und der Halbierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes weiterhin als gängige Praxis zu erhalten, wird es darauf ankommen, diesen Herausforderungen durch praxisnahe Forschung zu begegnen, um den Landwirtinnen und Landwirten Lösungen an die Hand zu geben (z.B. Forschungsprojekt „Weiterentwicklung von Erosionsschutzverfahren im Mais“ (<https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/228035/index.php>)).

Auch im Energiepflanzenanbau werden derzeit Alternativen zum Maisanbau erforscht, die Dauerkulturen wie Durchwachsene Silphie oder Agroforstsysteme umfassen und positive Effekte auf Bodenleben, Humushaushalt und Erosionsschutz verbinden (Förster et al. 2021, Winterling et al. 2019).

Im Grünland, das generell höhere Humusgehalte aufweist als Ackerflächen, kann das Ausbringen von mehr Stallmist zu einem ausgeglichenen Humushaushalt führen. Eine organische Düngung von Grünland wirkt sich auch günstig auf die Regenwurmbiomasse aus. Neben der Versorgung des Bodens mit organischem Material hat es sich für den Erhalt der Regenwurmpopulation als besonders wichtig erwiesen, Bodenverdichtungen zu vermeiden. Im Grünland sind die Anzahl der Überfahrten mit Landmaschinen aufgrund mehrerer Ernte- und Düngetermine im Jahr häufiger als bei Ackernutzung. Damit steigt im Grünland auch aufgrund fehlender Bodenbearbeitung die Verdichtungsgefahr im Oberboden. Um im Grünland dennoch einen optimalen Wasserrückhalt und möglichst geringen Oberflächenabfluss zu erreichen, muss bei der Befahrung besonders auf die passende Bodenfeuchte und möglichst geringe Radlasten geachtet werden.

Verschiedene gesetzliche Regelungen und ein gesteigertes Umweltbewusstsein haben seit den 1980er Jahren dazu geführt, dass die Schadstoffeinträge aus unterschiedlichen Quellen in den Boden zurückgegangen sind (vergl. Kapitel 3). Die Bodengehalte liegen meist unterhalb der Vorsorgewerte der Bundesbodenschutz-Verordnung oder im Bereich typischer Hintergrundwerte. Um die Freisetzung von Schadstoffen im Boden zu vermeiden, wird im Acker und Grünland empfohlen, auf einen optimalen pH-Wert bei guter Kalkversorgung zu achten, was außerdem eine gute Nährstoffverfügbarkeit gewährleistet. Um Kupfereinträge in Böden zu verringern, sollte weiter daran geforscht werden, wie sich Kupferspritzungen bei Sonderkulturen und Kupfer als Futtermittelzusatz reduzieren lassen. Bei Mineraldüngern sollten Produkte mit geringen Cadmium- und Uran-Gehalten angestrebt werden. Wünschenswert wäre, wenn in der Düngemittelverordnung und der EU-Düngeprodukte-VO auch für Uran ein Grenzwert festgelegt werden würde.

Und schließlich werden neben der Produktion gesunder, unbelasteter Lebens- und Futtermittel weitere Anforderungen an die Landwirtschaft gestellt. Die landwirtschaftlichen Flächen sind Lebensraum für zahlreiche Pflanzen- und Tierarten und tragen maßgeblich zu deren Vielfalt bei. Um den bei den BDF beobachteten Verlust der Ackerwildkrautarten auszugleichen, sollten Teilflächen extensiver genutzt werden (Pape et al. 2023). Bei der Umsetzung solcher gesellschaftlicher Leistungen müssen Landwirtinnen und Landwirte entsprechend finanziell unterstützt werden, indem beispielsweise passende KULAP-Maßnahmen angeboten werden. Daneben zeigen Studien, dass der Erhalt artenreichen Grünlands mit höherer Pflanzenartenvielfalt im Klimawandel resilientere Bedingungen erzeugen kann, die sich beispielsweise positiv auf die Regenwürmer auswirken (Mariotte et al. 2016, Singh et al. 2021).

Grünlanderhalt, besonders auf feuchten Standorten, ist eine der wirkungsvollsten Maßnahmen in der Landwirtschaft, um Kohlenstoff langfristig im Boden zu speichern. In diesem Zusammenhang hat der Boden in letzter Zeit wieder mehr Aufmerksamkeit erfahren. Die

Bedeutung für den Klimaschutz, die Artenvielfalt und den Wasserhaushalt wurde auch politisch wahrgenommen. Diese positive Entwicklung ist wichtig, um das Verständnis für das Schutzgut Boden zu stärken. Ein Langzeit-Monitoring wie die Boden-Dauerbeobachtung ist daher eine wichtige Grundlage, um das nötige Wissen auf wissenschaftlicher Basis zu generieren.

7.3 Ausblick

7.3.1 Bedeutung des BDF-Programms

Mit der Boden-Dauerbeobachtung existiert in Bayern ein einzigartiges Monitoring zur Erkennung langfristiger Trends der wichtigsten Bodenparameter aus dem Bereich Humus, Bodenphysik, Bodenschadstoffe und von Regenwürmern, sowie eine langjährige Dokumentation der Entwicklung der Ackerbegleitflora. In der vorliegenden Publikation wurden erstmals Daten aus 35 Jahren kontinuierlicher Bodenuntersuchungen ausgewertet und so Fakten zu langfristigen Veränderungen herausgearbeitet. Besonders bei den Parametern Humus, Bodenschadstoffen und den Inhaltsstoffen von Wirtschaftsdüngern ist bereits jetzt eine hohe Anzahl von Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt worden (bis zu 6 Wiederholungen bis zum Jahr 2018, ca. alle 5 Jahre, bei Bodenschadstoffen alle 10 Jahre), die Grundlage für die in der Publikation dargestellten Trends sind. Zudem wurden die Daten der BDF ergänzend zur Trendentwicklung dazu verwendet, Kennwerte z.B. zur durchschnittlichen Regenwurmabundanz und -biomasse zu ermitteln. Die Daten flossen in explorative Modell- und Korrelationsanalysen ein, um die wesentlichen, steuernden Bewirtschaftungs- und Klimafaktoren darzustellen. Abschließend wurden daraus Empfehlungen zur Förderung eines fruchtbaren und biologisch aktiven Bodens abgeleitet.

Als Warnsystem für Prozesse, die nur relativ langsam über viele Jahre und Jahrzehnte im Boden ablaufen, ist die Boden-Dauerbeobachtung unverzichtbar. In den 1980er Jahren waren es Themen wie „saurer Regen“, Bleibelastungen und andere Schadstoffimmissionen, die eine Erhebung des Bodenzustands als Grundlage unserer Lebensmittel- und Futtermittelproduktion notwendig gemacht haben. Die Reduktion bestimmter Schadstoffe, beispielsweise durch vollständigen Verzicht auf verbleite Treibstoffe können als Erfolg verbucht werden und spiegeln sich in den gemessenen Werten wider. Andere Entwicklungen, wie beispielsweise Veränderungen der Humusgehalte, müssen als erste Alarmzeichen in Zeiten des Klimawandels gewertet werden. Das Boden-Monitoring hat das Potenzial, diese relativ langsam ablaufenden Prozesse langfristig zu dokumentieren. Das Ziel ist es dabei, faktenbasierte Aussagen zu treffen und bei Bedarf entsprechend reagieren zu können.

Grundlage ist eine ausreichend hohe Anzahl von Monitoring-Standorten, die in Bayern mit über 120 landwirtschaftlichen Standorten, darunter 80 Acker-BDF, so hoch ist, wie in kaum einem anderen Langzeitmonitoring in Deutschland. Insbesondere beim Regenwurmmonitoring hat Bayern mit 80 Acker-BDF im Vergleich zu anderen Bundesländern eine herausragende Datenbasis, um die Trendentwicklung in Ackerböden aufzuzeigen.

Ergänzt werden die landwirtschaftlichen Standorte durch weitere BDF-Standorte unter Wald (betreut durch die LWF) und auf Sonderstandorten (betreut durch das LfU). Die gewonnenen Daten werden Institutionen auf Bundesebene zur Verfügung gestellt, wo momentan durch den Aufbau eines nationalen Bodenmonitoringzentrums am Umweltbundesamt die Bedeutung der Boden-Dauerbeobachtung gestärkt wird. Die Daten werden unter anderem zur Bestimmung von Hintergrund- und Grenzwerten und zur Ableitung von Bodenzustandsindikatoren benötigt. Die EU-Kommission erarbeitet derzeit ein Bodenmonitoring-Gesetz, das (ähnlich wie jetzt schon bei den Medien Wasser oder Luft) eine regelmäßige

Berichterstattung über den Zustand der Böden jedes Mitgliedlandes anhand bestimmter Bodenparameter verpflichtend regeln wird. Zu den darin geforderten Mindeststandards gehören eine Mindestanzahl von Probenahmeflächen und ein festgelegter Parameterumfang, der zum Teil bereits im BDF-Programm untersucht wird.

Zudem hat das erst vor wenigen Jahren gegründete nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität beim Bundesamt für Naturschutz ein Fachgremium zur Bodenbiodiversität eingerichtet, das Wege für ein bundesweites Bodenbiodiversitätsmonitoring aufzeigen soll. Dabei soll auch die enorme Artenvielfalt der im Boden lebenden Organismen, über die Indikatorengruppe der Regenwürmer hinaus, Beachtung finden. Die Boden-Dauerbeobachtung wird durch diese politischen Ziele in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen und zentraler Bestandteil des nationalen und EU-weiten Bodenmonitorings sein.

Wichtiger Aspekt des BDF-Programms bleibt dabei das neutrale Beobachten der Prozesse ohne Erwartungshaltung. Die BDF-Betriebe werden bei ihren betrieblichen Entscheidungen nicht beeinflusst. Im Vergleich mit Feldversuchen ist die Forschung auf Praxisflächen auf Grund der deutlich größeren Zahl und Vielfalt von nicht kontrollierten Einflussfaktoren zwar herausfordernder, bietet aber die Möglichkeit festgestellte Zusammenhänge aus der Wissenschaft dahingehend zu prüfen, ob sie in der landwirtschaftlichen Realität zur Geltung gelangen bzw. quantitativ und qualitativ relevant sind. Entscheidende Voraussetzung hierfür ist ein langfristiges Monitoring Programm mit repräsentativer, ausreichend großer Stichprobe.

Zudem wurden aus jeder Probenahmeserie Rückstellproben des Bodens aufbewahrt. Dies ermöglicht es, Parameter, die erst nach Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen haben, rückwirkend zu analysieren. Prominentestes Beispiel war hier bisher das Reaktorunglück von Tschernobyl im Jahr 1986, nach dem vor allem das südliche Bayern von radioaktivem Niederschlag betroffen war. Nur das Vorhandensein von BDF-Rückstellproben aus der Ersterhebung von 1985 hat einen Vorher-Nachher Vergleich der Radioaktivität im Boden ermöglicht.

7.3.2 Herausforderungen und Weiterentwicklung des BDF-Programms

7.3.2.1 Flächenauswahl

Die Acker-BDF sind mit 80 Standorten in einer Anzahl vertreten, die in einem guten Verhältnis von Aufwand (Probenahme) und Auswertbarkeit liegt. Trotzdem muss aufgrund des fortschreitenden Flächenverlusts durch konkurrierende Nutzungen, wie z.B. dem Ausbau der Photovoltaik auf landwirtschaftlichen Flächen, darauf geachtet werden, dass die Anzahl der Acker-BDF ggf. durch Aufnahme neuer Flächen in das BDF-Programm konstant gehalten wird. Bei den Grünland-BDF sollte eine Verdoppelung der Anzahl der Monitoringflächen angestrebt werden. Dies würde das bayernweite Flächenverhältnis von zwei Drittel Acker und einem Drittel Grünland an der landwirtschaftlich genutzten Fläche abbilden, aber gleichzeitig einen erhöhten finanziellen und personellen Aufwand mit sich bringen.

Auch Nutzungsänderungen von Acker zu Grünland und umgekehrt führten in den vergangenen Jahrzehnten zu einer reduzierten Anzahl an auswertbaren Flächen je Nutzungsgruppe, welche die Hauptnutzungen Acker, Grünland und Sonderkulturen umfassen. Es wurde deshalb die Gruppe der „Flächen mit Nutzungsänderung“ ergänzt. Diese umfassen mittlerweile 12 BDF. Eine Nutzungsänderung von Acker zu Grünland hat so gravierende Auswirkungen auf die meisten Bodenparameter, dass diese BDF getrennt von den Hauptgruppen „Acker“ und „Grünland“ ausgewertet werden müssen.

Die Gruppe der Flächen mit Nutzungsänderung wird zwangsläufig mit der Zeit immer größer werden, sodass zu diskutieren ist, ob diese Flächen auf Dauer im BDF-Programm gehalten, oder sie stattdessen aufgegeben werden sollen und der Fokus auf Neuausweisung und Ergänzung von langjährigem Acker und Grünland liegen sollte. Bei Neuausweisungen sollte darauf geachtet werden, dass die Nutzungsgeschichte möglichst weit in die Vergangenheit zurückreichend nachvollzogen werden kann.

Die Entscheidung zur Änderung der Nutzung oder zur Umwidmung der Fläche ist Teil der gängigen Praxis der Flächennutzung in Bayern. Der Verlust landwirtschaftlicher Fläche macht entsprechend auch vor den BDF nicht halt. Da die an einer BDF hängenden, über Jahrzehnte gesammelten Informationen in dieser Form jedoch nicht zu ersetzen sind, sollte geprüft werden, wie jede BDF möglichst langfristig im Monitoring Programm verbleiben kann.

Genauso lässt sich diskutieren, ob Untersuchungen der BDF mit Sonderkulturen, die wegen ihrer geringen Anzahl keine Repräsentativität für Bayern haben, (Stand 2023: 3x Hopfen und 4x Wein) weiter fortgeführt werden sollen. Aus jetziger Sicht liefern auch die wenigen Sonderkulturstandorte durchaus wichtige Erkenntnisse zu ihren besonderen Bewirtschaftungsformen, bei denen in der Einzelanschauung Rückschlüsse zu gemessenen Werten gezogen werden können, beispielsweise dem Verbleib von Kupfer im Boden trotz deutlicher Reduktion der Ausbringungsmengen im Hopfen. Klar ist aber auch, dass aufgrund der geringen Anzahl keine allgemeinen Rückschlüsse zum Hopfen- oder Weinbau gezogen werden können.

7.3.2.2 Parameterumfang und Methoden

Seit den 80er Jahren wurde der Parameterumfang im BDF-Programm immer wieder an den aktuellen Fragestellungen ausgerichtet und an die personellen und finanziellen Kapazitäten angepasst. Beispielsweise lagen Mitte der 80 er Jahre vom LfU nur Schadstoffeinträge aus der Luft in Städten und in Gebieten mit hoher Immissionsbelastung in Bayern vor, nicht jedoch von naturnahen Standorten und Landwirtschaftsflächen. Wegen der aufwändigen Probenahme und Untersuchung wurde die Messung der Immissionen über die Luft mit Hilfe von Bergerhoff-Gefäßen in den 90er Jahren auf den BDF eingestellt. Stattdessen können nun Daten vom Landesamt für Umwelt herangezogen werden. Die zu Beginn eingerichteten 16 Erosionsmessstellen auf Ackerflächen wurden ebenfalls nach und nach abgebaut, da derartige Anlagen intensive Betreuung benötigen und mit hochwertiger Technik ausgestattet werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Die Anforderungen, die das EU-Bodenmonitoring-Gesetz nun an die Mitgliedsstaaten stellt, beinhaltet ausdrücklich auch die Erfassung des Bodenabtrags, sodass Messstellen zukünftig in geeigneter Form wieder Bestandteil der Boden-Dauerbeobachtung werden könnten, verbunden mit dem entsprechenden Bedarf an personellen und finanziellen Mitteln.

Die anorganischen Schadstoffe sollten auch in Zukunft in den Böden der BDF und den möglichen Eintragungspfaden untersucht werden und fester Bestandteil des Monitorings bleiben. Unter den organischen Bodenschadstoffen sind jedoch Parametergruppen vertreten, deren Gehalte aufgrund von Anwendungsverböten oder -beschränkungen inzwischen stark zurückgegangen sind. Dies gilt beispielsweise für die Gruppe der CKW. Während auf die Untersuchung von CKWs in Zukunft möglicherweise verzichtet werden kann, rücken neue vermutlich omnipräsente und sehr persistente schädliche Stoffe von aktueller Brisanz wie PFAS (per- und polyfluorierte Chemikalien), aber auch Mikroplastik oder Antibiotika in den Fokus der Untersuchungen und könnten bei Bedarf ins BDF-Programm integriert und anhand der Rückstellproben rückwirkend untersucht werden.

Ein zum Teil neuer Untersuchungsschwerpunkt wird der Bereich Boden-Biodiversität werden. Obwohl Regenwürmer unter den Bodentieren die höchste Biomasse aufweisen und wichtige Schlüsselorganismen sind, die durch ihre vielseitigen Leistungen das Nährstoffrecycling und das Bodengefüge positiv beeinflussen, stellen sie nur einen kleinen Teil der im Boden existierenden Artenvielfalt dar. Die enorme Vielfalt der Bodenorganismen erstreckt sich von den Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Algen), den tierischen Protozoen, Springschwänzen, Milben, Nematoden, Kleinringelwürmern, Tausendfüßern und zahlreichen Insektenlarven bis zu den Regenwürmern und Wirbeltieren, wie Maulwürfen.

Als neue, innovative Methode zur Erfassung der Artenvielfalt im Boden könnten zukünftig möglicherweise genetische Analysen, insbesondere das DNA-Metabarcoding dienen. Über die Sequenzierung von DNA-Abschnitten aus Bodenproben steht eine effiziente und kostengünstige Analyse zur Verfügung, anhand derer die im Boden lebenden Arten der Bakterien, Pilze, Algen und Bodentiere identifiziert werden können. Über Metabarcoding-Analysen können so bei einem Monitoring Veränderungen in der Artenvielfalt ermittelt werden, allerdings keine quantitativen Aussagen zur Häufigkeit der vorkommenden Arten getroffen werden. Zu berücksichtigen ist zudem, dass die genetischen Referenzdatenbanken, über die der Abgleich erfolgt, bislang nur einen Teil der im Boden lebenden Artenvielfalt beinhalten. Doch diese Datenbanken werden stetig weiterentwickelt und es kommen neue Barcodes hinzu, so dass in einigen Jahren eine erneute Analyse von Rückstellproben durchgeführt werden könnte.

Die Bodenmikrobiologie ist auch in Hinblick auf einen möglichen Humusabbau im Zusammenhang mit dem Klimawandel von Interesse. Hier können mikrobielle Parameter wie das Verhältnis von mikrobieller Biomasse zu Corg oder das Pilz/Bakterien-Verhältnis wertvolle Hinweise auf die Humusdynamik geben. Solche aufwändigen Untersuchungen könnten auf ausgewählte Flächen begrenzt, dort aber in engeren Wiederholungsintervallen durchgeführt werden. Gleiches gilt für die Untersuchung von bodenphysikalischen Parametern. Die Probenahme zur Unterbodenverdichtung sollte auf den bisher beprobten Ackerflächen ggf. mit neuer Sensortechnik fortgeführt und regelmäßig wiederholt werden. Die Bodenstruktur kann darüber hinaus visuell bewertet werden (VESS-Methode), um weitere Vergleichsdaten zu erhalten.

Eine Anzahl weiterer Parameter wären aufgrund ihrer Aktualität als Erweiterungsmöglichkeit des Untersuchungsumfangs sinnvoll. Dazu gehören zum Beispiel das Untersuchen von Antibiotika und Mikroplastik im Boden (siehe oben), sowie die Erweiterung der Humusparameter um Humusfraktionen.

Beim Streichen alter bzw. Hinzunehmen neuer Parameter sollten über das bayerische BDF-Programm hinausgehende Monitoringkonzepte und neue gesetzliche Rahmenbedingungen beachtet werden, wie etwa das Bodenmonitoring-Gesetz der EU. Eine Vernetzung mit anderen bundes- und europaweiten Monitoringprogrammen, z.B. der Bodenzustandserhebung (BZE) Landwirtschaft vom Thünen-Institut oder dem Lucas Soil-Projekt der EU, kann zudem Ressourcen sparen, bei der Suche neuer BDF-Standorte hilfreich sein und ermöglicht den Vergleich von festgestellten Trends anhand unterschiedlicher Quellen.

Die gemessenen Parameter sind immer im Zusammenhang mit den jährlich erhobenen Schlagdaten zu sehen, die erst eine Interpretation der Messwerte ermöglichen. Um die Teilnahmebereitschaft der BDF-Betriebe sicherzustellen, sollte der Umfang der abgefragten Daten nicht zu komplex sein. Oft führen zu detaillierte Abfragen dazu, dass Werte geschätzt oder nicht angegeben werden. Dennoch gibt es einen Mindestumfang an zur Interpretation wichtigen Daten, die in den Schlagkarteien enthalten sein sollten. Momentan nicht abgefragt

werden Aufwandmengen bei Pflanzenschutzmitteln und bei der Düngung, sowie Angaben zu Erträgen, sodass eine Bilanzierung z.B. der Ein- und Austräge organischer Substanz nicht möglich ist. Eine Abfrage dieser Daten sollte in Zukunft erfolgen, um die Aussagekraft der beobachteten Trends zu verbessern.

Neue Möglichkeiten eröffnen dabei Methoden der Fernerkundung oder Drohnenbefliegung. Unter anderem stehen frei verfügbare Satellitendaten des Copernicus-Erdbeobachtungsprogramms der EU zur Verfügung, bei dem die Bodenbedeckung und ihre Veränderungen, Landnutzung, Vegetationszustand, Wasserkreislauf und Erdoberflächenenergievariablen in einem 10tägigen Intervall erfasst werden. In Zukunft werden Daten zur Biomasse, Schnittzeitpunkten oder Nähr- und Schadstoffverteilung einzelner Schläge vermehrt mit Hilfe dieser spektroskopischen Analysemethoden generiert werden können, ohne oder mit geringeren Störungen auf der Beobachtungsparzelle durch Probenahmen.

Besonders Probenahmen von bodenphysikalischen Parametern und Regenwurmprobenahmen sind mit stärkeren Grabungen innerhalb der BDF verbunden, die vor allem bei Grünland einen Eingriff in die vorhandene Bodenstruktur darstellen. Hier ist es besonders wichtig, die Probenahmepunkte exakt zu dokumentieren und ein langfristiges Probenahmedesign zu entwerfen, das sicherstellt, dass Veränderungen, die aufgrund der Beprobung innerhalb der BDF entstehen, minimiert werden. Je länger das Monitoring besteht, desto wichtiger wird es, sinnvolle Wiederholungsintervalle festzulegen, Probenahmen unterschiedlicher Zielsetzung (Bodenphysik, Bodenschadstoffe, Humus, Biodiversität) möglichst zusammenzulegen und die benötigten Probenahmetiefen aufeinander abzustimmen.

Daneben müssen einige ausgewählte BDF, sog. „Intensiv-BDF“ mit jährlichen Beprobungsintervallen für bestimmte Fragestellungen eingerichtet werden, wie dies zum Teil schon bei den Regenwurmuntersuchungen der Fall ist. Die jährliche Regenwurmprobenahme fand über 5 Jahre auf 5 Acker-BDF statt. Außerdem erfolgt die jährliche Beprobung seit über 10 Jahren auf 2 Grünland-BDF, mit dem Ziel jährliche Schwankungen zu erfassen und mit Hilfe dieser Erkenntnisse die langfristigen Trends in ihrer Schwankungsbreite besser einordnen zu können.

8 Schlusswort

Das Bodendauerbeobachtungs-Programm in Bayern erfüllt seit über 35 Jahren die wichtige Funktion, den Bodenzustand zu dokumentieren, Veränderungen zu erkennen und deren mögliche Ursachen zu benennen. Dass sich die Themenschwerpunkte im Laufe der Jahrzehnte verschieben, kann dabei als Beleg gewertet werden, dass Umweltschutzmaßnahmen, wenn sie rechtzeitig ergriffen werden, durchaus zum Erfolg führen. Gleichzeitig ist der Boden immer neuen Herausforderungen ausgesetzt, sei es der Einsatz von immer schwereren Maschinen, die Auswirkungen des Klimawandels mit Folgen wie Erosion und Trockenheit, das Auftreten neuartiger Chemikalien in der Umwelt oder der Verlust von Biodiversität.

Gesellschaftlich und politisch gewinnt das Schutzgut Boden gerade zunehmend an Aufmerksamkeit. Der Erhalt von Grünland und der Schutz von Mooren, der durch gesetzliche und freiwillige Maßnahmen vorangetrieben wird, honoriert deren Bedeutung als CO₂-Speicher und Lebensraum für zahlreiche Arten. Gesetze auf nationaler und europäischer Ebene fordern verbindlich den Bodenzustand zu dokumentieren. Gleichzeitig bleibt der Boden wichtigste Grundlage für die Lebensmittel- und Futtermittelproduktion. Um die Landwirtinnen und Landwirte in Bayern faktenbasiert bei ihren Entscheidungen beraten zu können, werden in der Boden-Dauerbeobachtung wichtige Messreihen zu Bodenparametern

generiert, mit dem Ziel Empfehlungen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit zu treffen und sie bei zukünftigen Herausforderungen begleiten zu können.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Akteuren, die zum Gelingen der Langzeitaufgabe „Bodenmonitoring“ in Bayern beigetragen haben und weiter beitragen.

Dazu gehören zuerst die Landwirtinnen und Landwirte, die seit vielen Jahrzehnten ihre Flächen und Bewirtschaftungsdaten zuverlässig zur Verfügung stellen. Daneben gilt der Dank allen LfL-Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die bei Probenahmen, Vegetationskartierungen und der Analytik im Labor für eine solide Datenbasis sorgen.

Genauso wichtig ist die finanzielle Ausstattung der BDF-Arbeitsgruppen durch das StMELF, bei dem wir uns für das langjährige Vertrauen in unsere Arbeit bedanken.

Literaturverzeichnis

Standorte, Methode und Repräsentativität:

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2017: Landwirtschaft im Klimawandel, Lösungen, die Geldsparen, 15. Kulturlandschaftstag. LfL-Schriftenreihe 2017 (5). Freising.

Bayerisches Landesamt für Steuern (LfSt), 2009: Merkblatt über den Aufbau der Bodenschätzung. www.finanzamt.bayern.de/Informationen/Steuerinfos/Weitere_Themen/Bodenschaetzung/Merkblatt-ueber-den-Aufbau-der-Bodenschaetzung.pdf. München.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2020a: Umweltatlas Bayern, Geologische Raumgliederung, Stand 01.01.2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2020b: Umweltatlas Bayern, Geologische Karte 1:500.000, Stand 01.01.2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2020c: Umweltatlas Bayern, Übersichtsbodenkarte 1:25.000, Stand 01.01.2020. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF), 2021a: InVeKoS-Daten zur Flächennutzung in Bayern von 1993 bis 2018. PostgreSQL Datenbank München.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF), 2021b: InVeKoS-Daten zur Tierhaltung in Bayern von 1995 bis 2018. PostgreSQL Datenbank München.

Deutscher Bundestag, 10. Wahlperiode, 1985: Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung. Drucksache 1985 (10/2977). Bonn.

European Commission, 2015: Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS) 2013 - Statistical Units - Data set. Eurostat/GISCO.

Wittmann, O., 1991: Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern. Übersichtskarte 1:1.000.000. 2. erweiterte Auflage. Geologisches Landesamt Bayern (GLA). GLA-Fachberichte, 5-1991. München.

Bodenphysik:

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller). Stuttgart.

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2005: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern. LfL Schriftenreihe, 8-2005, 57-60.

BBodSchV, 1999: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328). Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamt für Justiz. <http://www.gesetze-im-internet.de/>.

Briones, M. J. I., Schmidt, O. 2017: Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*. 2017, 4396-4419, DOI: 10.1111/gcb.13744.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013: Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn.

DIN ISO 11272, 2001: Handbuch der Bodenuntersuchung. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohdichte. DIN ISO 11272, 2001-01. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 11274, 2001: Handbuch der Bodenuntersuchung. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren. DIN ISO 11274. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 11277, 2002: Handbuch der Bodenuntersuchung. Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. DIN ISO 11277, 2002-08. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Geischeder, R. 2011: Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen, Dissertation am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München, 2011.

Harrach, T., Vorderbrügge, T. 1991: Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Bericht über Landwirtschaft* 204: S. 69 – 82.

Haynes, R. J.; Naidu, R., 1998: Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Jg. 51, Nr. 2, S. 123–137.

Horn, R., Lebert, M., Burger, N. 1991: Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. -Materialien des Bayer. Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 73 – München.

Johnston, A. S. A., Sibly, R. M., Thorbek, P. 2018: Forecasting tillage and soil warming effects on earthworm populations. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 1-12, DOI: 10.1111/1365-2664.13096.

LBP, 1997: Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF), Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil III Boden: Gefüge, Organische Substanz, Bodenorganismen, Vegetation; In: *Bodenkultur und Pflanzenbau*, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 6/97, Freising-München.

LfL, 2005: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern, Zwischenbilanz der wichtigsten Ergebnisse 1985-2005, 4. Kulturlandschaftstag der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischer Landbau und Bodenschutz am 26. Oktober 2005 in Freising-Weihenstephan, Tagungsband als LfL-Schriftenreihe 8-2005, ISSN 1611-4159.

Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C., 2004: Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung. UBA-Texte 46/04, Berlin.

Schlüter, S.; Weller, U.; Vogel, H.-J. 2011: Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Jg. 174, Nr. 3, S. 395–403.

Sommer, C., Brunotte, J. 2003: Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. *Landnutzung und Landentwicklung* 44, H. 5. S. 220 – 228.

Wittmann, O., 1991: Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern. Übersichtskarte 1:1.000.000. 2. erweiterte Auflage. Geologisches Landesamt Bayern (GLA). GLA Fachberichte, 5-1991. München.

Bodenschadstoffe:

AbfKlärV, 2017: Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost, Vollzitat: "Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist", https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/AbfKl%C3%A4rV.pdf.

BBodSchG, 1998: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, kurz: Bundes-Bodenschutz-Gesetz, BGBl. I S. 502, <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/>.

BBodSchV, 1999: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, BGBl. I, S. 1554 (galt bis einschließlich 31.07.2023).

BBodSchV, 2021: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, neu (gilt seit 01.08.2023), Vollzitat: "Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)", Ersetzt V 2129-32-1 v. 12.7.1999 I 1554 (BBodSchV), https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv_2023/.

BioAbfV, 1998: Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 700; 2023 I Nr. 153) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/>.

BImSchG, 1974: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 11 Absatz 3 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/>.

DüMV, 2012: Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist, Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln, kurz: Düngemittelverordnung, BGBl. I S. 2482, https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/.

DüV, 2017: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen, kurz: Düngeverordnung, BGBl. I S. 1305, Vollzitat: "Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die zuletzt durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist", https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html.

EG-Richtlinie 2002/32/EG, 2002: über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung, vom 7. Mai 2002 – letzte konsolidierte Fassung vom 28.11.2019.

EU-Düngeprodukte-Verordnung, 2019: VERORDNUNG (EU) 2019/1009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES mit Vorschriften für die

Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003, letzte konsolidierte Fassung vom 16.03.2023.

EU-Kontaminanten-Verordnung, 2023: VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006.

FuttMV, 1981: Futtermittelverordnung, Vollzitat: "Futtermittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 29. August 2016 (BGBl. I S. 2004), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juli 2020 (BGBl. I S. 1700) geändert worden ist", https://www.gesetze-im-internet.de/futtmv_1981/.

Kratz, S., Haneklaus, S., Schnug, E., 2009: Kupfergehalte in Acker- und Grünlandböden und das Verhältnis dieser Gehalte zu den durch Pflanzenschutz ausgebrachten Kupfermengen in JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN, 61 (4). S. 112–116, 2009, ISSN 0027-7479 VERLAG EUGEN ULMER KG, STUTTGART.

LBP, 1997: Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF), Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil I Stoffbestand des Bodens - Nährstoffe, Schadstoffe; In: Bodenkultur und Pflanzenbau, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 4/97, Freising-München.

LBP, 1997: Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF), Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil II Stoffeinträge, Stoffausträge, Schwermetall-Bilanzierung verschiedener Betriebstypen; In: Bodenkultur und Pflanzenbau, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 5/97, Freising-München.

LfL, 2005: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern, Zwischenbilanz der wichtigsten Ergebnisse 1985-2005, 4. Kulturlandschaftstag der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischer Landbau und Bodenschutz am 26. Oktober 2005 in Freising-Weihenstephan, Tagungsband als LfL-Schriftenreihe 8-2005, ISSN 1611-4159.

LfL, 2023: 35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern, LfL-Schriftenreihe, Band 3: Bodenschadstoffe (Langfassung/ausführlicher Bericht zu Band 6 „Kurzfassung und Fazit“).

LfU, 2011: Hintergrundwerte von anorganischen und organischen Schadstoffen in Böden Bayerns - Vollzugshilfe für den vorsorgenden Bodenschutz mit Bodenausgangsgesteinskarte von Bayern 1:500.000, Bayerisches Landesamt für Umwelt - UmweltSpezial.

LfU, 2005-2020: Lufthygienische Berichte des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/lufthygienische_berichte.

MantelV, 2021: Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, BGBl. I 43 S. 2598–2752.

Portner, J., Roßbauer, G., Bauer, M. (nicht datiert): Nährstoffaufnahme des Hopfens.

Scheffer, F., Schachtschabel, P. et al., 2010: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Smidt, G. A. et al., 2011: Cadmium and Uranium in German and Brazilian Phosphorous Fertilizers, in B. Merkel, M. Schipek, The New Uranium Mining Boom, Springer Verlag.

Strumpf, T., Engelhard, B. et al., 2011: Erhebung von Kupfergesamtgehalten in ökologisch und konventionell bewirtschafteten Böden, Teil 2: Gesamtgehalte in Böden deutscher Hopfenanbaugebiete, *JOURNAL FÜR KULTURPFLANZEN*, 63 (5). S. 144–155, 2011, ISSN 0027-7479 VERLAG EUGEN ULMER KG, STUTTGART.

TA-Luft, 2021: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft, Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 18. August 2021.

Utermann, J., 2008: Uranium in German Soils, Loads and Fate of Fertilizer-derived Uranium, Leiden (NL) und Hannover, 33-45.

Utermann, J. et al., 2009: Uran in Böden und Sickerwässern - gibt es Indizien für eine Phosphordünger-bürtige Uran-Anreicherung? Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) 2009: Böden - eine endliche Ressource, Bonn.

Humus:

Bellamy, P.H., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Lark, R.M., Kirk, G.J.D., 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature*, 437, 245–248.

Conant, R.T., Cerri, C.E.P., Osborne, B.B., Paustian, K., 2017. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2), 662-668.

Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J., Lugato, E., 2019. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12(12), 989–994.

Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440, 165–173.

Freibauer, A., Rounsevell, M.D.A., Smith, P., Verhagen, J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 122(1), 1–23.

García-Palacios, P., Gattinger, A., Bracht-Jørgensen, H., et al., 2018. Crop traits drive soil carbon sequestration under organic farming. *Journal of Applied Ecology*, 55, 2496-2505.

Goidts, E., van Wesemael, B., 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955–2005). *Geoderma*, 141, 341–354.

Goidts, E., van Wesemael, B., van Oost, K., 2009. Driving forces of soil organic carbon evolution at the landscape and regional scale using data from a stratified soil monitoring. *Global Change Biology*, 15, 2981-3000.

Guillaume, T., Bragazza, L., Levasseur, C., Libohova, Z., Sinaj, S., 2021. Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland-grassland systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 305, 107184.

Hanegraaf, M.C., Hoffland, E., Kuikman, P.J., Brussaard, L., 2009. Trends in soil organic matter contents in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils. *European Journal of Soil Science*, 60, 213-222.

Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V., Regina, K., 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology*, 19, 1456–1469.

Hirte, J., Walder, F., Hess, J., Büchi, L., Colombi, T., van der Heijden, M.G., Mayer, J., 2021. Enhanced root carbon allocation through organic farming is restricted to topsoils, *Science of The Total Environment*, 755(2), 143551.

- Kirchmann, H., Kätker, T., Bergström, L., Börjesson, G., Bolinder, M.A., 2016. Flaws and criteria for design and evaluation of comparative organic and conventional cropping systems. *Field Crops & Research*, 186, 99–106.
- Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 27(6), 753-760.
- Knorr, W., Prentice, I.C., House, J.I., Holland, E.A., 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433, 298-301.
- Kolbe, H., Zimmer, J., Beck, Breuer, J., R., Reinhold, J., Barthelmes, G., Bauriegel, A., Weiser, C., Bull, I., Ebel, G., Hanff, H., 2015. Leitfaden zur Humusversorgung – Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 64 S.
- Krauss, M., Wiesmeier, M., Don, A., Cuperus, F., Gättinger, A., Gruber, S., Haagsma, W.K., Peigné, J., Chiodelli Palazzoli, M., Schulz, F., van der Heijden, M.G.A., Vincent-Caboud, L., Wittwer, R.A., Zikeli, S., Steffens, M., 2022. Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil and Tillage Research*, 216, 105262.
- Lavallee, J.M., Soong, J.L., Cotrufo, M.F., 2019. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261–273.
- Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente-Vicente, J.L., Qin, Z., McNamara, N.P., Zinn, Y.L., Llorente, M., Liebig, M., Kuhnert, M., Dondini, M., Don, A., Diaz-Pines, E., Datta, A., Bakka, H., Aguilera, E., Hillier, J., 2020. Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology*, 26(7), 4158-4168.
- Leifeld, J., Fuhrer, J., 2010. Organic farming and soil carbon sequestration: What do we really know about the benefits? *Ambio*, 39, 585–599.
- Liu, C., Lu, M., Cui, J., Li, B., Fang, C., 2014. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 20(5), 1366-1381.
- Maillard, É., Angers, D.A., 2014. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 20, 666–679.
- Mayer, S., Wiesmeier, M., Sakamoto, E., Hübner, R., Cardinael, R., Kühnel, A., Kögel-Knabner, I., 2022. Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107689.
- Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., Swan, A., 2019. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*, 1(8).
- Peplau, T., Schroeder, J., Gregorich, E., Poepflau, C., 2021. Long-term geothermal warming reduced stocks of carbon but not nitrogen in a subarctic forest soil. *Global Change Biology*, 27, 5341–5355.
- Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B.A.S., Schumacher, J., Gensior, A., 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology* 17(7), 2415-2427.

Poeplau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41.

Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., Cassman, K.G., 2014. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 4, 678-683.

Reijneveld, A., VanWensem, J., Oenema, O., 2009. Soil organic carbon contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004. *Geoderma*, 152, 231–238.

Saby, N.P.A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemercier, B., Follain, S., Walter, C., Schwartz, C., 2008. Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990–2004. *Soil Use & Management*, 24, 254–262.

Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Hiederer, R., Kapos, V., 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), 81-91.

van Wesemael, B., Chartin, C., Wiesmeier, M., von Lützw, M., Hobley, E., Carnol, M., Krüger, I., Champion, M., Kögel-Knabner, I., 2019. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 274, 62-75.

Walker, T.W.N., Kaiser, C., Strasser, F., Herbold, C.W., Leblans, N.W., Wuebken, D., Janssens, I.A., Sigurdsson, B.D., Richter, A., 2018. Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming. *Nature Climate Change*, 8, 885–889.

West, T.O., Post, W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1930–1946.

Regenwürmer:

Bertrand, M., Barot, S., Blouin, M., Whalen, J., De Oliveira, T., 2015. Earthworm services for cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2015, 35 (2), pp.553-567. <10.1007/s13593-014-0269-7>. <hal-01284301

Blakemore, R.J., 2018. Critical Decline of Earthworms from Organic Origins under Intensive, Humic SOM-Depleting. *Agriculture. Soil Syst.* **2018**, 2, 33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020033>

Blouin, M., Hodson, M.E., Delgado, E.A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K.R., Dai, J., Dendooven, L., Peres, G., Tondoh, J.E., Cluzeau, D., Brun, J.-J., 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. – *European Journal of Soil Science* 64, 161-182.

Briones, M.J.I., Schmidt, O., 2017. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*. 23. 4396–4419. doi.org/10.1111/gcb.13744.

Burmeister, J., Parzefall, S., Ebertseder, F., Henkelmann, G., Walter, R., Fritz, M., 2020. Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL. *Berichte aus dem TFZ* 67. <https://www.tfz.bayern.de/service/publikationen/047019/index.php>

Capelle v. C., Schrader, S., Brunotte, J., Heinrich, J., 2012. Wie Bodentiere auf unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren reagieren. Bodenleben erhalten und fördern. – Landwirtschaft ohne Pflug 1/2, 17-22.

Castro L. J., Barreal, M.E., Briones, M., Gallego, P., 2019. Earthworm communities in conventional and organic fruit orchards under two different climates. Applied Soil Ecology. 144. 83-91. 10.1016/j.apsoil.2019.07.013.

Eijsackers, S.E., Beneke, P., Maboeta, M., Louw, J.P.E., Reinecke, A.J. 2005. The implications of copper fungicide usage in vineyards for earthworm activity and resulting sustainable soil quality. Ecotoxicology and Environmental Safety, Volume 62, Issue 1, 99-111, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.02.017>.

Ehrmann, O., 1996. Regenwürmer in einigen südwestdeutschen Agrarlandschaften: Vorkommen, Entwicklung bei Nutzungsänderungen und Auswirkungen auf das Bodengefüge. - Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 35, 135 S.

Ehrmann, O., 2012. Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs. - Hrsg. LUBW. 64 S. (aufgerufen am 26.01.2015). <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/101762/U13-M315-N08.pdf?command=downloadContent&filename=U13-M315-N08.pdf>

Ehrmann, O., 2015. Regenwürmer in den Böden Baden-Württembergs – Vorkommen, Gefährdung und Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg 105: 125-176.

Ehrmann, O., 2016. Einfluss der Regenwürmer auf die Eigenschaften des Unterbodens - Vorteile bei Starkregen und Trockenheit. Landwirtschaft ohne Pflug 11, 40-44.

Fründ, H.-C., Graefe, U., Tischer, S., 2011. Chapter 16. Earthworms as bioindicators of soil Quality. In: A. Karaca (ed.), Biology of Earthworms, Soil Biology 24, DOI 10.1007/978-3-642-14636-7_16, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, 261-278.

Jänsch, S., Römbke, J., 2009. Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel-Wirkstoff: Ökologische Auswirkungen der Akkumulation von Kupfer im Boden. UBA Texte 10/09. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3752.pdf>

Johnson-Maynard, J.L., Umiker, K.J., Guy, S.O., 2007. Earthworm dynamics and soil physical properties in the first three years of no-till management. - Soil and Tillage Research 94, 338-245.

Johnston ASA, Sibly RM, Thorbek P. 2018. Forecasting tillage and soil warming effects on earthworm populations. J Appl Ecol. 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13096>

Kanianska R., Jad'ud'ová J., Makovníková, J., Kizeková, M., 2016. Assessment of Relationships between Earthworms and Soil Abiotic and Biotic Factors as a Tool in Sustainable Agricultural. – Sustainability 8, 906; doi:10.3390/su8090906.

Krück, S., Nitzsche, O., Schmidt, W., 2001. Regenwürmer vermindern Erosionsgefahr. - Landwirtschaft ohne Pflug 1, 18-21.

Lentiri, A., Colinet, G., Alabi, T., Cluzeau, D., Zirbes, L., Haubruge, E., Francis, F., 2014. Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review. – Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 18(1), 121-133.

Leroy, B. L., Schmidt, O., van den Bossche, A., Reheul, D., Moens, M., 2008. Earthworm population dynamics as influenced by the quality of exogenous organic matter. *Pedobiologia*, Jg. 52, Nr. 2, 139–150.

Mariotte, P., Le Bayon R.-C., Eisenhauer, N., Guenat, C., Buttler, A. 2016. Subordinate plant species moderate drought effects on earthworm communities in grasslands.- *Biology & Biochemistry* 96, 119-127.

Milcu, A., Patsch, S., Scherber, C., Weisser, W.W., Scheu, S. 2008. Earthworms and legumes control litter decomposition in a plant diversity gradient. *Ecology*, 89 (7), 1872-82.

Moos, J. H., Schrader, S., Paulsen, H. M., 2017. Reduced tillage enhances earthworm abundance and biomass in organic farming: A meta-analysis. *Appl Agric Forestry Res* · 3/4, 67, 123-128, DOI:10.3220/LBF1512114926000

Paoletti, M.G., Sommaggio, D., Favretto, M.R., Petruzzelli, G., Pezzarossa, B., Barbafieri, M., 1998. Earthworms as useful bioindicators of agroecosystem sustainability in orchards and vineyards with different inputs. *Applied Soil Ecology*, Volume 10, Issues 1–2, 1998, 137-150, [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00036-5).

Pelosi, C., Pey, B., Hedde, M., Caro, G., Capowiez, Y., Guernion, M., Peigné, J., Piron, D., Bertrand, M., Cluzeau, D., 2014. Reducing tillage in cultivated fields increases earthworm functional diversity, *Applied Soil Ecology*, 83, 2014, 79-87, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.10.005>.

Pérès, G., Cluzeau, D. Curmi, P. Hallaire, V. 1998. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. *Biol Fertil Soils* 27, 417-424.

Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L., Cluzeau, D., 2011. Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia* 54S, S77-S87.

Prendergast-Miller, M.T., Jones, D.T., Berdeni, D., Bird, S., Chapman, P.J., Firbank, L., Grayson, R., Helgason, T., Holden, J., Lappage, M., Leake, J., Hodson, M.E, 2021. Arable fields as potential reservoirs of biodiversity: Earthworm populations increase in new leys. *Science Total Environment*;789, (2021), 147880, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147880>.

Riepert, F., 2009. Auswirkungen von Kupferbelastungen auf ausgewählte Indikatoren der Bodenzönose. *Journal für Kulturpflanzen*, 61 (4), 131-139.

Schmidt, O., Curry, J.P., Hackett, R.A., Purvis, G. and Clements, R.O., 2001, Earthworm communities in conventional wheat monocropping and low-input wheat-clover intercropping systems. *Annals of Applied Biology*, 138: 377-388. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2001.tb00123.x>

Schmidt, O., Clements, R.O., Donaldson, G., 2003. Why do cereal-Legume intercrops support large earthworm populations? *Applied Soil Ecology*, 22, 181-190.

Singh J, Cameron E, Reitz T, Schädler M, Eisenhauer N. 2021. Grassland management effects on earthworm communities under ambient and future climatic conditions. *Eur J Soil Sci.* 2021;72:343–355. <https://doi.org/10.1111/ejss.12942>

Singh J., Schädler, M., Demetrio, W., Brownz, G.G., Eisenhauer N., 2019. Climate change effects on earthworms - a review. *Soil Org.* 2019 Dec 1;91(3):114-138. doi: 10.25674/so91iss3pp114. PMID: 31908681; PMCID: PMC6944501.

Sizmur, T., Martin, E., Wagner K, Parmentier E, Watts C, Whitmore AP., 2017. Milled cereal straw accelerates earthworm (*Lumbricus terrestris*) growth more than selected organic amendments. *Appl Soil Ecol.* 2017 May;113:166-177. doi: 10.1016/j.apsoil.2016.12.006. PMID: 28469291; PMCID: PMC5391807.

Vrsic, S., 2011. Soil erosion and earthworm population responses to soil management systems in steep-slope vineyards. *Plant, Soil and Environment* 57 (6), 258-263.

Walter, R., Burmeister, J., Wolfrum, S., 2017a. Maisanbau regenwurmfreundlich gestalten - auf Bodenruhe und gute Humusversorgung achten. *Mais*, Jg. 44, Nr. 4, S. 181–185

Walter, R., Mitzdorf, F., Wolfrum, S., Heuwinkel, H., 2020. Regenwürmer profitieren im ökologischen Landbau von Klee gras als Vorfrucht und von Klee gras mulch zur organischen Düngung. In: Wiesinger, K., Reichert, E., Saller, J., Pflanz w. (Hrsg.): *Angewandte Forschung und Entwicklung für den ökologischen Landbau in Bayern, Tagungsband zum Öko-Landbautag 2020 (Online-Tagung)*, LfL Schriftenreihe 4/2020, S. 145-147. <https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/257334/index.php>.

Whalen, J. K., Parmelee, R. W., Edwards, C. A., 1998. Population dynamics of earthworm communities in corn agroecosystems receiving organic or inorganic fertilizer amendments. *Biology and Fertility of Soils*, Jg. 27, Nr. 4, S. 400–407

Vegetation:

Braun-Blanquet, J., 1964: *Pflanzensoziologie*. 3. Aufl. – Wien.

Blaix, C., Moonen, A.C., Dostatny, D.F.; Izquierdo, J., Le Corff, J., Morrison, J., Von Redwitz, C., Schumacher, M., Westerman, P.R., 2018. Quantification of regulating ecosystem services provided by weeds in annual cropping systems using a systematic map approach. *Weed Research* 58/3, 151-164.

Dierschke, H., 1994: *Pflanzensoziologie*. Stuttgart, Ulmer, 683 S.

Ellenberg, H.; Weber, H.E.; Düll, R.; Wirth, V.; Werner, W. & Paulißen, D., 1991: *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa*. – Göttingen (Verlag Erich Goltze KG): 248 S.

Gehring, K., Thyssen, S., 2019: *Integrierter Pflanzenschutz – Leitunkräuter in Getreide*. 6. veränderte Auflage; LfL-Institut für Pflanzenschutz.

https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/merkblaetter/leitunkraeuter-getreide_lfl-merkblatt.pdf (zuletzt aufgerufen am 19.4.2023)

Hilbig, W., 1987: Changes in segetal vegetation under conditions of industrialized agriculture. *Arch. Nat. Conserv. Landsc. Res.* 27, 229–249.

Hilbig, W., Bachthaler, G., 1992. Wirtschaftsbedingte Veränderungen der Segetalvegetation in Deutschland im Zeitraum von 1950-1990: *Angew. Bot.* 66, 192-209.

- Hofmeister, W., Garve, E., 2006: Lebensraum Acker. Reprint der 2. Aufl. Kessel. Remagen-Oberwinter: 237 S.
- Korneck, D., Schnittler, M., Klingenstein, F., Ludwig, G., Takla, M., Bohn, U., May, R., 1998: Warum verarmt unsere Flora? – Auswertung der Roten Liste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands. *Schr.-R. f. Vegetationskunde* 29, 299–444.
- Meyer, S., Wesche, K., Krause, B., Leuschner, C., 2013: Dramatic losses of specialist arable plants in Central Germany since the 1950s/60s – a cross-regional analysis. *Diversity and Distributions* 19, 1175-1187.
- Oberdorfer, E., 1994: Pflanzensoziologische Exkursionsflora. 7. Aufl. – Stuttgart, Ulmer, 1050 S.
- Pape, F., Meyer, S., Brambach, F., Bergmeier, E., 2023: Effektivität der Förderprogramme für Ackerwildkräuter in Südniedersachsen seit den 1980er Jahren. *Natur und Landschaft* 98, 169-179.
- Schneider, Ch.; Sukopp, U. & Sukopp, H., 1994: Biologisch-ökologische Grundlage des Schutzes gefährdeter Segetalpflanzen. – Bonn (Landwirtschaftsverlag) – Schriftenreihe für Vegetationskunde 26: 356 S.
- Schumacher, W., Schick, H.-P., 1998: Rückgang von Pflanzen der Äcker und Weinberge – Ursachen und Handlungsbedarf. *Schr.-R. f. Vegetationskunde* 29, 49–57.
- Van der Maarel, E., 2005: Vegetation ecology –an overview. - In: Van der Maarel, E (Hrsg.): *Vegetation ecology*. – Oxford (Blackwell Science Ltd.): 1-51.
- Wisskirchen, R. & Haeupler, H., 1998: Standardliste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands. - Stuttgart (Ulmer-Verlag): 765 S.