

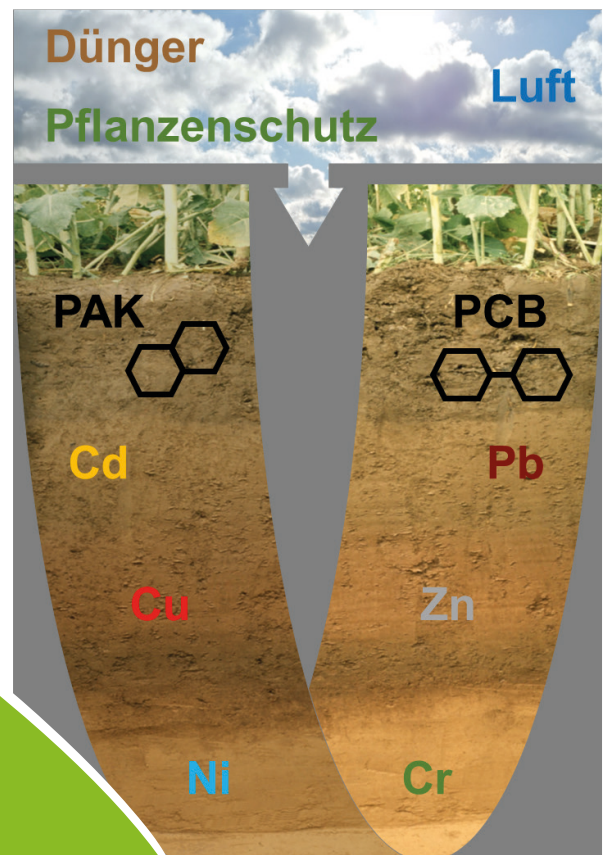


LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

35 Jahre Bodendauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern

Band 3: Bodenschadstoffe



2

2022

Schriftenreihe

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: Juli 2023

Druck: Erscheint als Online-Ausgabe zum Download

© LfL



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

Band 3: Bodenschadstoffe

**Titus Ebert, Christa Müller,
Johannes Burmeister**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einleitung20
2	Anorganische und organische Schadstoffe im Boden.....20
2.1	Stoffauswahl.....22
2.1.1	Anorganische Schad- und Spurenstoffe22
2.1.2	Organische Schadstoffe.....23
2.2	Methodik25
2.2.1	Probenahme25
2.2.2	Analytik Anorganische Schad- und Spurenstoffe25
2.2.3	Analytik Organische Schadstoffe26
2.3	Ergebnisse und Diskussion Anorganische Schad- und Spurenstoffe.....26
2.3.1	Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für Gesamtgehalte im Boden, Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung26
2.3.2	Gesamtgehalte im Boden - Übersicht.....28
2.3.3	Ergebnisse Gesamtgehalte ausgewählter Elemente31
2.3.3.1	Blei (Pb)31
2.3.3.2	Cadmium (Cd).....38
2.3.3.3	Chrom (Cr)45
2.3.3.4	Kupfer (Cu)52
2.3.3.5	Nickel (Ni).....60
2.3.3.6	Quecksilber (Hg)67
2.3.3.7	Zink (Zn)75
2.3.3.8	Antimon (Sb).....84
2.3.3.9	Arsen (As)91
2.3.3.10	Thallium (Tl)98
2.3.3.11	Uran105
2.3.3.12	Zusammenschau Gesamtgehalte der ausgewählten chemischen Elemente und deren Entwicklung im 35-jährigen Beobachtungszeitraum112
2.3.3.13	Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Gesamtgehalte der ausführlich beschriebenen Elemente in Oberböden der Acker-BDF117
2.3.4	Gehalte sonstiger chemischer Elemente im Boden125
2.3.5	Verfügbare Gehalte129
2.3.5.1	Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für verfügbare Gehalte im Boden, Prüf- und Maßnahmenwerte der Bundesbodenschutzverordnung...129
2.3.5.2	Ergebnisse – verfügbare Gehalte.....130

2.4	Ergebnisse und Diskussion Organische Schadstoffe	139
2.4.1	Umweltchemikalien	139
2.4.1.1	Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für Umweltchemikalien im Boden, Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung	141
2.4.1.2	Ergebnisse PCB	141
2.4.1.3	Ergebnisse PAK	143
2.4.2	Chlorierte Kohlenwasserstoffe	147
2.4.2.1	Ergebnisse CKW - Übersicht	149
2.4.2.2	DDT und Metaboliten	149
2.4.2.3	Hexachlorcyclohexane (HCH)	151
2.4.2.4	Hexachlorbenzol (HCB)	154
3	Einträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Böden	156
3.1	Schadstoffeinträge durch Wirtschaftsdünger	156
3.1.1	Stoffauswahl	157
3.1.2	Methodik	157
3.1.2.1	Probenahme	157
3.1.2.2	Analytik Wirtschaftsdünger	161
3.1.3	Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für Schadstoffeinträge durch Düngung, Kennzeichnungsschwellen- und Grenzwerte der DüMV	162
3.1.4	Wie gelangen Schad- und Spurenstoffe in Rinder- und Schweinegülle	163
3.1.5	Ergebnisse und Diskussion anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Wirtschaftsdüngern – Übersicht Rinder- und Schweinegülle	164
3.1.6	Ergebnisse ausgewählter anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Rinder- und Schweinegülle	165
3.1.7	Verbot antibiotischer Leistungsförderer und Futtermittelzusätze von Kupfer und Zink	170
3.1.8	Maximale Frachten nach Düngeverordnung (DüV)	174
3.2	Schadstoffeinträge durch Mineraldünger	179
3.3	Schadstoffeinträge durch Immissionen	181
3.3.1	Stoffauswahl	181
3.3.2	Methodik	181
3.3.3	Ergebnisse und Diskussion – Immissionen	184
3.4	Einträge von Kupfer und Zink bei Sonderkulturen	187
4	Stoffausträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe aus Böden	190
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	191
	Danksagung	195

Literaturverzeichnis	195
ANHANG	199

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1: Pb-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	32
Abb. 2: Pb-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	32
Abb. 3: Verteilung der Pb-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	33
Abb. 4: Pb-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	33
Abb. 5: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	34
Abb. 6: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	36
Abb. 7: Veränderung der Pb-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend >0 & $R^2>0.3$, grün=Trend <0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	37
Abb. 8: Cd-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	39
Abb. 9: Cd-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	39
Abb. 10: Verteilung der Cd-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	40
Abb. 11: Cd-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	40
Abb. 12: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	41
Abb. 13: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	43
Abb. 14: Veränderung der Cd-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend >0 & $R^2>0.3$, grün=Trend <0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	44
Abb. 15: Cr-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	46
Abb. 16: Cr-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	46
Abb. 17: Verteilung der Cr-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	47
Abb. 18: Cr-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	47

Abb. 19: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.	48
Abb. 20: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.	49
Abb. 21: Veränderung der Cr-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	50
Abb. 22: Cu-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	53
Abb. 23: Cu-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	53
Abb. 24: Verteilung der Cu-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	54
Abb. 25: Cu-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	54
Abb. 26: Cu-Gehalte im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV (Einteilung in Hopfen-BDF links, Wein-BDF Mitte, Obst-BDF rechts bei Beprobung 1985/86 gilt analog auch für die übrigen Beprobungen).	55
Abb. 27: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.	57
Abb. 28: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.	58
Abb. 29: Veränderung der Cu-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	59
Abb. 30: Ni-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	61
Abb. 31: Ni-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	61
Abb. 32: Verteilung der Ni-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	62
Abb. 33: Ni-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	62
Abb. 34: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.	64
Abb. 35: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben	

das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	65
Abb. 36: Veränderung der Ni-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	66
Abb. 37: Hg-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	69
Abb. 38: Hg-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	69
Abb. 39: Verteilung der Hg-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt.)	70
Abb. 40: Hg-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	70
Abb. 41: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	71
Abb. 42: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	72
Abb. 43: Veränderung der Hg-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	73
Abb. 44: Zn-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	76
Abb. 45: Zn-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	76
Abb. 46: Verteilung der Zn-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	77
Abb. 47: Zn-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.	77
Abb. 48: Zn-Gehalte im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV (Einteilung in Hopfen-BDF links, Wein-BDF Mitte, Obst-BDF rechts bei Beprobung 1985/86 gilt analog auch für die übrigen Beprobungen).	79
Abb. 49: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	80
Abb. 50: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	81
Abb. 51: Veränderung der Zn-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	83
Abb. 52: Sb-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (Sb	

	wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	85
Abb. 53:	Sb-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (Sb wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	85
Abb. 54:	Verteilung der Sb-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	86
Abb. 55:	Sb-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (Sb wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	86
Abb. 56:	Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	87
Abb. 57:	Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	88
Abb. 58:	Veränderung der Sb-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	89
Abb. 59:	As-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (As wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).	92
Abb. 60:	As-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (As wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	92
Abb. 61:	Verteilung der As-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).	93
Abb. 62:	As-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (As wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).	93
Abb. 63:	Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	95
Abb. 64:	Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	96
Abb. 65:	Veränderung der As-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	97

Abb. 66: Tl-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Tl wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).	100
Abb. 67: Tl-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Tl wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	100
Abb. 68: Verteilung der Tl-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).....	101
Abb. 69: Tl-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Tl wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).	101
Abb. 70: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	102
Abb. 71: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	103
Abb. 72: Veränderung der Tl-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$	104
Abb. 73: U-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (U wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	106
Abb. 74: U-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (U wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	106
Abb. 75: Verteilung der U-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).....	107
Abb. 76: U-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (U wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).....	107
Abb. 77: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	108
Abb. 78: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.	109

Abb. 79: Veränderung der U-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & R ² >0.3, grün=Trend<0 & R ² >0.3, grau=R ² <0.3.	110
Abb. 80: Spannen der Gesamtgehalte ausgewählter Elemente in BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen – gesamter Beobachtungszeitraum (1985-2016).	112
Abb. 81: Gesamtgehalte ausgewählter Elemente in Böden der 80 Acker-BDF (Vergleich Ober- und Unterböden) – gesamter Beobachtungszeitraum (1985-2016).	114
Abb. 82: Entwicklung der Gesamt-Gehalte ausgewählter anorganischer Stoffe im Oberboden der 80 Acker-BDF seit 1985.....	115
Abb. 83: Entwicklung der Gesamt-Gehalte ausgewählter anorganischer Stoffe im Oberboden der 18 Grünland-BDF seit 1985.	115
Abb. 84: Entwicklung der Gesamt-Gehalte ausgewählter anorganischer Stoffe im Oberboden der 7 Sonderkultur-BDF (3 Hopfen-, 1 Obst-, 3 Wein-BDF) seit 1985.....	116
Abb. 85: 16 statistisch ausgewählte Acker-BDF mit im Beobachtungszeitraum geänderter Bodenbearbeitung.....	117
Abb. 86: Korrelationsmatrix verschiedener Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Gesamtgehalte 11 ausgewählter Elemente in den Oberböden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (angegeben ist der jeweilige Rangkorrelationskoeffizient nach Kendall-Tau).....	118
Abb. 87: Korrelation der Entwicklung der Schadstoffgehalte im Oberboden der Acker-BDF mit der verstrichenen Zeit seit dem letzten Pflugeinsatz (bis zur letzten Probenahme) (Korrelationsmaß Kendall-Tau, eingefärbt nach Signifikanz).....	119
Abb. 88: Cu-Gehalte in BDF-Oberböden ausgewählter Acker-BDF ohne (grüne Boxplots, n=14 BDF) und mit organischer Düngung von Rind (n=28) oder Schwein (n=6).	120
Abb. 89: Zn- Gehalte in BDF-Oberböden ausgewählter Acker-BDF ohne (grüne Boxplots, n=14 BDF) und mit organischer Düngung von Rind (n=28) oder Schwein (n=6).	121
Abb. 90: Korrelation „orgDünger_Wende“ (Korrelationsmaß Kendall-Tau) für die verschiedenen Elemente eingefärbt nach Signifikanz (Graufärbung) für einen Wechsel bei der organischen Düngung im Beobachtungszeitraum.	122
Abb. 91: Korrelationsmaße (Kendall-Tau) für die Interkorrelation der Entwicklung der Elementgesamtgehalte (Trends) im Beobachtungszeitraum für 11 ausgewählte chemische Elemente in den Oberböden der 80 Acker-BDF.	123
Abb. 92: Korrelationsmatrix (Kendall-Tau) für die Korrelation der Trends und Mittelwerte und der Bodenart (11 ausgewählte chemische Elemente in Oberböden der Acker-BDF).....	124
Abb. 93: Gesamtgehalte weiterer Elemente in BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen im Beobachtungszeitraum (1985-2016).	125
Abb. 94: Gesamtgehalte weiterer Elemente in Böden der 80 Acker-BDF (Vergleich Ober- und Unterböden) – gesamter Beobachtungszeitraum (1985-2016).....	126
Abb. 95: Gesamtgehalte weiterer Elemente in Oberböden der 80 Acker-BDF während des Beobachtungszeitraums (1985-2016).....	127
Abb. 96: Gesamtgehalte weiterer Elemente in Oberböden der 18 Grünland-BDF während des Beobachtungszeitraums (1985-2016).	128
Abb. 97: Anteile pflanzenverfügbarer Gehalte (NH ₄ NO ₃ -Extrakt) am Gesamtgehalt (Königswasser-Extrakt) für Elemente, für die in der BBodSchV Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt sind (Ober(OB)- und Unterböden(UB) der Acker-BDF, Untersuchung 2005/2006).	132

Abb. 98: Anteile pflanzenverfügbarer Gehalte (NH ₄ NO ₃ -Extrakt) am Gesamtgehalt (Königswasser-Extrakt) für die übrigen in Kap. 2.3.3 ausführlich beschriebenen Elemente (Ober(OB)- und Unterböden(UB) der Acker-BDF, Untersuchung 2005/2006).	133
Abb. 99: Einfluss des pH-Wertes auf die Mobilität von Schwermetallen und deren Transfer in Pflanzen (verändert nach Hintermaier-Erhard & Zech, 1997).....	134
Abb. 100: Korrelationsmatrix aus pH-Wert, Sand- und Tongehalt sowie der im Ammoniumnitratextrakt des Bodens löslichen Elementgehalte für As, Cu, Ni, Zn, Pb und Cd in Oberböden der Acker-BDF mit Angabe des Kendall-Tau Korrelationskoeffizienten und des Signifikanzniveaus (Signifikanzsternchen).	135
Abb. 101: Verfügbare Gehalte an Schwermetallen auf Acker-BDF und Vergleich mit Prüf(PW - Pb, Tl)- und Maßnahmenwerten(MW - Cd für Brotweizenanbau oder Anbau stark Cd-anreichernder Gemüsearten) hinsichtlich Pflanzenqualität (Beprobung: 2005/2006 - für Unterböden gelten die 1,5-fachen PW und MW, PW und MW für Ober- und Unterböden sind nur eingezeichnet, wenn die y-Achsenkalierung dies zuließ).....	137
Abb. 102: Verfügbare Gehalte an Schwermetallen auf Acker-BDF und Vergleich mit Prüfwerten (PW) hinsichtlich Wachstumsbeeinträchtigungen (Beprobung: 2005/2006 - für Unterböden gelten die 1,5-fachen PW, die PW für Ober- und Unterböden sind nur eingezeichnet, wenn die y-Achsenkalierung dies zuließ).	138
Abb. 103: Gehalte an Summe PCB ₆ nach Ballschmiter in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden. Die Vorsorgewerte gelten für Böden ≤ 8% Humusgehalt. Die weniger strengen, höheren Vorsorgewerte für Böden über 8 % Humusgehalt werden bei BDF nicht erreicht und sind folglich nicht eingezeichnet.....	142
Abb. 104: Gehalte an BaP und Summe PAK ₁₆ in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1996-99 bezogen auf lufttrockenen Boden. Die Vorsorgewerte gelten für Böden ≤ 8 % Humusgehalt. Die weniger strengen, höheren Vorsorgewerte für Böden über 8 % Humusgehalt werden bei BDF nicht erreicht und sind folglich nicht eingezeichnet.	144
Abb. 105: Zeitliche Veränderung der BaP-Gehalte in Oberböden 12 ausgewählter BDF, differenziert nach Nutzung und bezogen auf lufttrockenen Boden.....	145
Abb. 106: Zeitliche Veränderung der Summe-PAK ₁₆ -Gehalte in Oberböden 12 ausgewählter BDF, differenziert nach Nutzung und bezogen auf lufttrockenen Boden.....	145
Abb. 107: Summe DDT und p,p'-DDE in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden. P,p'-DDE wurde unter den DDT-Metaboliten ausgewählt, weil bei Erstuntersuchung öfters Werte über der Nachweisgrenze lagen und es auf BDF mit den höchsten Konzentrationen im Boden gemessen wurde.	150
Abb. 108: Zeitliche Veränderung der Gehalte an Summe DDT+Metaboliten in BDF-Oberböden 10 ausgewählter BDF [$\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockener Boden].	151
Abb. 109: Lindan(γ -HCH(=Hexachlorcyclohexan))-Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden. .	152
Abb. 110: Zeitliche Veränderung der Gehalte an Lindan in BDF-Oberböden 10 ausgewählter BDF [$\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockener Boden].	153
Abb. 111: Hexachlorbenzol(HCB)-Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden.	154

Abb. 112:Zeitliche Veränderung der Gehalte an HCB in BDF-Oberböden 10 ausgewählter BDF [$\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockener Boden].....	155
Abb. 113:Cd- und U-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) - für Cd, im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.....	166
Abb. 114:Pb- und Hg-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.....	167
Abb. 115:Cr- und Ni-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) - für Ni, im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.....	168
Abb. 116:As- und Tl-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.....	169
Abb. 117:Cu- und Zn-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) - für Cu ist auch der Höchstgehalt der DüMV für Düngemittel mit zusätzlich den Typ bestimmenden Spurennährstoffen eingezeichnet, er gilt jedoch nicht für Wirtschaftsdünger, s. a. Kap. 3.1.3).....	170
Abb. 118:Pb-, Cd- und Hg-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweingülle.....	175
Abb. 119:As-, Tl- und U-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweingülle.....	175
Abb. 120:Cr- und Ni-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N- Düngung mit Rinder- und Schweingülle.....	176
Abb. 121:Cu- und Zn-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N- Düngung mit Rinder- und Schweingülle.....	176
Abb. 122:Entwicklung des Verbrauchs an Phosphaten (als P_2O_5) in Bayern von 1980-2018 (Daten LfL-IBA).	181
Abb. 123:Depositionssammler nach Bergerhoff (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt).....	182
Abb. 124:Lage der 6 immissionsökologischen Dauerbeobachtungsstationen (DBS) des LfU in ländlichem Umfeld (grüne Kreise, außer Ansbach und Augsburg) (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt).	183
Abb. 125:Mittlere Einträge an Cadmium, Chrom und Nickel über Immissionen (ländliche Gebiete) in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	184
Abb. 126:Mittlere Einträge an Blei, Kupfer und Zink über Immissionen (ländliche Gebiete) in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	185
Abb. 127:Zeitlicher Verlauf der Reinkupfergaben auf Hopfen-BDF im Beobachtungszeitraum.	189

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Bei Erstaufnahme untersuchte Pflanzenschutzmittelrückstände..... (Mb. = Metabolit).....	23
Tab. 2: Vorsorgewerte für Metalle in mg kg ⁻¹ Trockenmasse nach Anh. 2, Tab. 4.1, BBodSchV (BBodSchV, 1999).....	27
Tab. 3: Vorsorgewerte Novelle BBodSchV, (gültig ab 01.08.2023) in mg kg ⁻¹ TM für Arsen und Thallium (MantelV, 2021, Art. 2, Anl. 1, Tabelle 1).	27
Tab. 4: Untersuchungsergebnisse der elf im Kap. 2.3.3 ausführlich beschriebenen Elemente, Königswasserextrakt, BDF-Böden, gesamter Beobachtungszeitraum (4 Serien differenziert nach Nutzung und Schicht (Ober- (OB) und Unterböden (UB)) [Angaben in mg kg ⁻¹ TM].	29
Tab. 5: Untersuchungsergebnisse „übrige Elemente“, Königswasserextrakt, BDF-Böden, gesamter Beobachtungszeitraum differenziert nach Nutzung und Schicht (Ober- (OB) und Unterböden (UB)) [Angaben in mg kg ⁻¹ TM bzw. % TM bei Al und Fe].....	30
Tab. 6: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	34
Tab. 7: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	36
Tab. 8: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	42
Tab. 9: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	43
Tab. 10: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	48
Tab. 11: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	50
Tab. 12: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	57
Tab. 13: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	58
Tab. 14: Mittlere Nickelgehalte in Ober- und Unterböden der Acker-BDF in mg kg ⁻¹	63
Tab. 15: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	64
Tab. 16: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	65
Tab. 17: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	71
Tab. 18: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	73
Tab. 19: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	80
Tab. 20: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	82
Tab. 21: Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	88
Tab. 22: Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.....	89

Tab. 23: Mittlere und Maximale Arsen-Gehalte in Ober-(OB) und Unterböden (UB) der Acker-BDF.	94
Tab. 24: Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.	95
Tab. 25: Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.	96
Tab. 26: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.	102
Tab. 27: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.	103
Tab. 28: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.	109
Tab. 29: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.	110
Tab. 30: Anzahl BDF mit/ohne Vorsorgewert(VW)-Überschreitungen im Oberboden. .	113
Tab. 31: Medianwerte Kupfer in BDF-Oberböden von Acker-BDF mit und ohne organische Düngung von Rind oder Schwein [mg kg^{-1}].	120
Tab. 32: Medianwerte Zink in BDF-Oberböden von Acker-BDF mit und ohne organische Düngung von Rind oder Schwein [mg kg^{-1}].	121
Tab. 33: Prüf(PW)- und Maßnahmenwerte(MW) hinsichtlich Pflanzenqualität auf Ackerbauflächen und Nutzgärten für im Ammonium-Nitrat-Extrakt ermittelte, (pflanzen-)verfügbare Bodengehalte [Oberböden (0-30 cm), Unterböden (30-60 cm)].	130
Tab. 34: Prüfwerte (PW) hinsichtlich Wachstumsbeeinträchtigungen auf Ackerbauflächen für im Ammonium-Nitrat-Extrakt ermittelte, (pflanzen-)verfügbare Bodengehalte [Oberböden (0-30 cm), Unterböden (30-60 cm)].	130
Tab. 35: Verfügbare Gehalte anorganischer Schad- und Spurenstoffe in den Böden der 80 Acker-BDF in $\mu\text{g kg}^{-1}$ TM für Elemente, für die in der BBodSchV Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt sind (Beprobung 2005/06, OB = Oberböden, UB = Unterböden).	130
Tab. 36: Verfügbare Gehalte der übrigen anorganischen Schad- und Spurenstoffe in den Böden der 80 Acker-BDF in $\mu\text{g kg}^{-1}$ TM, für die keine Prüf- und Maßnahmenwerte in der BBodSchV festgelegt sind (Beprobung 2005/06, OB = Oberböden, UB = Unterböden).	131
Tab. 37: Vorsorgewerte für organische Stoffe in mg kg^{-1} TM Boden (BBodSchV, 1999).	141
Tab. 38: PCB-Gehalte in BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1985-87) in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden, differenziert nach Nutzungen (MW=Mittelwert).	141
Tab. 39: PAK-Gehalte in BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1996-99) in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden, differenziert nach Nutzungen (MW=Mittelwert).	143
Tab. 40: CKW-Gehalte in BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1985-87) in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden, differenziert nach Nutzungen (MW=Mittelwert).	149
Tab. 41: Prozentuale Anteile verschiedener DDT und Metaboliten in technischem DDT (BUA-Stoffbericht 216, 1998: Gesellschaft Deutscher Chemiker).	149
Tab. 42: Anzahl der im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben genommenen Rindergülleproben (rot: Zusatzbetriebe).	158
Tab. 43: Anzahl der im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben genommenen Schweinegülleproben (rot: Zusatzbetriebe).	160

Tab. 44: Im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben beprobte Rinder(RG)- und Schweinegülle (SG).....	161
Tab. 45: Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte der DüMV für anorganische Schadstoffe (TM=Trockenmasse, FM=Frischmasse).	162
Tab. 46: Unerwünschte Stoffe (Auswahl) in Futtermitteln gemäß § 8 der Futtermittelverordnung (FuttMV) und EG-RL 32/2002.	163
Tab. 47: Untersuchungsergebnisse der in DüMV geregelten Elemente in Rinder- und Schweinegülle im Beobachtungszeitraum (1985-2018) in mg kg ⁻¹ TM (statistische Kennwerte der Einzelbeprobungen, siehe Tab. 65 & Tab. 66 im ANHANG; WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, N=Anzahl untersuchter Proben. Im Bodenteil in Kap 2.3.3 ausführlich beschriebene Elemente sind blau markiert).....	164
Tab. 48: Untersuchungsergebnisse der übrigen Elemente in Rinder- und Schweinegülle im Beobachtungszeitraum (1985-2018) in mg kg ⁻¹ TM (statistische Kennwerte der Einzelbeprobungen, siehe Tab. 65 & Tab. 66 im ANHANG; WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, N=Anzahl untersuchter Proben. Im Bodenteil in Kap 2.3.3 ausführlich beschriebene Elemente sind blau markiert).	165
Tab. 49: Kupfer und Zink - Bedarf und Höchstgehalte im Alleinfuttermittel (LGL, 2022).	172
Tab. 50: Futtermittelverordnung (FuttMV) - Regelungen für Kupfer 1986 bis 2018 für Schweine und Rinder [alle Angaben in mg kg ⁻¹ bei 88 % TM].....	172
Tab. 51: Futtermittelverordnung (FuttMV) - Regelungen für Zink 1985 bis 2018 für Schweine und Rinder [alle Angaben in mg kg ⁻¹ bei 88% TM].....	173
Tab. 52: Trockenmasse(TM)- und Gesamtstickstoff(N _{ges})-Gehalte in Rinder und Schweinegülle von BDF- und Zusatzbetrieben in Prozent (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, N=Anzahl untersuchter Gülleproben).	177
Tab. 53: Medianwerte Cu- und Zn-Frachten bei nach DüV maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweinegülle in g ha ⁻¹ a ⁻¹ (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers).	178
Tab. 54: Schwermetalleinträge durch Mineraldüngung in g ha ⁻¹ a ⁻¹ (KTBL, 2005).	179
Tab. 55: Einträge an Reinkupfer durch Pflanzenschutzmittel und berechnete Gehaltszunahmen im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum.	187
Tab. 56: Einträge an Reinzink durch Pflanzenschutzmittel und berechnete Gehaltszunahmen im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum.	188
Tab. 57: Schwermetallausträge durch Marktfrüchte (Beerntung) und Auswaschung in g ha ⁻¹ a ⁻¹ (KTBL, 2005).....	190
Tab. 58: Statistische Parameter für Gesamtgehalte (Königswasserextrakt) der 11 im Bericht ausführlich beschriebenen Elemente im Boden, differenziert nach Nutzung, Ober(OB)- und Unterböden(UB) in mg kg ⁻¹ TM (PN=Jahr der Probenahme). .	199
Tab. 59: Statistische Parameter für Gesamtgehalte (Königswasserextrakt) der übrigen Elemente im Boden, differenziert nach Nutzung, Ober(OB)- und Unterböden(UB) [Angaben in mg kg ⁻¹ TM bzw. % TM bei Al und Fe](PN: Jahr der Probenahme). 203	
Tab. 60: Entwicklung der Gehalte ausgewählter Elemente in Oberböden der Acker-BDF mit Bestimmtheitsmaß R ² >0,3 in mg kg ⁻¹ a ⁻¹ - Abnahmen grün, Zunahmen rot.	207

Tab. 61: Entwicklung der Gehalte ausgewählter Elemente in Oberböden der Grünland-BDF mit Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$ in $\text{mg kg}^{-1}\text{a}^{-1}$ - Abnahmen grün, Zunahmen rot.	210
Tab. 62: Entwicklung der Gehalte ausgewählter Elemente in Oberböden der Sonderkultur-BDF mit Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$ in $\text{mg kg}^{-1}\text{a}^{-1}$ - Abnahmen grün, Zunahmen rot.	211
Tab. 63: Entwicklung der PAK-Gehalte in BDF-Oberböden in $\mu\text{g kg}^{-1}$ im Beobachtungszeitraum - Abnahmen grün, Zunahmen rot.	211
Tab. 64: Entwicklung der CKW-Gehalte in BDF-Oberböden in $\mu\text{g kg}^{-1}$ im Beobachtungszeitraum - Abnahmen grün, Zunahmen rot (Mb.=Metaboliten)..	212
Tab. 65: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe in Rindergülle in mg kg^{-1} (PN=Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).	213
Tab. 66: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe in Schweinegülle in mg kg^{-1} (PN=Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).	214
Tab. 67: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe sonstiger Wirtschaftsdünger aus der Rinder- und Schweinehaltung in mg kg^{-1} (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, PN= Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).	215
Tab. 68: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe sonstiger Wirtschaftsdünger in mg kg^{-1} (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, PN= Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).	217

1 Einleitung

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 Menge der potentiell schädlichen Stoffe im Boden von entscheidender Bedeutung ist. Dieser Band behandelt die anorganische Schad- und Spurenstoffe sowie organische Schadstoffe in Böden der Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) unter landwirtschaftlicher Nutzung. Außerdem werden als Eintragspfade für anorganische Stoffe Wirtschafts- und Mineraldünger, Immissionsdaten und Pflanzenschutzmittel bei Sonderkulturen betrachtet und generalisierte Aussagen zu Schadstoff-Entzügen vor allem durch Ernteprodukte gemacht.

Band 1 der Veröffentlichung ‚35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern‘ – Titel: „Standorte, Methoden, Bewirtschaftung“ behandelt Allgemeines zu BDF, wie

- Einrichtung und Standortauswahl,
- Methodik (Probenahme und Untersuchungsumfang),
- Allgemeine Auswertungen und angewandte statistische Methoden,
- Standortbeschreibung und Repräsentativität für Bayern, sowie
- Betriebsdaten und Bewirtschaftung.

Wichtige Themen der Bodendauerbeobachtung werden in eigenen Fachbänden ausführlich behandelt:

- Band 2: Bodenphysik,
- Band 4: Humus,
- Band 5: Regenwürmer

2 Anorganische und organische Schadstoffe im Boden

Schadstoffe sind Stoffe die eine Gefahr für den Naturhaushalt, für Pflanzen, Tiere und die Gesundheit von Menschen darstellen. Anorganische Schadstoffe sind Metalle, Halbmetalle und Nichtmetalle sowie ihre Verbindungen (Mineralien, Salze und Ionen); organische Schadstoffe sind Kohlenstoffverbindungen. Eine Zwischenstellung nehmen Organometall-Verbindungen ein, da sie sowohl anorganische Bestandteile enthalten als auch Kohlenwasserstoffe sind.

In Art. 2 (Novelle der Bundes-Bodenschutzverordnung „BBodSchV“), § 2, Nr.11 der Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung (kurz: Mantelverordnung) vom 9. Juli 2021 (Anmerkung: die Verordnung tritt erst am 1. August 2023 in Kraft.) ist folgende Schadstoffdefinition angegeben (MantelV, 2021):

Stoffe und Stoffgemische, die auf Grund ihrer Gesundheitsschädlichkeit, Ökotoxizität oder anderer Eigenschaften geeignet sind, in Abhängigkeit von ihren Gehalten oder Konzentrationen unter Berücksichtigung ihrer Bioverfügbarkeit und Langlebigkeit, schädliche Bodenveränderungen oder sonstige Gefahren herbeizuführen.

Schädliche Bodenveränderungen sind nach Bundes-Bodenschutz-Gesetz (BBodSchG, 1998) Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen (hier besonders die Bodenfunktion „Standort für die landwirtschaftliche Nutzung“), die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Böden sind Naturkörper unterschiedlichen Alters, die je nach Art des Ausgangsgesteins und Reliefs unter einem bestimmten Klima und damit einer bestimmten streuliefernden Vegetation mit charakteristischen Lebensgemeinschaften (Biozönosen) durch bodenbildende Prozesse entstanden sind (Scheffer et al., 2010).

Durch Verwitterung der Mineralien des Ausgangsgesteins, durch Niederschläge und Staubdeposition oder andere Einträge und Austräge (z.B. durch Abschwemmung, Erosion, Überflutung, Verlagerung) oder durch Pflanzenwuchs und Tätigkeit von Bodenorganismen und anderen Tieren, weisen Böden somit einen charakteristischen Stoffbestand an anorganischen und organischen Inhaltsstoffen auf (geogen = gesteinsbedingt und durch Prozesse der Bodenbildung = pedogen bedingt). Damit enthält jeder natürlich entstandene Boden neben ungefährlichen Stoffen auch ohne menschliches Zutun eine gewisse Menge an Schad- und Spurenstoffen.

Durch die Tätigkeit des Menschen, Industrie, Verkehr und Haushalte (Immissionen), Altlasten und Altstandorte, Abfallentsorgung, aber auch durch Düngung mit mineralischen und organischen Düngemitteln, durch das Auf- und Einbringen von Materialien in oder auf den Boden oder über Bewässerung und Pflanzenschutzmittel gelangen zusätzlich Schadstoffe in den Boden. Andererseits werden 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, sowie dem biologischen Abbau von organischen Schadstoffen, Schadstoffe auch wieder aus dem Boden ausgetragen.

Wichtige Ziele der Bodendauerbeobachtung im Hinblick auf Schadstoffe sind:

- Erfassung der Schadstoffgehalte landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern für verschiedene Landschaftseinheiten und Nutzungen. (welche Schadstoffe kommen in welchen Mengen im Boden vor?)
- Messung der Schadstoffgehalte und langfristiger Veränderungen in Ober- und Unterböden.
- Erfassung von Stoffeinträgen und ihre Veränderungen über die Zeit durch Dünger, Luft und Pflanzenschutzmittel (bis Mitte der 1980er Jahre lagen kaum Daten zu Luftimmissionen auf LNF in BY vor, so dass in den Anfangsjahren eigene Messungen zu Schadstoffeinträgen aus der Luft auf BDF durchgeführt wurden. Erst ab Mitte der 1990er Jahre begannen auch Messungen des LfU in ländlichen Gebieten).
- Aufbau eines Datenpools für Gesetzes-Novellierungen im Bodenschutz- und Düngerecht.
- Gewinnung von Boden-Rückstellproben, um neuartige Schadstoffe (z.B. PFAS¹, Mikroplastik) nachuntersuchen oder Störfälle (vorher/nachher) dokumentieren zu können.
- Überprüfung, ob landwirtschaftlich bewirtschaftete Böden noch die Voraussetzungen für die Produktion gesunder, schadstoffarmer Lebensmittel erfüllen.
- Wie wirken sich gesetzliche Neuregelungen (z.B. „Benzin-Bleigesetz“ auf Einträge über die Luft oder Änderungen der Futtermittel-Verordnung bzw. das Verbot

¹ Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen

antibiotisch wirksamer Leistungsförderer auf Schadstoffeinträge durch Wirtschaftsdünger) aus?

2.1 Stoffauswahl

Seit 1985 werden von den BDF in regelmäßigen, zeitlichen Abständen Ober- und Unterbodenproben gewonnen und auf anorganische und organische Stoffe untersucht. Für die im Folgenden beschriebene Stoffauswahl (Wahl der Untersuchungsparameter) ausschlaggebend ist die Relevanz der Stoffe aus Sicht des Bodenschutzes und ihre Bedeutung in der Landwirtschaft. Die Liste der Untersuchungsparameter hat sich seit 1985, zwischen den unterschiedlichen Boden-Beprobungen, leicht verändert. So sind Parameter nicht erneut untersucht worden oder neue Parameter in das Untersuchungsspektrum aufgenommen worden. Gründe sind eine unterschiedliche Priorisierung der Relevanz aus Sicht des stofflichen Bodenschutzes oder eine geänderte Analysenmethodik. Es liegen also nicht für alle Parameter Messwerte über alle Beprobungszeitpunkte vor. Wurden Parameter aber mehr als einmal untersucht, lassen sich zeitliche Gehaltsentwicklungen bestimmen.

Untersuchungsumfang und Untersuchungsparameter sind ausführlich in Kap. 3 von Band 1 der Veröffentlichung zu 35 Jahren Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern beschrieben (siehe dort!).

2.1.1 Anorganische Schad- und Spurenstoffe

Seit der Ersterhebung 1985 wurden im Abstand von 10 Jahren die Böden (Ober- und Unterböden) der Bodendauerbeobachtungsflächen (siehe dazu auch Band 1) auf folgende anorganische Schadstoffe und Spurenstoffe sowie Nährstoffe² untersucht:

Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Tl, U, V, Zn

Schwermetalle³, Haupt-Nährstoffe, Halb- und Nichtmetalle⁴, nicht farblich markiert sind Leichtmetalle

Von den anorganischen Schadstoffen und Spurenstoffen sind im Bodenschutzrecht Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium und Zink geregelt.

Weil häufig in P-Düngern enthalten und wegen seiner Toxizität und Radioaktivität sind auch Uran sowie Antimon, das z.B. als Legierungsbestandteil für Bleischrote eingesetzt wird, wichtige Schadstoffe. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt unserer Auswertungen v.a. auf diesen 11 chemischen Elementen (s. Kap. 2.3.3).

Nicht alle anorganischen Stoffe sind nach obiger Schadstoffdefinition also grundsätzlich „schädlich“, einige Elemente sind auch essenzielle Spurennährstoffe. Letztendlich entscheidet auch die Konzentration und Verfügbarkeit eines Schadstoffs/Spurenstoffs (s. Kap. 2.3.5) über dessen Schädlichkeit.

² Als Nährstoffe bezeichnet man verschiedene organische und anorganische Stoffe, die von Lebewesen, zu deren Lebenserhaltung aufgenommen und in deren Stoffwechsel verarbeitet werden. Zum Aufbau organischer Substanzen benötigen alle Pflanzen nicht nur Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasser, sondern aus dem Nährstoffvorrat des Bodens auch bestimmte unentbehrliche (essenzielle) und eine Reihe nützlicher Elemente. Je nachdem welche Mengen dazu benötigt werden unterscheidet man Hauptnährstoffe (Makronährelemente) und Spurennährstoffe (Mikronährelemente).

³ Schwermetalle sind Metalle mit einer Dichte größer als 5,0 g cm⁻³. Einige Schwermetalle (Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn) sind auch wichtige Spurennährstoffe.

⁴ Ebenfalls für Pflanzen wichtige Spurennährstoffe sind die Halbmetalle Bor und Selen.

2.1.2 Organische Schadstoffe

Organische Stoffe sind Kohlenstoffverbindungen, die häufig Wasserstoff enthalten, weshalb man auch von Kohlenwasserstoffen spricht. Die Kohlenstoffatome sind ketten- oder ringförmig angeordnet; die Kohlenstoffketten unterschiedlich lang, geradkettig bzw. mehr oder weniger stark verzweigt. Auch wegen der Vielzahl möglicher Bindungspartner (z.B. N, O, F, S, Cl) bilden organische Verbindungen eine sehr große Gruppe chemischer Substanzen, darunter befinden sich auch zahlreiche Schadstoffe.

Im Rahmen des Bodenmonitorings wurden Pflanzenschutzmittelrückstände (Herbizide, Fungizide, Insektizide und Akarizide) und Umweltchemikalien (PAK, PCB) im Boden untersucht. Die Pflanzenschutzmittelrückstände (PSM) wurden nur zu Beginn der Bodendauerbeobachtung (Ersterhebung: 1985 bis 1990) in größerem Umfang untersucht. Sie wurden in der Regel nur im Oberboden bestimmt; nur bei Befunden über der Bestimmungsgrenze wurde auch der Unterboden analysiert.

Einen Überblick der untersuchten PSM innerhalb der verschiedenen Stoffgruppen zeigt Tab. 1, Details sind in Kap. 3.2.1.3 in Band 1 beschrieben.

Tab. 1: Bei Erstaufnahme untersuchte Pflanzenschutzmittelrückstände (Mb. = Metabolit)

Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW)
Aldrin, Dieldrin, Endrin
Endosulfan-Alpha, -Beta
DDT-P,P + Metaboliten DDD-P,P und DDE-P,P
DDT-O,P + Metaboliten DDD-O,P und DDE-O,P
Summe DDT inkl. Metaboliten
HCB
HCH-Alpha, -Beta, -Delta
HCH -Gamma (Lindan)
Heptachlor, Heptachloreoxid (Mb. v. Heptachlor)
Methoxychlor
Fungizide
Carbonsäurederivate: Chlorthalonil, Procymidon
Pyrimidine: Fenarimol, Nuarimol
Dicarboximide: Vinclozolin
Dichlofluanid
Dichloutrazol
Benzolderivate: Quintozen, Pentachloranilin (Mb. v. Quintozen)
Herbizide
Atrazin + Mb. Desethylatrazin, Desisopropylatrazin
Carbamate: Diallat, Triallat

Carbonsäurederivate: Dichlobenil, Dichlorbenzamid (Mb. von Dichlobenil), Propycamid
Dinitro-Phenole: Dinoseb
Pyrrolidone: Fluorchloridon
Dinitro-Aniline: Ethalfluralin, Pendimethalin, Trifluralin
Nitrofen
Pyridazine: Chloridazon
Herbizide aus der Gruppe der Aniline und Halogenaniline
4-Chloranilin (Mb. v. Monolinuron)
4-Bromanilin (Mb. v. Metobromuron)
3-Chlor-4-Methylanilin (Mb. v. Chlortoluron)
3,4-Dichloranilin (Mb. v. Linuron)
3,5-Dichloranilin (Mb. v. Vinclozolin), Procymidon
4-Brom-3-Chloranilin (Mb. v. Chlorbromuron)
3-Chlor-4-Methoxyanilin Mb. v. Metoxuron)
Insektizide
Permethrin
Cyfluthrin
Cypermethrin
Akarizide
Clofentezin

Wird ein Pflanzenschutzmittel auf den Boden ausgebracht, nimmt die Wirkstoffmenge durch Verdampfung, Photolyse, Pflanzenaufnahme, mikrobiellen Abbau und Metabolisierung rasch ab. Ein erheblicher Teil verschwindet nicht tatsächlich, sondern kann nur mit herkömmlichen Extraktionsverfahren nicht mehr bestimmt werden. Die nicht extrahierbaren (=gebundenen) Rückstände im Boden blieben daher lange Zeit unerkannt (s. Kap. 3.2.1.2 im Bericht „10 Jahre Bodendauerbeobachtung an der LBP“, Teil I, 1997).

Die extrahierbaren Rückstände sind pflanzenverfügbar und können im Boden auch in tiefere Schichten verlagert werden. Nicht extrahierbare Rückstände jedoch sind für das Pflanzenwachstum ohne Bedeutung, sie können allerdings von Mikroorganismen freigesetzt und anschließend von Pflanzen aufgenommen werden. Aus Sicht des Bodenschutzes sind sie deshalb als umweltrelevant einzustufen. Somit ist es erforderlich, den Gesamtgehalt, also die extrahierbaren und nicht extrahierbaren Rückstände im Boden zu beobachten.

Daher erwies sich die Bestimmung nur der extrahierbaren Gehalte mit Standardextraktionsmethoden für ein langfristiges Bodenmonitoring als nicht zielführend. Außerdem ist die Bestimmung aller auf BDF eingesetzter PSM und deren Metaboliten im Boden sehr aufwändig. Die meisten PSM wurden bei späteren Beprobungen daher nicht mehr untersucht. Bei ausgewählten PSM aber z.B. aus der Gruppe der Triazine, wurden in einem eigenen Projekt auch die nicht extrahierbaren PSM-Rückstände bestimmt. Die Ergebnisse der

Untersuchungen der Pflanzenschutzmittelrückstände sind ausführlich im Bericht „10 Jahre Bodendauerbeobachtung an der LBP“, Teil I (Stoffbestand des Bodens, Kap. 3) und Teil II (Stoffeinträge in den Boden, Kap. C.4) beschrieben und werden deshalb nicht erneut dargestellt (LBP, 1997 – Teil I und II).

Für einige, sehr persistente und daher besonders umweltrelevante PSM-Rückstände aus der Gruppe der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) wurden 2012 bei 15 BDF und 2016 bei 14 BDF, die Messungen wiederholt, wo bereits bei Ersterhebung höhere Gehalte dieser CKW festgestellt wurden. Folgende CKW wurden hierbei untersucht: Hexachlorcyclohexane (darunter Lindan = γ -HCH), Hexachlorbenzol (HCB) und Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) und seine Metaboliten.

Außer PSM wurden wichtige Umweltchemikalien im Boden untersucht. Die 16 EPA⁵-PAK (Polyzyklische aromatischen Kohlenwasserstoffe) und 6 Polychlorierten Biphenyle (PCB) nach Ballschmiter⁶ besitzen eine hohe Persistenz in der Umwelt, sind gut fettlöslich und ubiquitär verbreitet. Wie CKW (s. o.) weisen sie eine hohe Toxizität auf oder besitzen andere schädliche Eigenschaften wie Kanzerogenität (Krebs erzeugend), Mutagenität (Erbgut schädigend) und Teratogenität (fruchtschädigende Wirkung). Beide Stoffgruppen sind daher von besonderer Umweltrelevanz und deshalb im Bodenschutzrecht geregelt. Die untersuchten PAK- und PCB-Einzelkongenere sind in Kap. 3.2.1.3 von Band 1 aufgeführt oder den Ergebnistabellen (s. Tab. 38 und Tab. 39) zu entnehmen.

PAK wurden erstmals 1996-1999 untersucht (Ersterhebung). Analog zu CKW wurden die Messungen 2012 und 2016 auf 15 bzw. 14 ausgewählten BDF, mit bei Ersterhebung erhöhten PAK-Gehalten, wiederholt.

Da PCB bei Erstuntersuchung der BDF (1985-1990) nur in sehr geringen Mengen im Boden gefunden wurden, wurden sie bei späteren Beprobungen nicht erneut untersucht.

2.2 Methodik

2.2.1 Probenahme

Je BDF fanden im Beobachtungszeitraum (1985-2018) insgesamt 6 Beprobungen des Bodens statt, wovon 4 auf anorganische Schadstoffe und 1-3 auf organische Schadstoffe untersucht wurden. Auf jeder BDF wurden für die Ober- und Unterböden je 4 Mischproben genommen und entsprechend für die chemischen Analysen aufbereitet. Probenahme des Bodens und Probenaufbereitung sind in Band 1 ausführlich beschrieben (Kap. 3.2).

2.2.2 Analytik Anorganische Schad- und Spurenstoffe

Zur Bestimmung der Gesamtgehalte auf anorganische Schadstoffe wurden die auf 2 mm gesiebten und gemahlten Bodenproben mittels Königswasserextrakt [Säureaufschluss mit einem Gemisch aus konzentrierter (37%iger) Salzsäure und konzentrierter (65%iger) Salpetersäure im Verhältnis 3 zu 1] aufgeschlossen. Die Methode ist in DIN ISO 11466: 06.97 ausführlich beschrieben. In Serie 1 wurden die Gesamtgehalte auch im Totalaufschluss

⁵ Diese 16 PAK hat die EPA (US Environmental Protection Agency) im Jahre 1976 in die „priority pollutant list“ aufgenommen. Sie haben sich auch international weitgehend als Referenzgröße durchgesetzt.

⁶ Karlheinz Ballschmiter, deutscher Chemiker, hat vor allem über die Analytik von organischen Schadstoffen wie polychlorierten Biphenylen, Dioxinen, (chlororganischen) Pestiziden und deren weltweite Verbreitung und Verteilung geforscht.

(Königswasseraufschluss + trockene Veraschung des Rückstands und mehrmaliges Abrauchen mit Flusssäure, bei Quecksilber Königswasseraufschluss und Lösung des Rückstands in 1%iger Salzsäure) bestimmt. Zur besseren Vergleichbarkeit mit späteren Beprobungen (dort ausschließlich Königswasserextrakt) und wg. der gesetzlichen Vorgaben (Bodenschutzrecht) wurden die Rückstellproben aus Serie 1 nachträglich auch im Königswasserextrakt untersucht. Im vorliegenden Bericht werden nur die im Königswasserextrakt des Bodens gemessenen Gehalte ausgewertet und dargestellt.

Zur Ermittlung „pflanzenverfügbarer“ Gehalte, wie es das Bodenschutzrecht für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze vorsieht, wurden bei Serie 2005/2006 die Böden einer Ammoniumnitrat-Extraktion unterzogen und die Lösung auf anorganische Schad- und Spurenstoffe untersucht [Ammoniumnitratextrakt nach DIN 19730: 06.97].

Die Messungen erfolgten anfangs mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), für Sb, As, Hg und Se mittels AAS-Hydrid-Technik (Kaldampftechnik), bei späteren Untersuchungen dann mittels ICP-OES und ICP-MS (Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma bzw. Detektion mittels Massenspektrometrie).

2.2.3 Analytik Organische Schadstoffe

Die Bestimmung der organischen Schadstoffe erfolgte für:

- CKW, PCB (Untersuchung 1985-1990) in Anlehnung an Sammel-Methode S 19 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (1989) mittels Kapillargaschromatographie (GC) mit Electron Capture Detektor (ECD) an 2 Säulen unterschiedlicher Polarität (DB-5 und DB-1701).
- PAK (Untersuchung 1996-1999) in Anlehnung an Methode PAK 3.3.3 (Methodenbuch VII, VDLUFA, 1996) mittels HPLC mit zwei verschiedenen Fluoreszenzdetektoren (Jasco oder Gynko RF 1002) bzw. mittels UV-Detektor (nur bei Acenaphthylen) (s. DIN 38407-18, Ausgabe:1999-05) und für
- PAK+CKW (Untersuchungen 2012 und 2015) durch Extraktion der gefriergetrockneten Bodenprobe mittels Accelerated-Solvent-Extraction (ASE) mit Toluol und Säulen-Clean-up (Silica/Al-Oxid). Messung mittels GC-MS (Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung).

2.3 Ergebnisse und Diskussion Anorganische Schad- und Spurenstoffe

2.3.1 Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für Gesamtgehalte im Boden, Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung

Die Einstufung der im Königswasserextrakt gemessenen Gesamt-Gehalte anorganischer Schad- und Spurenstoffe erfolgt nach den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV, 1999). Bei Elementen, für die dort keine Vorsorgewerte festgelegt wurden (Arsen und Thallium) werden die Vorsorgewerte der erst ab 01. August 2023 gültigen Novelle der BBodSchV (MantelV, 2021) herangezogen. Die Vorsorgewerte für die anorganischen Schad- und Spurenstoffe sind nach der Haupt-Hauptbodenart (Bodenkundliche Kartieranleitung, aktuell KA 5 (Eckelmann, 2005)) und für Blei, Cadmium, Nickel und Zink zusätzlich nach dem pH-Wert des Bodens differenziert (s. Anmerkungen Anh. 2, Kap. 4.3 BBodSchV.). Für Antimon und Uran fehlen entsprechende Vorsorgewerte ganz; die Messwerte werden daher anhand von Literatur- und Hintergrundwerten für die Böden Bayerns oder des Bundes eingestuft, s. hierzu <https://www.lfu.bayern.de/boden/hintergrundwerte>

und Umweltatlas Bayern: <https://www.umweltatlas.bayern.de> sowie Vollzugshilfe des LfU dazu mit Bodenausgangsgesteinskarte von Bayern im Maßstab 1:500000 (LfU, 2011). Für Uran wurden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe typische Hintergrundwerte ermittelt (s. Utermann, 2008 und 2009).

Tab. 2: Vorsorgewerte für Metalle in mg kg^{-1} Trockenmasse nach Anh. 2, Tab. 4.1, BBodSchV (BBodSchV, 1999).

Stoff	Hauptbodenart		
	Ton	Lehm/Schluff	Sand
Blei (Pb)	100	70	40
Cadmium (Cd)	1,5	1	0,4
Chrom (Cr)	100	60	30
Kupfer (Cu)	60	40	20
Nickel (Ni)	70	50	15
Quecksilber (Hg)	1	0,5	0,1
Zink (Zn)	200	150	60

*Stark schluffige Sande sind entsprechend der Hauptbodenart Lehm/Schluff zu bewerten. Bei den Vorsorgewerten ist der Säuregrad der Böden wie folgt zu berücksichtigen: Bei Böden der Hauptbodenart Ton mit einem pH-Wert von $< 6,0$ gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Lehm/Schluff. Bei Böden der Hauptbodenart Lehm/Schluff mit einem pH-Wert von $< 6,0$ gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Sand. Bei Böden mit einem pH-Wert von $< 5,0$ sind die Vorsorgewerte für Blei entsprechend zu oben jeweils herabzusetzen. Die Vorsorgewerte finden für Böden und Bodenhorizonte mit einem Humusgehalt von mehr als 8 Prozent keine Anwendung.

Tab. 3: Vorsorgewerte Novelle BBodSchV, (gültig ab 01.08.2023) in mg kg^{-1} TM für Arsen und Thallium (MantelV, 2021, Art. 2, Anl. 1, Tabelle 1).

Stoff	Hauptbodenart		
	Ton	Lehm/Schluff	Sand
Arsen (As)	20	20	10
Thallium (Tl)	1	1	0,5

Da für Antimon und Uran keine Vorsorgewerte festgelegt sind, wurde für Antimon ein typ. Hintergrundwert von $0,5 \text{ mg Sb kg}^{-1}$ TM Boden und für Uran entsprechend ein Hintergrundwert von $3,0 \text{ mg U kg}^{-1}$ TM Boden als Referenzgröße herangezogen.

Anwendung der Vorsorgewerte:

Die Vorsorgewerte werden nach den Hauptbodenarten gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung, 4. Auflage, berichtigter Nachdruck 1996, unterschieden (in der Novelle der BBodSchV (MantelV, 2021) gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung, 5. Auflage, 2009 (KA 5)). Stark schluffige Sande sind entsprechend der Hauptbodenart Lehm/Schluff zu bewerten.

Bei Cd, Ni und Zn steigt bei pH-Werten unter pH 6, für Pb bei pH<5 die Mobilität im Boden deutlich an, weshalb ein jeweils strengerer VW zur Anwendung kommt und bei Vorsorgewerten der Säuregrad der Böden wie folgt zu berücksichtigen ist:

Bei Böden der Hauptbodenart Ton mit einem pH-Wert von < 6,0 gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Lehm/Schluff. Bei Böden der Hauptbodenart Lehm/Schluff mit einem pH-Wert von < 6,0 gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Sand. Bei Böden mit einem pH-Wert von < 5,0 sind die Vorsorgewerte für Blei entsprechend den ersten beiden Anstrichen herabzusetzen: D.h. für Blei gelten bei Böden der Hauptbodenart Ton bei einem pH-Wert<5,0 die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Lehm/Schluff und bei Böden der Hauptbodenart Lehm/Schluff die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Sand. Einem Absinken des pH-Wertes z.B. durch Kalkung sollte daher unbedingt entgegengewirkt werden (s. a. Kap.2.3.5 zu verfügbaren Gehalten und „Gelbes Heft der Düngung“: LfL-Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland (Wendland, 2018)).

Die Vorsorgewerte finden für Böden und Bodenhorizonte mit einem Humusgehalt von mehr als 8 Prozent (in der erst am 01.08.2023 gültigen Novelle der BBodSchV ab einem TOC (Total Organic Carbon)-Gehalt von mehr als 9 Masseprozent) keine Anwendung. Für solch stark humose Böden müssen die maßgeblichen Werte im Einzelfall gebietsbezogen (regional vergleichbare Bodenverhältnisse) abgeleitet werden.

Laut Abs. 2, Pkt. 1 in § 8 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG, 1998) ist bei einem Überschreiten der Vorsorgewerte unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten in der Regel davon auszugehen ist, dass die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht. Das heißt aber nicht, dass damit tatsächlich eine schädliche Bodenveränderung vorliegt und bestätigt ist. Ein Überschreiten des Vorsorgewertes eines Stoffes im Boden ruft lediglich die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung hervor und bedingt eine Prüfung, ob der Schadstoff tatsächlich in einer Form und Menge im Boden vorliegt, die eine schädliche Bodenveränderung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze bestätigen würde.

2.3.2 Gesamtgehalte im Boden - Übersicht

Tab. 4 und Tab. 5 geben einen Überblick der Untersuchungsergebnisse aller BDF anhand wichtiger statistischer Parameter über den Beobachtungszeitraum von > 30 Jahren (= 4 Beprobungsserien), differenziert nach Ober- (OB) und Unterböden (UB) [Angaben in mg kg⁻¹ TM bzw. % TM]. Sie beinhalten die Mittelwerte und Spannen, in der 90 % der Werte liegen (5%-Perzentil – 95%-Perzentil) differenziert nach Nutzung (Acker, Grünland, Sonderkulturen). In Tab. 5 sind die Ergebnisse der übrigen, im weiteren Verlauf nicht näher ausgewerteten Elemente aufgelistet.

Tab. 4 zeigt die Ergebnisse der 11 in Kap. 2.3.3 ausführlich behandelten Elemente. Die Ergebnisse für die einzelnen Serien mit zugehörigen statistischen Kennzahlen finden sich im ANHANG (s. Tab. 58 und Tab. 59).

Tab. 4: Untersuchungsergebnisse der elf im Kap. 2.3.3 ausführlich beschriebenen Elemente, Königswasserextrakt, BDF-Böden, gesamter Beobachtungszeitraum (4 Serien differenziert nach Nutzung und Schicht (Ober- (OB) und Unterböden (UB)) [Angaben in mg kg^{-1} TM].

Anzahl BDF + Nutzung	Schicht		Sb	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Tl	U	Zn
		90 % der Werte	0,13 - 0,95	4 - 18	13 - 41	0,13 - 0,57	15 - 57	7 - 34	7 - 42	0,05 - 0,19	0,11 - 0,46	0,7 - 2,6	32 - 136
Mittelwert	0,44	9	24	0,28	33	17	22	0,102	0,27	1,33	72		
80 Acker	OB	90 % der Werte	0,09 - 0,76	3 - 20	8 - 33	0,04 - 0,38	13 - 60	6 - 33	8 - 45	0,02 - 0,25	0,09 - 0,48	0,6 - 2,8	20 - 148
		Mittelwert	0,36	9	19	0,19	33	16	25	0,087	0,30	1,26	65
18 Grünland	OB	90 % der Werte	0,23 - 1,63	5 - 22	22 - 54	0,22 - 0,96	21 - 98	14 - 29	12 - 85	0,08 - 0,33	0,15 - 0,75	0,9 - 2,7	65 - 161
		Mittelwert	0,73	10	37	0,53	46	20	29	0,169	0,35	1,85	109
18 Grünland	UB	90 % der Werte	0,19 - 1,2	4 - 17	19 - 35	0,11 - 0,53	20 - 89	9 - 24	13 - 89	0,06 - 0,18	0,15 - 0,54	0,9 - 2,7	47 - 105
		Mittelwert	0,58	9	26	0,30	42	17	32	0,109	0,33	1,77	77
3 Hopfen	OB	90 % der Werte	0,12 - 0,49	7 - 12	9 - 22	0,09 - 0,27	10 - 37	28 - 175	6 - 23	0,04 - 0,34	0,14 - 0,22	0,9 - 1,5	40 - 111
		Mittelwert	0,30	10	17	0,19	25	98	16	0,147	0,17	1,22	81
3 Hopfen	UB	90 % der Werte	0,08 - 0,65	8 - 14	9 - 29	0,06 - 0,16	11 - 44	10 - 49	7 - 37	0,03 - 0,31	0,14 - 0,33	0,9 - 1,2	27 - 87
		Mittelwert	0,31	11	16	0,11	26	23	22	0,128	0,21	1,05	55
1 Obst	OB	90 % der Werte	0,5 - 0,77	11 - 13	39 - 43	0,32 - 0,34	45 - 53	67 - 76	34 - 35	0,09 - 0,12	0,19 - 0,2	0,9 - 1	81 - 90
		Mittelwert	0,62	12	40	0,33	49	71	34	0,103	0,19	0,97	86
1 Obst	UB	90 % der Werte	0,5 - 0,63	12 - 14	31 - 39	0,25 - 0,31	34 - 51	41 - 55	32 - 34	0,09 - 0,28	0,16 - 0,2	0,7 - 0,9	53 - 75
		Mittelwert	0,57	13	35	0,28	42	48	33	0,186	0,18	0,83	64
3 Wein	OB	90 % der Werte	0,41 - 2,49	10 - 24	13 - 72	0,19 - 0,38	28 - 48	37 - 157	27 - 39	0,12 - 0,38	0,17 - 0,54	0,8 - 1,6	89 - 169
		Mittelwert	0,92	15	33	0,27	38	104	32	0,245	0,31	1,26	125
3 Wein	UB	90 % der Werte	0,31 - 1,91	10 - 22	9 - 66	0,12 - 0,37	28 - 48	30 - 142	29 - 39	0,11 - 0,4	0,17 - 0,58	0,8 - 1,5	55 - 135
		Mittelwert	0,77	15	31	0,24	38	84	33	0,238	0,32	1,21	99

Tab. 5: Untersuchungsergebnisse „übrige Elemente“, Königswasserextrakt, BDF-Böden, gesamter Beobachtungszeitraum differenziert nach Nutzung und Schicht (Ober- (OB) und Unterböden (UB)) [Angaben in mg kg⁻¹ TM bzw. % TM bei Al und Fe].

Anzahl BDF + Nutzung	Schicht															
		Al	B	Ba	Be	Bi	Co	Fe	Mn	Mo	Rb	Se	Sn	Sr	V	
80 Acker	OB	90 % der Werte	0,7 - 3,8	3 - 47	45 - 194	0,35 - 1,8	0,09 - 0,33	3 - 17	0,9 - 4,2	413 - 1715	0,25 - 1,45	12 - 70	0,09 - 0,59	0,8 - 2,9	8 - 98	22 - 65
		Mittelwert	2,1	17	101	0,9	0,2	10	2,4	931	0,6	32	0,3	1,5	28	42
	UB	90 % der Werte	0,9 - 4,2	3 - 53	43 - 229	0,43 - 1,91	0,07 - 0,35	4 - 19	1 - 4,3	203 - 1395	0,21 - 1,6	11 - 77	0,08 - 0,62	0,6 - 2,3	7 - 134	16 - 62
		Mittelwert	2,5	18	103	1,1	0,2	11	2,6	764	0,7	36	0,3	1,3	40	38
18 Grünland	OB	90 % der Werte	1,6 - 4	5 - 54	53 - 193	0,62 - 1,74	0,19 - 0,45	5 - 26	1,6 - 5	459 - 1584	0,29 - 3,04	19 - 67	0,1 - 0,73	1,1 - 2,7	11 - 58	29 - 106
		Mittelwert	2,7	20	97	1,0	0,3	11	2,7	984	1,1	37	0,4	1,7	27	62
	UB	90 % der Werte	1,8 - 4,4	2 - 34	42 - 182	0,59 - 1,56	0,15 - 0,39	5 - 29	1,5 - 5,4	337 - 1515	0,32 - 2,58	20 - 66	0,14 - 0,69	0,9 - 2,3	12 - 65	27 - 80
		Mittelwert	2,8	12	96	1,1	0,2	12	2,9	947	1,0	36	0,4	1,5	30	50
3 Hopfen	OB	90 % der Werte	0,6 - 2,4	6 - 22	38 - 96	0,44 - 0,94	0,09 - 0,19	3 - 11	0,8 - 2,6	271 - 993	0,24 - 0,48	17 - 28	0,06 - 0,44	0,6 - 1,9	10 - 43	17 - 48
		Mittelwert	1,6	13	66	0,7	0,2	7	1,9	637	0,3	21	0,2	1,3	25	34
	UB	90 % der Werte	0,7 - 3,8	6 - 26	50 - 142	0,44 - 1,44	0,08 - 0,26	4 - 12	0,8 - 3,7	280 - 752	0,2 - 0,57	17 - 42	0,07 - 0,56	0,6 - 2,5	8 - 44	16 - 47
		Mittelwert	2,1	14	81	0,9	0,2	8	2,3	561	0,3	26	0,2	1,5	26	32
1 Obst	OB	90 % der Werte	1,9 - 1,9	11 - 17	75 - 84	0,75 - 0,79	0,25 - 0,26	8 - 9	2,2 - 2,5	889 - 972	0,27 - 0,54	26 - 29	0,21 - 0,37	2,6 - 2,8	86 - 87	55 - 58
		Mittelwert	1,9	13	81	0,8	0,3	8	2,4	935	0,4	28	0,3	2,7	87	56
	UB	90 % der Werte	1,6 - 1,9	8 - 10	70 - 84	0,72 - 0,81	0,22 - 0,25	8 - 9	2,2 - 2,3	766 - 898	0,48 - 0,49	22 - 30	0,31 - 0,35	2,1 - 3,5	112 - 131	36 - 54
		Mittelwert	1,8	9	77	0,8	0,2	8	2,2	832	0,5	26	0,3	2,8	121	45
3 Wein	OB	90 % der Werte	1,4 - 4,8	9 - 90	153 - 271	0,73 - 2,07	0,17 - 0,32	8 - 15	2 - 4,5	447 - 1046	0,25 - 0,98	25 - 96	0,12 - 0,54	0,9 - 27,4	20 - 191	32 - 49
		Mittelwert	2,7	42	197	1,3	0,2	11	3,3	701	0,6	49	0,3	8,3	96	42
	UB	90 % der Werte	1,3 - 4,7	9 - 95	136 - 316	0,65 - 2	0,12 - 0,3	9 - 16	2 - 4,2	454 - 932	0,27 - 1,07	25 - 90	0,09 - 0,54	0,7 - 14,6	18 - 203	31 - 49
		Mittelwert	2,7	43	201	1,3	0,2	12	3,2	659	0,6	51	0,3	5,9	102	42

2.3.3 Ergebnisse Gesamtgehalte ausgewählter Elemente

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gesamtgehalte 11, aus Sicht des Bodenschutzes besonders relevanter, chemischer Elemente im Boden ausführlich dargestellt. Jedes Element wird mit einem Steckbrief beschrieben. Die mittleren Gehalte der BDF aller Aufnahmeserien werden jeweils für Acker- und Grünland-BDF (bei Cu+Zn auch für Sonderkultur-BDF) einzeln, nach Hauptbodenart farblich getrennt, dargestellt und den jeweiligen Vorsorgewerten der BBodSchV gegenübergestellt. Für die Entwicklung der Elementgehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF, wurden die in Kap. 4 von Band 1 ausführlich beschriebenen statistischen Methoden angewandt (siehe dort!).

2.3.3.1 Blei (Pb)

Kurzsteckbrief Blei [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Toxisches, weiches, unedles Schwermetall der 4. Hauptgruppe des Periodensystems (mehrere Isotope in der Umwelt vorkommend). Typische Gehalte im Boden 2-60 (Ø20). Bei pH 4(5)-7 gering löslich - gilt daher als wenig mobil in Böden (außer bei Anwesenheit org. Chelatbildner). Starke Affinität zu Al-, Fe- und Mn-Oxiden (→ im mäßig sauren Bereich leichte Sorption und Fixierung). Im sauren Bereich auch Festlegung durch Huminstoffe, daher höhere Blei-Gehalte im Oberboden als im Unterboden (Anreicherung überwiegt Auswaschung!). Hauptsorbenten von Pb in Böden sind Tonminerale, Sesquioxide und die organische Substanz.

Eintragsquellen: Bestandteil zahlreicher industrieller Kreisläufe und Produkte (ubiquitär), Kfz-Verkehr (Antiklopfmittel, Batterien), Farbpigmente/Korrosionsschutzmittel, Strahlenschutzmittel, Bestandteil von Schrotkugeln, Verbrennungsprozesse (Kohle), Blei- und Zink-Verhüttung (Bergbau), Klärschlämme und Kompost. In den letzten Jahren ging der Verbrauch von Pb stark zurück. Teilweise aber auch geogen bedingte Belastungen (Bleiglanzadern) bzw. auf historischen Bergbau zurückzuführen.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: niedrige Boden-pH-Werte (v.a. bei pH<5).

Typisch in Pflanzen 1-5 (Ø2 – unbelastete Gebiete), toxischer Grenzwert Pflanzen: 10-20, Transferfaktor: 0,01-0,1

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 100/70/40 (Ton/Lehm+Schluff/Sand) (BBodSchV, 1999)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln:

Höchstgehalt in Lebensmitteln (2006/1881/EG* – (EG-KontamV, 2006), konsolidierte Fassung vom 14.10.2020) (mg kg⁻¹ Frischgewicht): Getreide und Hülsenfrüchte 0,2, Zuckermais + Gemüse, ausgenommen Blattkohl, Schwarzwurzeln, Blattgemüse und frische Kräuter, Pilze, Seetang und Fruchtgemüse 0,1, Blattkohl, Schwarzwurzeln, Blattgemüse 0,3. *Inzwischen (25.04.2023) ersetzt durch EU 2023/915 (s. dort).

Höchstgehalt in mg kg⁻¹ (ppm), bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (FuttMV, 2002/32/EG Anh. 1 - konsolid. Text v. 28.11.2019) für Futtermittel-Ausgangserzeugnisse: 10, Grünfutter: 30, Alleinfuttermittel 5.

(Scheffer, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

Bleigehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorge- werte

c

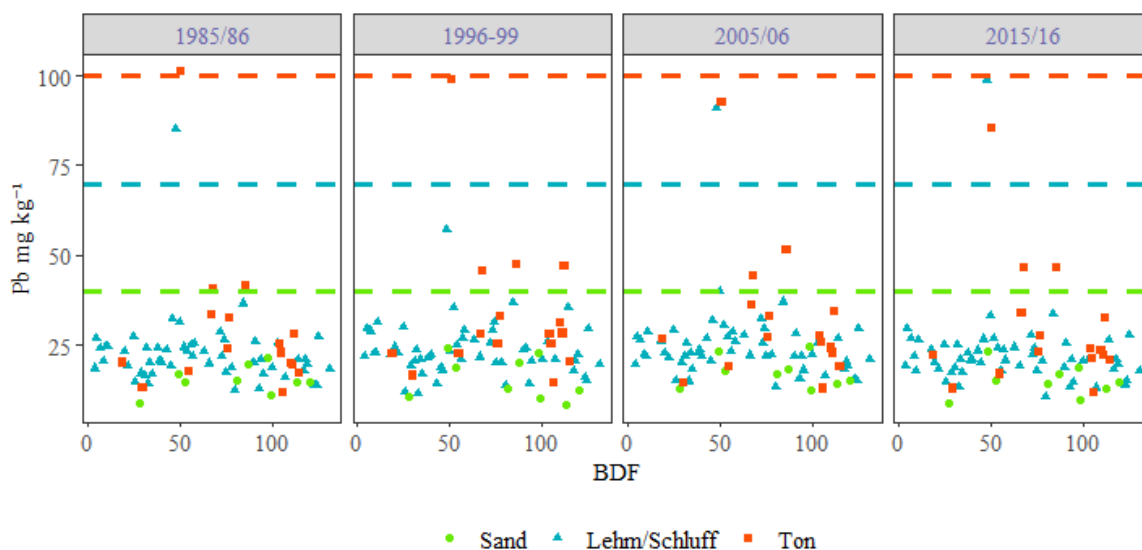


Abb. 1: Pb-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

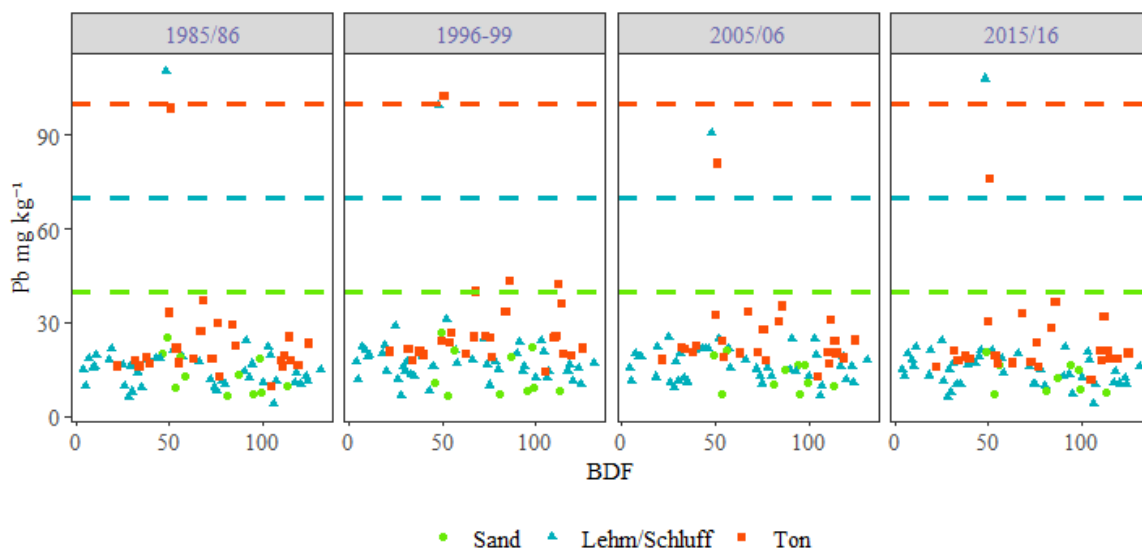


Abb. 2: Pb-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

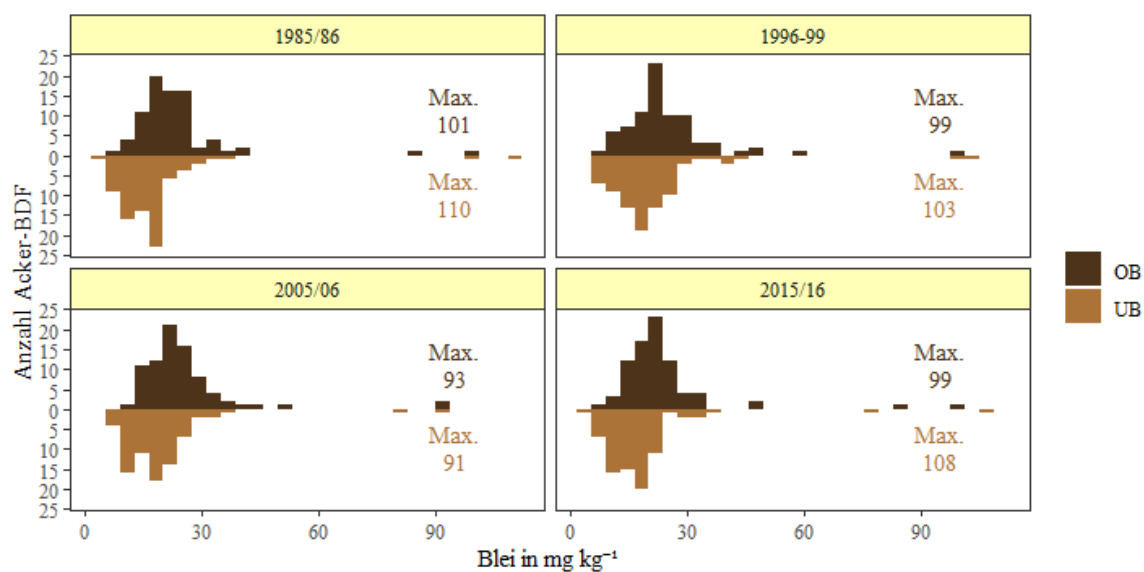


Abb. 3: Verteilung der Pb-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

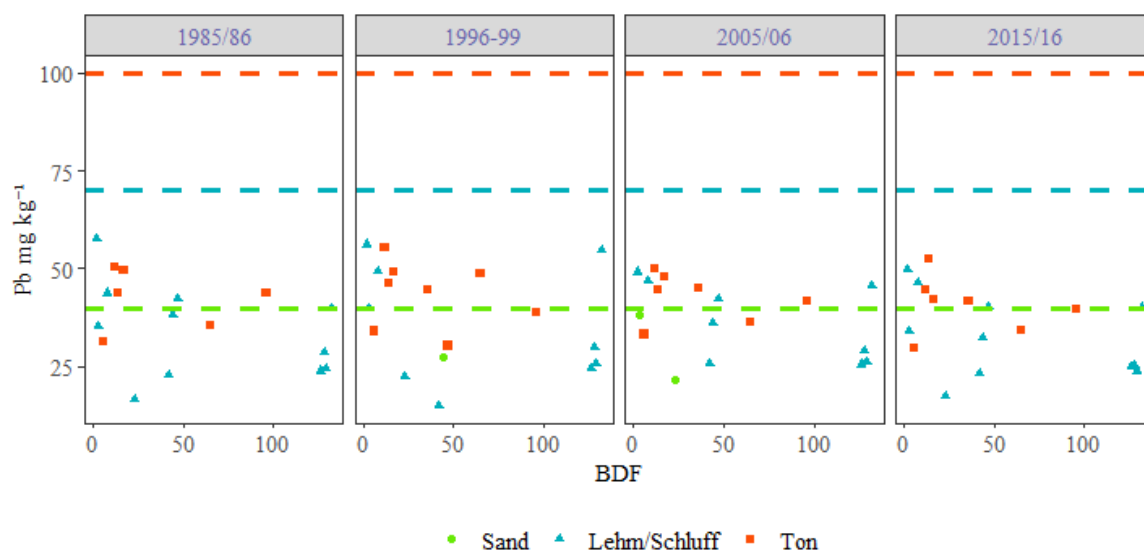


Abb. 4: Pb-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

Die mittleren Bleigehalte in den landwirtschaftlich genutzten BDF in Bayern sind meist niedrig und liegen überwiegend unter den Vorsorgewerten der BBodSchV. Bei den Oberböden der Acker-BDF traten bei der Hauptbodenart Lehm/Schluff nur bei **BDF 48** Vorsorgewertüberschreitungen auf: Beprobung 1985/86 (85,1 mg Pb kg⁻¹ Boden), Beprobung 2007 (91,1 mg Pb kg⁻¹ Boden) und Beprobung 2015/16 (98,9 mg Pb kg⁻¹ Boden). Für die Hauptbodenart Ton und Erst-Beprobung 1985/86 trat bei **BDF 51** mit 101 mg Pb kg⁻¹ Boden eine leichte VW-Überschreitung auf (gleichzeitig der höchste gemessene Bleigehalt in den Oberböden der Acker-BDF). **BDF 48** liegt im Oberpfälzer Wald, **BDF 51** in der fränkischen Alb (Residualton), die etwas höheren Bleigehalte dürften geogen bedingt sein.

Insgesamt betrachtet sind die Bleigehalte auch in den Unterböden der Acker-BDF gering (am höchsten wieder bei **BDF 48**, Hauptbodenart Lehm/Schluff Erstaufnahme 110,5 mg Pb kg⁻¹ und Beprobung 2016 108 mg Pb kg⁻¹ sowie bei **BDF 51**, Beprobung 1997 102,5 mg Pb kg⁻¹ Boden und Hauptbodenart Ton). Wie bei den Oberböden traten keine VW-Überschreitungen bei der Hauptbodenart Sand auf.

Bei den 18 Grünland BDF kommen im Oberboden nur die Hauptbodenarten Ton und Lehm/Schluff vor. Dass bei Blei auch die Hauptbodenart Sand auftaucht, liegt am pH-Wert des Bodens. Gemäß BBodSchV (BBodSchV, 1999) ist bei den Vorsorgewerten der Säuregrad des Bodens wie folgt zu berücksichtigen:

Bei Böden der Hauptbodenart Ton mit einem pH-Wert von < 5,0 gelten für Blei die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Lehm/Schluff und bei Böden der Hauptbodenart Lehm/Schluff die Vorsorgewerte der Hauptbodenart Sand (s. Kap. 2.3.1).

Bei den Grünland-BDF traten für alle Hauptbodenarten keine VW-Überschreitungen bei Blei im Oberboden auf.

Entwicklung der Bleigehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

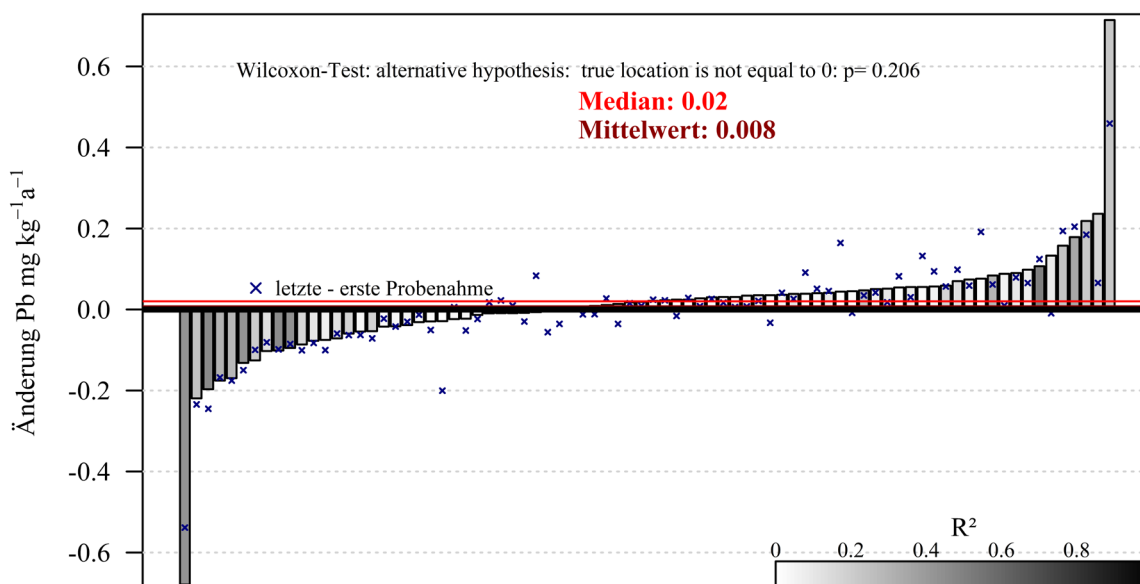


Abb. 5: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg⁻¹ a⁻¹; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 6: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Pb-Abnahme	Pb-Zunahme
Änderung absolut	35 (44%)	45 (56%)
Trend	34 (42%)	46 (58%)
davon mit R ² > 0,3	5	2
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	2	0

Bei den Bleigehalten hielten sich Flächen mit Zunahmen und Abnahmen in etwa die Waage, eine Abweichung einer zufälligen Verteilung um null konnte nicht abgesichert werden (Wilcoxon-Test: $p=0,206$). Tatsächlich konnte auch nur bei sieben BDF ein linearer Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,3 angepasst werden. Hierbei zeigten fünf BDF eine Abnahme und zwei eine Zunahme der Bleigehalte. Bei mehr als der Hälfte der BDF ist eine minimale Zunahme ausgeprägt, aber schwer zu verifizieren. Eine bayernweite gleichgerichtete Änderung der Bleigehalte und Abnahme in Ackerböden ist trotz rückläufiger Immissionen aus dem BDF Programm nicht abzulesen.

Auffällig sind bei einer BDF eine sehr viel stärkere, jährliche Zunahme, bei einer BDF auch eine sehr deutliche, jährliche Abnahme als bei den anderen BDF (in Abb. 5 Säulen ganz rechts bzw. ganz links). Die stärkste Abnahme ist wiederum auf der **BDF 51** mit den geogen (Pelosol aus Residualton) bedingt höchsten Gehalten bei den Acker BDF festzustellen. Hier sanken die Gehalte kontinuierlich um 16 mg von 101 mg kg⁻¹ 1987 über 98 mg kg⁻¹ 1997 und 92 mg kg⁻¹ 2007 auf 85 mg kg⁻¹ ab. Erstaunlicherweise zeigt die BDF mit den zweit höchsten Bleigehalten (**BDF 48**) die stärkste Zunahme von 85 mg kg⁻¹ auf 99 mg kg⁻¹. Auch die absoluten Differenzen zwischen der ersten und letzten Probenahme sind bei diesen beiden Acker BDF mit Abstand die höchsten. Die Änderungen sind plausibel nicht erklärbar. BDF mit hohen Bleigehalten haben auch eine hohe Standardabweichung innerhalb der Stichprobe der Probenahmeserie. Möglicherweise sind die Schwankungen und die Umstellung bei der Ausgangsprobenahme mit für die festgestellten hohen Änderungen hier verantwortlich (siehe Kap. 3.2.2.2 in Band 1).

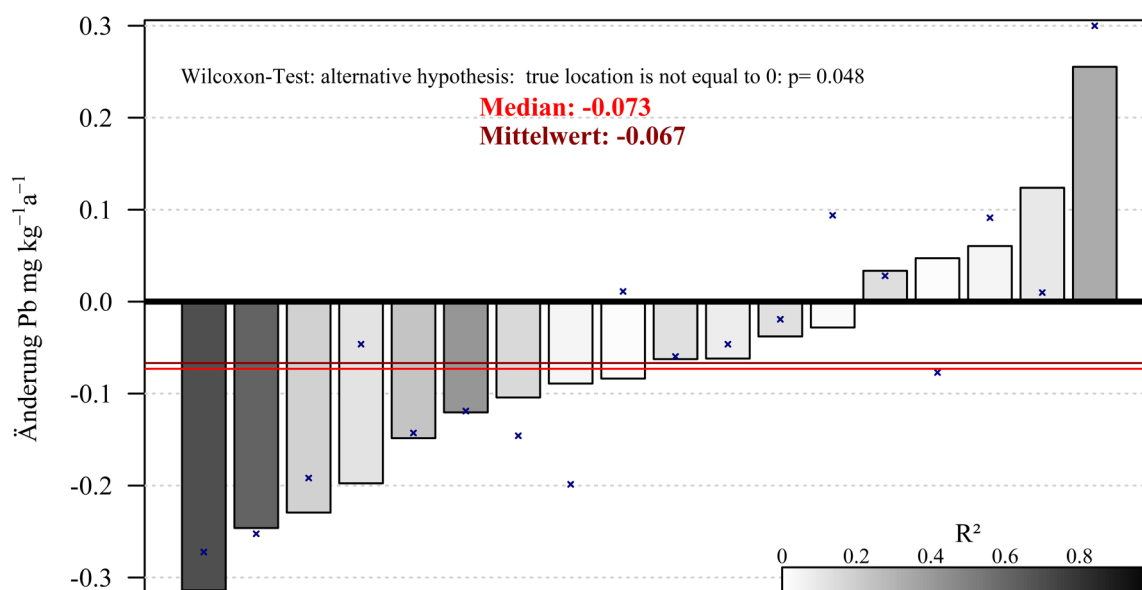


Abb. 6: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 7: Entwicklung der Pb-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Pb-Abnahme	Pb-Zunahme
Änderung absolut	12 (67%)	6 (33%)
Trend	13 (72%)	5 (28%)
davon mit $R^2 > 0,3$	3	1

Bei der Entwicklung der Blei-Gehalte auf den Grünland BDF überwogen die Abnahmen die Zunahmen (Wilcoxon-Test p-Wert; 0,021). Allerdings war nur für vier der 18 Grünland BDF eine Ausgleichsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß $> 0,3$ anzupassen. Die berechnete mittlere Änderung der Blei-Gehalte auf bayerischen Grünland BDF, lag bei $-0,073 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$, was einer Änderung von etwa 5 % in Relation zum Mittelwert dieser BDF in einem Zeitraum von 30 Jahren entspricht. Die Änderungen für die einzelnen BDF lagen bei bis zu 25 % für diesen Zeitraum. Im Vergleich zu den Ackerflächen lagen die Änderungen in einer vergleichbaren Größenordnung, im Mittel war für das Grünland jedoch ein stärkerer Rückgang festzustellen.

Der größte Rückgang wurde auf der **BDF 2** im Berchtesgadener Land gemessen, die auch die höchsten mittleren Gehalte der Grünland BDF aufwies. Hier fiel der Blei-Gehalt des Oberbodens von 1996 auf 2005 um 7 mg kg^{-1} . Die größte Zunahme wurde auf der **BDF 14** im Landkreis Rosenheim festgestellt, hier nahm der Blei-Gehalt vor allem zur letzten Probenahme 2015 Jahren auf 52 mg kg^{-1} zu, während er bei den vorherigen bei etwa 45 mg kg^{-1} gelegen hatte.

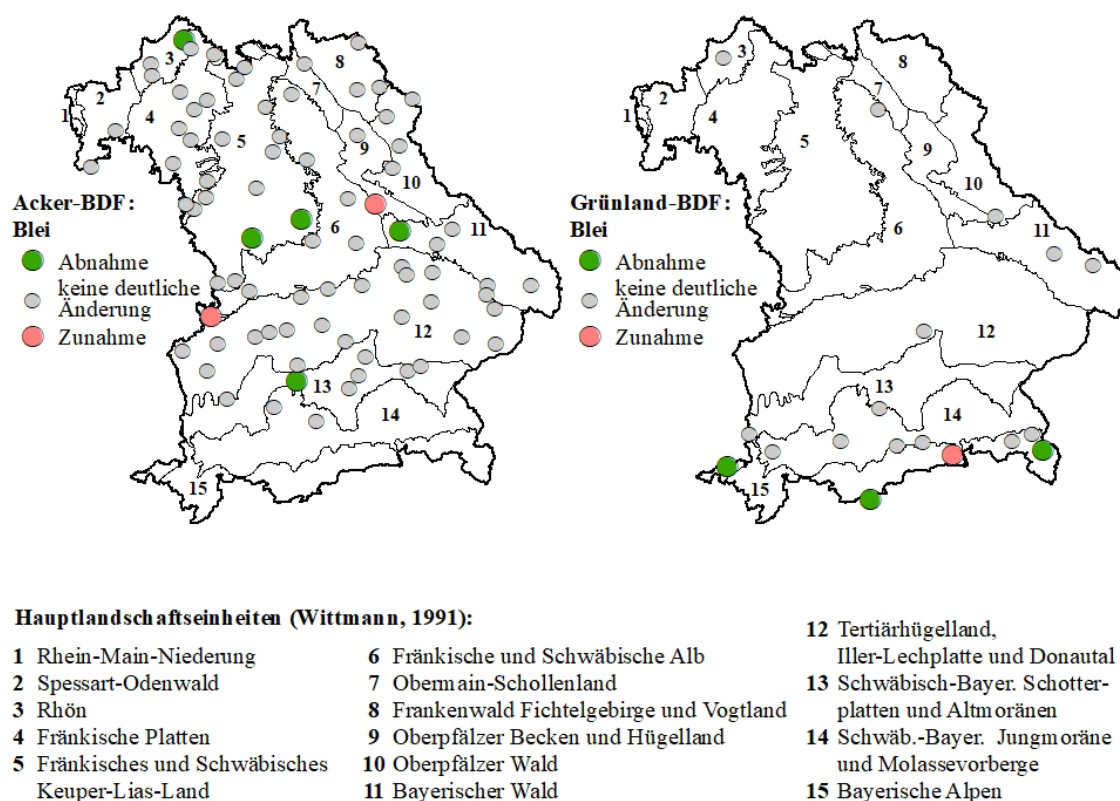


Abb. 7: Veränderung der Pb-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$.

Die beiden Karten in Abb. 7 stellen die Veränderungen der Bleigehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF noch einmal als Karte dar, woraus die räumliche Verteilung der berechneten eindeutigen Ab- und Zunahmen für Blei (s. Abb. 5 und Abb. 6), ersichtlich wird. BDF mit Gehaltsabnahmen sind grün, Zunahmen rot dargestellt. BDF, wo die lineare Regression ein Bestimmtheitsmaß $R^2<0,3$ ergeben hat, sind grau dargestellt, dort war kein eindeutiger Trend in eine Richtung auszumachen.

Bei Blei haben sich die Gehalte in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum weitgehend nicht verändert. Bei den Acker-BDF standen 5 Abnahmen, 2 Zunahmen gegenüber. Die jährlichen Abnahmen in mg Pb kg^{-1} bewegen sich dabei zwischen $-0,095$ bei **BDF 87** und $-0,679$ bei **BDF 51** in einer relativ weiten Spanne, Zunahmen konnten nur bei Acker-**BDF 115** ($+0,107 \text{ mg Pb kg}^{-1} \text{a}^{-1}$) und **BDF 49** ($+0,179 \text{ mg Pb kg}^{-1} \text{a}^{-1}$) festgestellt werden. Im Grünland traten bei 3 BDF leichte jährliche Abnahmen ($-0,12$ bis $-0,31 \text{ mg Pb kg}^{-1} \text{a}^{-1}$) und bei **BDF 14** eine Zunahme des Bleigehaltes ($+0,26 \text{ mg Pb kg}^{-1} \text{a}^{-1}$) auf (s. auch ANHANG, Tab. 60 und Tab. 61).

2.3.3.2 Cadmium (Cd)

Kurzsteckbrief Cadmium [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg^{-1}]:

Toxisches Schwermetall der 2. Nebengruppe (Zinkgruppe) des Periodensystems. Typische Gehalte im Boden 0,1-0,5 (Ø 0,3). Häufiger in Sedimentgesteinen als in Magmatiten und Metamorphiten. Cd-Salze starker Säuren sind überwiegend gut wasserlöslich. Cd zählt zu den mobileren Schwermetallen. Zentralen Einfluss auf die Cd-Adsorption im Boden hat der pH-Wert. Bei fortschreitender Bodenversauerung nimmt die Tiefenverlagerung zu. Im Boden erfolgt ein Transfer des Cadmiums in die Pflanzenwurzeln über die Lösungsphase. Deshalb sind alle bodengebundenen Faktoren, die die Sorption und Löslichkeit von Cd beeinflussen, entsprechend auch für den Übergang in die Pflanze von Bedeutung.

Typisch in Pflanzen $<0,1-1$, phytotoxisch ab 5-10, Transferfaktor: 1-10

Mobilitäts-/Mobilisierungskriterien: tiefe Boden-pH-Werte $<\text{pH } 6/6,5$.

Eintragsquellen: Cd fällt als Nebenprodukt der Zn-Gewinnung an. Verwendung in Batterien (Ni-Cd-Akkus), Korrosionsschutz für Eisen/andere Metalle, Cd in Pigmenten und PVC-Stabilisatoren, für Metalllegierungen. Hohe Einträge durch anthropogen verursachte Immissionen und Depositionen z.B. Verbrennung fossiler Brennstoffe, Müllverbrennung, Eisen-/Stahlherstellung, Reifenabrieb. Cd-Einträge über Klärschlamm, Düngemittel (insbes. Phosphatdünger sedimentären Ursprungs).

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 1,5/1/0,4 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln:

Höchstgehalt in Lebensmitteln (2006/1881/EG)* (EG-KontamV, 2006 - konsolidierte Fassung vom 14.10.2020) (mg kg^{-1} Frischgewicht): Gemüse und Früchte, ausgenommen Wurzel- und Knollengemüse, Blattgemüse, frische Kräuter, Blattkohl, Stängelgemüse, Pilze und Seetang 0,05, Wurzel- und Knollengemüse – Getreidekörner ausgenommen Weizen und Reis 0,10, Blattgemüse, Weizenkörner, Reis 0,20.

*Inzwischen (25.04.2023) ersetzt durch EU 2023/915 (s. dort).

Höchstgehalt in mg kg^{-1} (ppm), bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (FuttMV, 2002/32/EG Anh. 1 - konsolid. Text v. 28.11.2019) für Futtermittel-Ausgangserzeugnisse pflanzlichen Ursprungs 1, Alleinfuttermittel 0,5.

(Scheffer, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

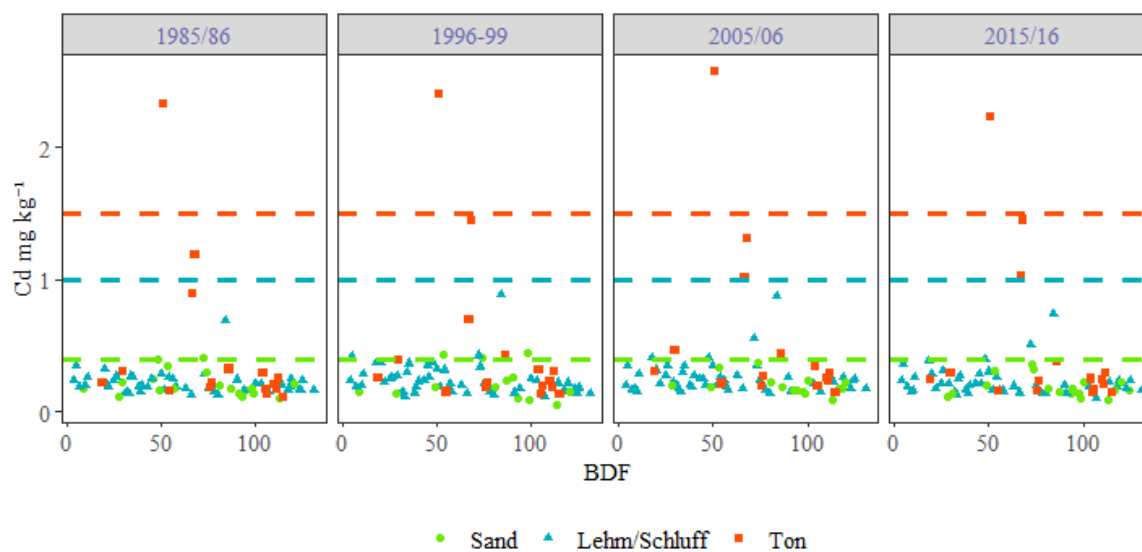
Cadmiumgehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

Abb. 8: Cd-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

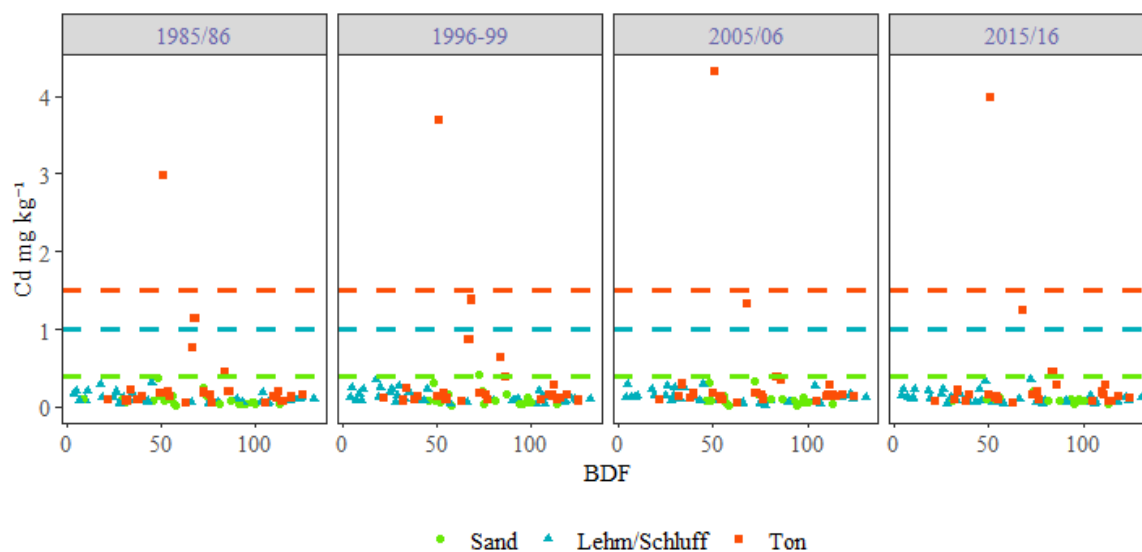


Abb. 9: Cd-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

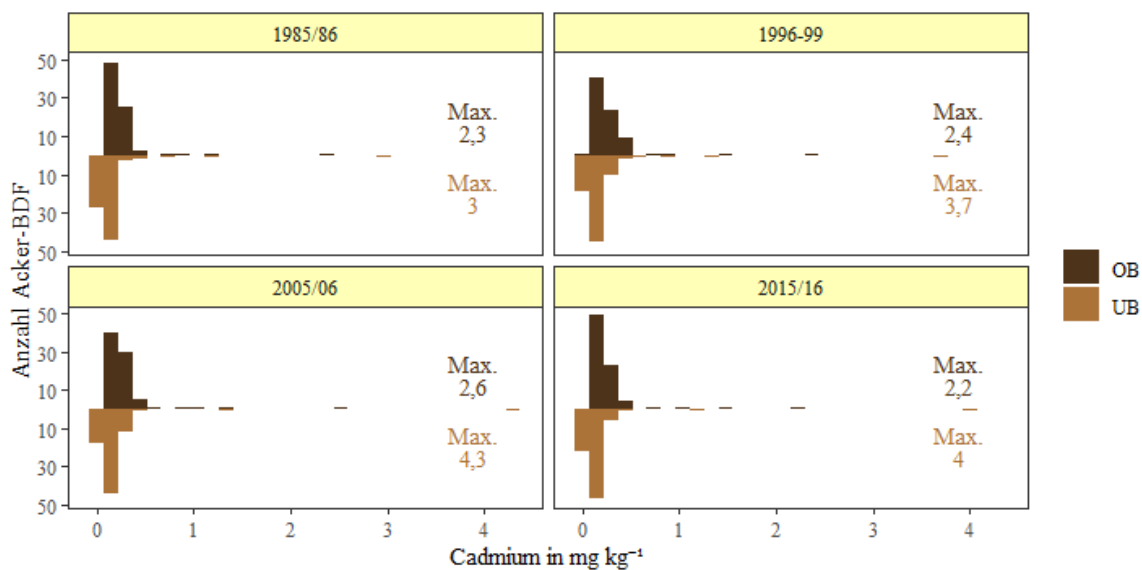


Abb. 10: Verteilung der Cd-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

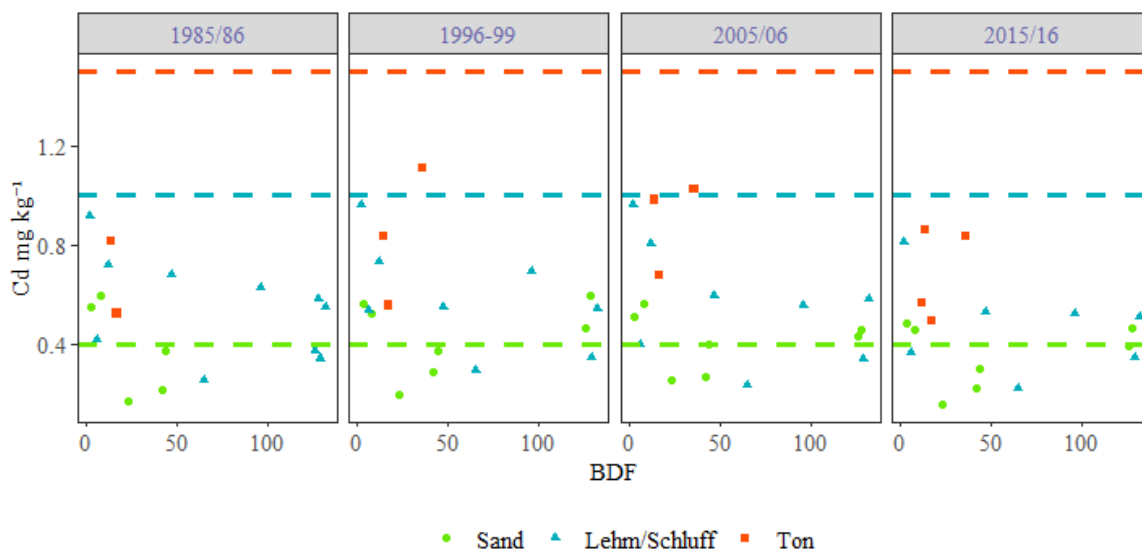


Abb. 11: Cd-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

Die mittleren Cadmiumgehalte in den landwirtschaftlich genutzten BDF Bayerns sind überwiegend gering und liegen in der Regel unter den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) oder im Bereich der Hintergrundwerte für Bayern (LfU, 2011).

Für die Acker-BDF-Oberböden und Hauptbodenart Sand liegen 4 BDF in Höhe der Vorsorgewerte (**BDF 98**, 0,45 mg Cd, **BDF 53** 0,43 mg Cd kg⁻¹ Boden, Beprobung jeweils 1996, **BDF 74**, 0,41 mg Cd, **BDF 72** 0,41 mg Cd kg⁻¹ Boden, Beprobung 1996 bzw. Erstbeprobung). Für die Hauptbodenart Lehm/Schluff traten keine VW-Überschreitungen bei den Acker-BDF-Oberböden auf. Bei der Hauptbodenart Ton kam es nur bei **BDF 51**, einem geogen vorbelasteten Standort (Pelosol aus Residualton), aber in allen 4 Beprobungsserien

zu VW-Überschreitungen (1985/86: 2,33 mg Cd, 1996-99: 2,40 mg Cd, 2005/06: 2,57 mg Cd (höchster im Oberboden der Acker-BDF gemessener Cadmium-Wert) und 2015/16: 2,23 mg Cd kg⁻¹ Boden).

Bei den Unterböden der Acker-BDF traten ebenfalls bei **BDF 51** VW-Überschreitungen auf und das in allen 4 Beprobungsserien (1985/86: 2,97 mg Cd, 1996-99: 3,69 mg Cd, 2005/06: 4,31 mg Cd (höchster im Unterboden der Acker-BDF gemessener Cadmium-Wert) und 2015/16: 3,99 mg Cd kg⁻¹ Boden). Die Unterbodengehalte von **BDF 51** lagen somit deutlich über den Cadmiumgehalten im Oberboden dieser BDF. Bei **BDF 72** (Hauptbodenart Sand) wurde bei Beprobung 1996-99 0,42 mg Cd kg⁻¹ Boden gemessen und damit der Vorsorgewert in etwa erreicht.

Bei den Grünland-BDF mit den Hauptbodenarten Lehm/Schluff und Ton wurden keine Überschreitungen der VW festgestellt. Für die Hauptbodenart Sand zeigten **BDF 128** (Beprobung 1996, 0,60 mg Cd kg⁻¹ Boden, Beprobung 2005, 0,46 mg Cd, Beprobung 2016, 0,47 mg Cd kg⁻¹ Boden), **BDF 8** (Erstbeprobung, 0,60 mg Cd kg⁻¹ Boden, 1996: 0,52 mg Cd, 2005: 0,56 mg Cd und 2015: 0,46 mg Cd kg⁻¹ Boden), **BDF 3** (ebenfalls Erstbeprobung, 0,55 mg Cd, 1996: 0,56 mg Cd, 2005: 0,51 mg Cd und 2016: 0,49 mg Cd kg⁻¹ Boden), **BDF 126** (Beprobung 1996: 0,46 mg Cd und 2005: 0,43 mg Cd kg⁻¹ Boden) sowie **BDF 44** (0,40 mg Cd kg⁻¹ Boden, Beprobung 2006) eine leichte VW-Überschreitung. All diese BDF-Proben sind nach der gemessenen Hauptbodenart als Lehm/Schluff einzustufen. Da der pH-Wert jedoch unter pH 6 lag ist die BDF hinsichtlich der VW wie Sand zu bewerten (s. Vorgaben zur Anwendung der Vorsorgewerte nach Anh. 2, Kap. 4.3 der BBodSchV (BBodSchV, 1999)).

Entwicklung der Cadmiumgehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

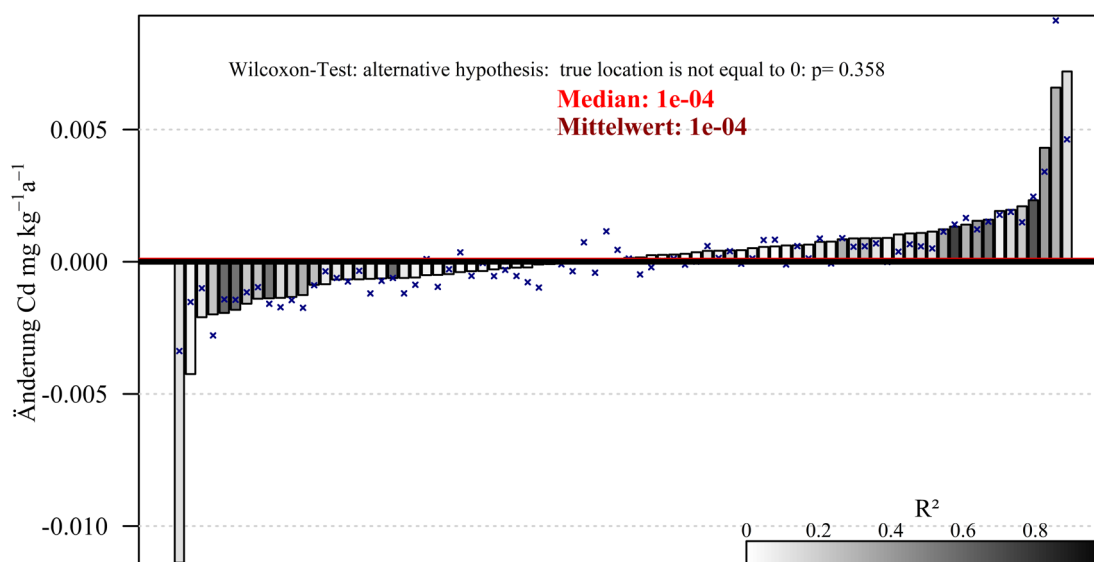


Abb. 12: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg⁻¹ a⁻¹; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 8: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Cd-Abnahme	Cd-Zunahme
Änderung absolut	41 (51%)	39 (49%)
Trend	35 (44%)	45 (56%)
davon mit $R^2 > 0,3$	5	7
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	4	7

Die Zunahmen und Abnahmen der Cadmium-Gehalte in den Oberböden der 80 Acker-BDF waren in etwa gleichmäßig um Null verteilt ($p > \alpha$, $\alpha = 0,05$). Im Mittel der Trends wurde eine jährliche auf Grund der niedrigen Gehalte geringe Veränderung von $0,0001 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Median $+0,0001 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ TS a}^{-1}$) festgestellt. Extrapoliert auf einen Zeitraum von 30 Jahren entspricht dies allerdings noch $0,03 \text{ mg kg}^{-1}$, also einem Zehntel der mittleren Gehalte. Die Anzahl an Acker BDF für die ein Bestimmtheitsmaß größer 0,3 und damit ein deutlicher linearer Zusammenhang festzustellen war, lag bei zwölf Flächen. Auch hier war kein Unterschied zwischen der Anzahl von Zu- und Abnahmen festzustellen. Die Veränderungen der Cadmium-Gehalte bei 65 % der Acker BDF lag absolut unter $0,001 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

In den Extremfällen gab der lineare Trend eine Abnahme von $-0,34 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ und eine Zunahme von $0,22 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ in 30 Jahren an, hier liegt das Bestimmtheitsmaß allerdings unter 0,3. Die Acker BDF mit der größten Zunahme der Cd-Gehalte und einer geeigneten linearen Anpassung ist die Acker **BDF 72**. Hier waren bereits die Ausgangsgehalte 1988 mit etwa $0,41 \text{ mg kg}^{-1}$ deutlich höher als im Mittel der übrigen Acker BDF und stiegen dann bei höheren Schwankungen bei den Probenahmen der Serie 2 und Serie 3 bis 2016 auf $0,50 \text{ mg kg}^{-1}$ an. Die BDF liegt im Lkr. Hof/Bayern (Oberfranken) und nach Bodenausgangsgesteinskarte des LfU (LfU, 2011) in der BAG-Einheit 53 (Amphibolit, Serpentin, Diabas, Basalt, Gabbro und andere Metabasite und Basite, z.T. mit Löß und Lößlehm). Für diese BAG Einheit wies das LfU als Hintergrundwerte ähnlich hohe Cadmiumgehalte aus, wie sie auf der BDF gemessen wurden.

Die stärkste Abnahme (mit $R^2 > 0,3$) war mit einem sprunghaften Rückgang um $0,06 \text{ mg kg}^{-1}$ zwischen der Probenahme von 1996 auf 2007 auf **BDF 46** im Landkreis Cham festzustellen. Dort sind die Unterbodengehalte deutlich niedriger als im Oberboden. Es wäre vorstellbar, dass durch eine tiefere Bodenbearbeitung geringer belastetes Unterbodenmaterial in den Oberboden eingemischt wurde.

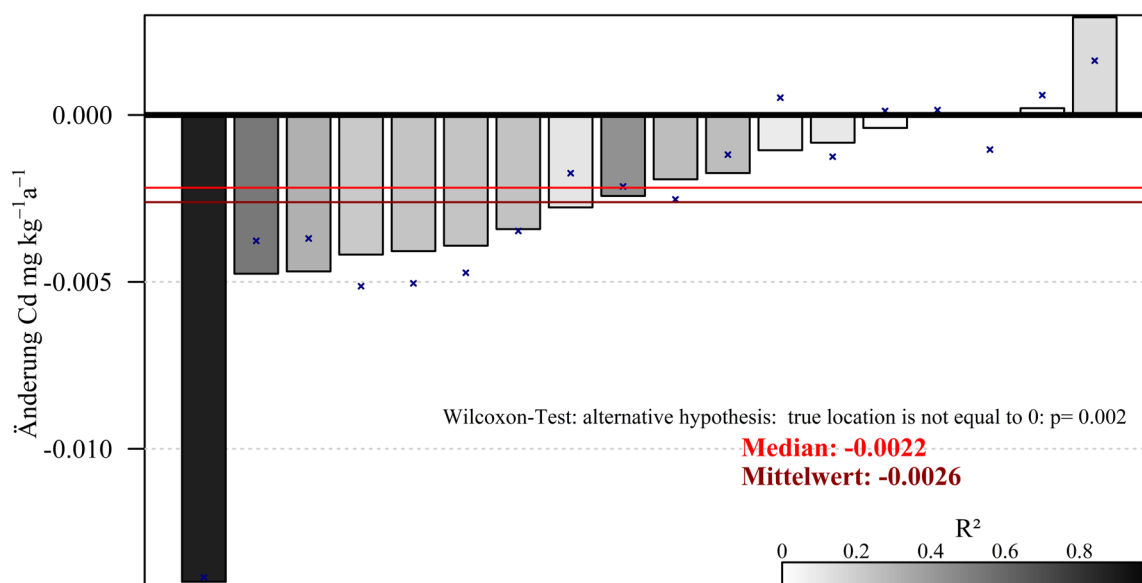


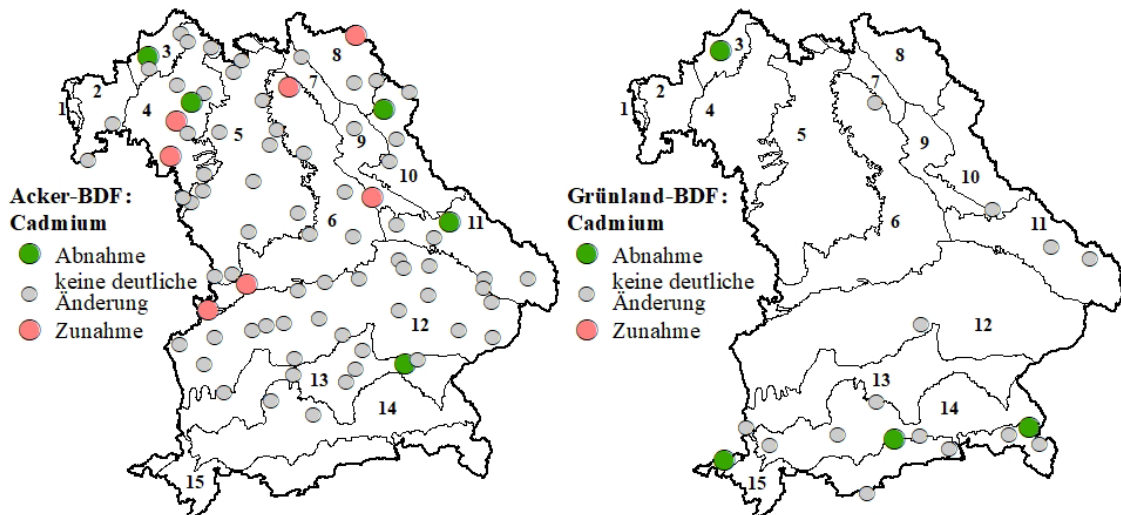
Abb. 13: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 9: Entwicklung der Cd-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Cd-Abnahme	Cd-Zunahme
Änderung absolut	13 (72%)	5 (28%)
Trend	14 (78%)	4 (22%)
davon mit $R^2 > 0,3$	4	0

In den Oberböden der 18 Grünland-BDF haben sich die Cadmium-Gehalte im Beobachtungszeitraum um etwa $-0,003 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ verändert. Damit waren die Änderungen etwas höher als in den Acker-BDF, wo deutlich mehr geringe Änderungen festgestellt wurden und die Verteilung gleichmäßiger war. Für die Grünland BDF ist bei einer Zunahme auf nur 4 und einer Abnahme auf 14 Flächen eine deutliche Verschiebung hin zu den Abnahmen festzustellen (Wilcoxon-Test p-Wert: 0,002). Allerdings ergab sich nur für vier BDF ein Bestimmtheitsmaß $> 0,3$. Im Mittel änderten sich die Gehalte relativ zum Mittelwert für einen extrapolierten Zeitraum von 30 Jahren um etwa 15 %, bei maximalen Werten bis zu 42 %.

Die stärkste Abnahme (Trend: $-0,014 \text{ mg kg}^{-1}$ & $R^2=0,88$ und $-0,28 \text{ mg kg}^{-1}$ (Differenz End-Anfangswert)) trat bei **BDF 36** auf. Dort wurde 1996 und 2005 mit 1,1 bzw. 1,0 mg kg^{-1} auch insgesamt der höchste Cadmiumwert im Grünland gemessen. Von dieser BDF wurden jedoch nur 3 Serien (erst seit 1996) untersucht und es handelt sich um einen sehr tonigen Standort im Alpenvorland.



Hauptlandschaftseinheiten (Wittmann, 1991):

- | | | |
|---|---|---|
| 1 Rhein-Main-Niederung | 6 Fränkische und Schwäbische Alb | 12 Tertiärhügelland, Iller-Lechplatte und Donautal |
| 2 Spessart-Odenwald | 7 Obermain-Schollenland | 13 Schwäbisch-Bayer. Schotterplatten und Altmoränen |
| 3 Rhön | 8 Frankenwald Fichtelgebirge und Vogtland | 14 Schwäb.-Bayer. Jungmoräne und Molassevorberge |
| 4 Fränkische Platten | 9 Oberpfälzer Becken und Hügelland | 15 Bayerische Alpen |
| 5 Fränkisches und Schwäbisches Keuper-Lias-Land | 10 Oberpfälzer Wald | |
| | 11 Bayerischer Wald | |

Abb. 14: Veränderung der Cd-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot= $Trend > 0$ & $R^2 > 0.3$, grün= $Trend < 0$ & $R^2 > 0.3$, grau= $R^2 < 0.3$.

Für Cadmium haben sich die Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum häufig nicht groß verändert. Traten bei Grünland-BDF nur auf 4 BDF im Alpenraum und der Rhön Gehaltsabnahmen auf, standen auf Acker-BDF 5 Abnahmen, 7 Zunahmen gegenüber. Bei der Grünland-BDF 36 haben die Cd-Gehalte im Oberboden im linearen Trend um $-0,014 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ am stärksten für Grünland-BDF abgenommen. Auf den Acker-BDF lag die Spanne der jährlichen Ab- und Zunahmen bei $-0,0006 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (BDF 95) bis $-0,0019 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (BDF 46) bzw. $+0,00085 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (BDF 114) bis $+0,0043 \text{ mg Cd kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (BDF 72), also bei viel geringeren Gehaltsveränderungen.

Zunahmen der Cadmiumgehalte im Oberboden von Acker-BDF traten in der fränkischen und schwäbischen Alb, im Muschelkalk und Löss und in Nordostbayern auf. Cadmium ist geochemisch mit Zink verwandt. In Sedimentgesteinen (Löss, Ton) oder bei der Kalksteinverwitterung kommt es gehäuft vor und reichert sich dort an, was für diese Zunahmen verantwortlich sein könnte.

2.3.3.3 Chrom (Cr)

Kurzsteckbrief Chrom [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Schwermetall der VI. Nebengruppe des Periodensystems, für Säuger aber essenzielles Spurenelement (für Pflanzen wahrscheinlich entbehrlich). Typische Gehalte im Boden 2-100 (Ø60) – Serpentinböden bis 3000. 2 Oxidationsstufen im Boden relevant (meist als +III, seltener +VI) mit unterschiedlicher Löslichkeit und Toxizität (Cr^{III} << Cr^{VI}). Leicht sorbiert vom Boden, starke Affinität zum Humus (Anreicherung). Bindung an Silikate und Eisenoxide. Geogene Cr-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmender Bodentiefe an, während anthropogen eingetragenes Cr überwiegend im Oberboden akkumuliert. In der Regel ist nur ein sehr kleiner Teil der Gesamtfraktion des Cr bioverfügbar oder relativ leicht mobilisierbar. Pflanzen weisen daher meist niedrige Cr-Gehalte auf (Ausnahme Serpentinböden).

Typisch in Pflanzen 0,1-1, phytotoxisch ab >0,1-1, Transferfaktor: 0,01-0,1

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: niedrige Boden-pH-Werte (v.a. bei pH<4-5).

Eintragsquellen: Bestandteil zahlreicher natürlicher Mineralien (geogene Vorbelastungen z.B. Serpentinböden). Verwendung in der Eisen-, Stahl- und Glasindustrie, in Bergbaugebieten, Umgebung metallverarbeitender Industrie, Kohleverbrennung, chemische Industrie, Lederverarbeitung zum Gerben. Abrieb verchromter Bauteile. Bei der Herstellung von Zementen entstehen während des Brennvorganges wasserlösliche Chrom(VI)-Verbindungen. Solche Cr^{VI}-Verbindungen können auch bei der Verbrennung biogener Substrate (z.B. Holz) entstehen (daher in Holzasche enthalten). Im Gegensatz zu vielen anderen Schwermetallen ist der Cr-Eintrag in die Böden durch Deposition aus der Atmosphäre vergleichsweise gering. Düngemittel (Thomasphosphate), Klärschlamm, Cr-reiche Abwässer, Chrom ist zwar kein Wirkstoff in Pflanzenschutzmitteln, wird aber als Verunreinigung in metallhaltigen Pflanzenschutzmitteln in Böden eingetragen.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 100/60/30 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Scheffer, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

Chromgehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

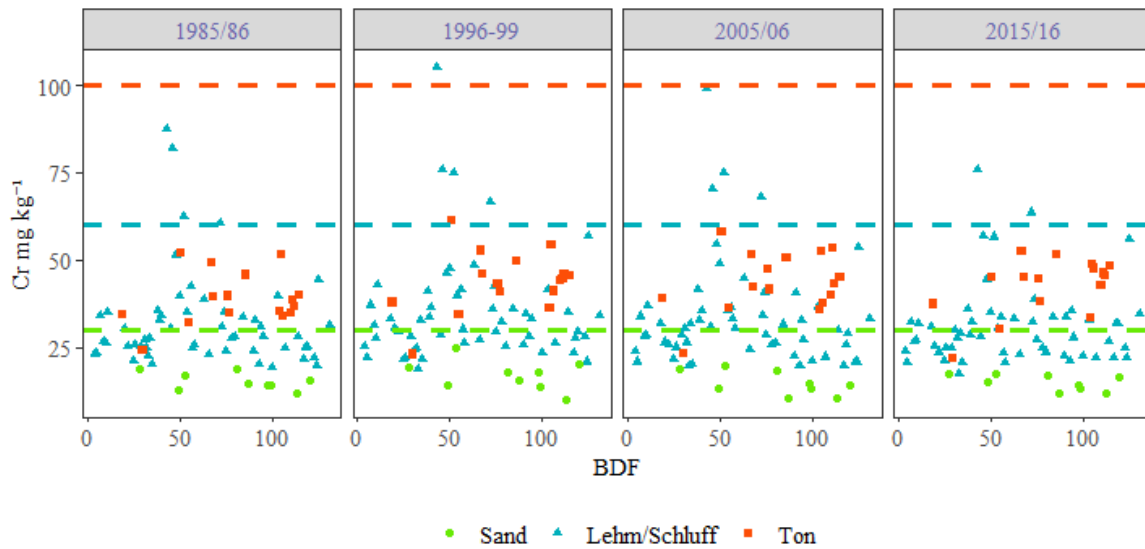


Abb. 15: Cr-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

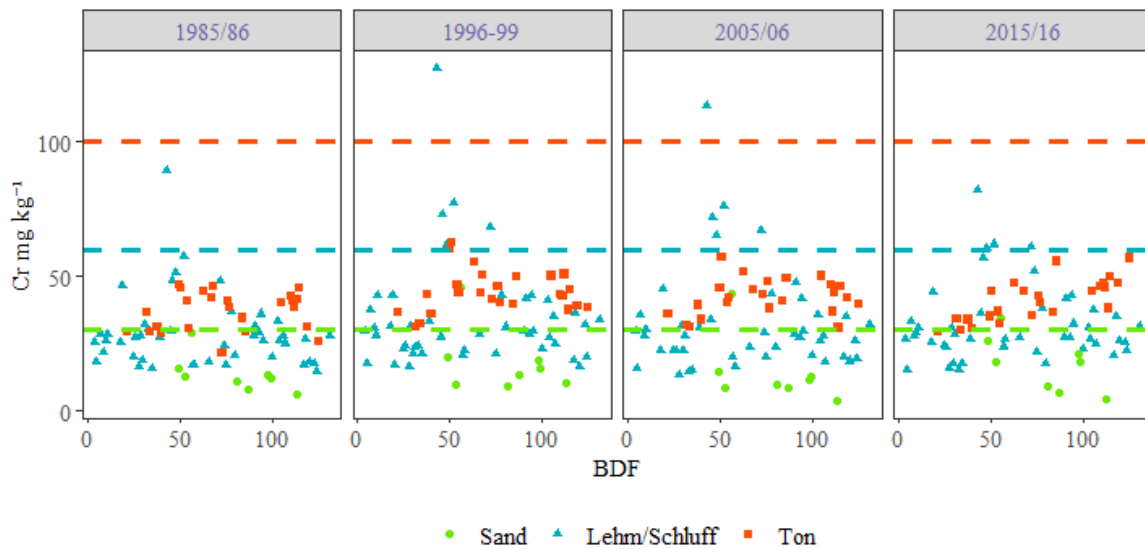


Abb. 16: Cr-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

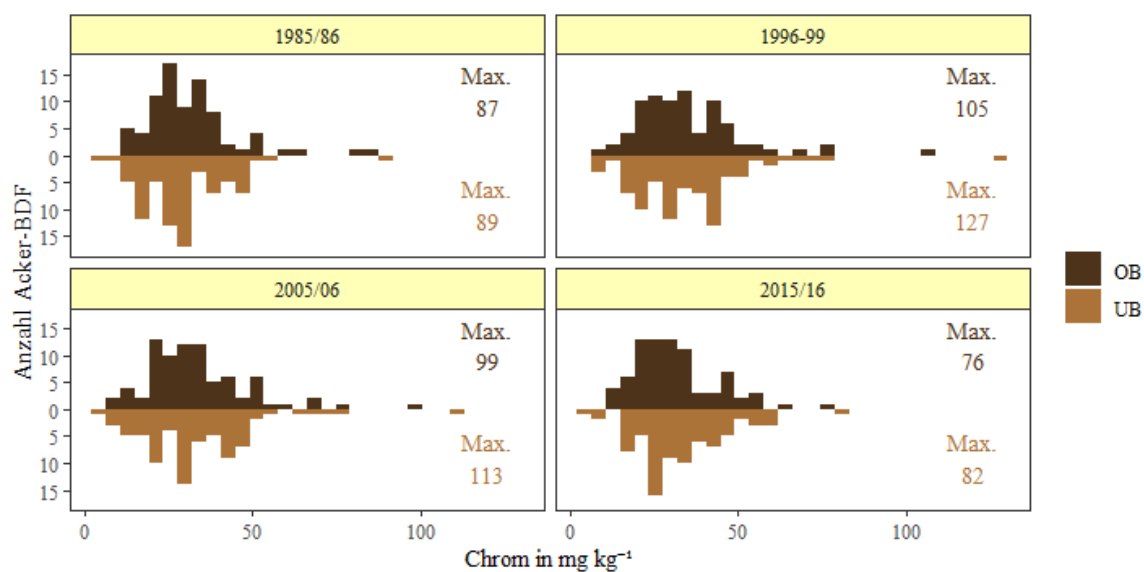


Abb. 17: Verteilung der Cr-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

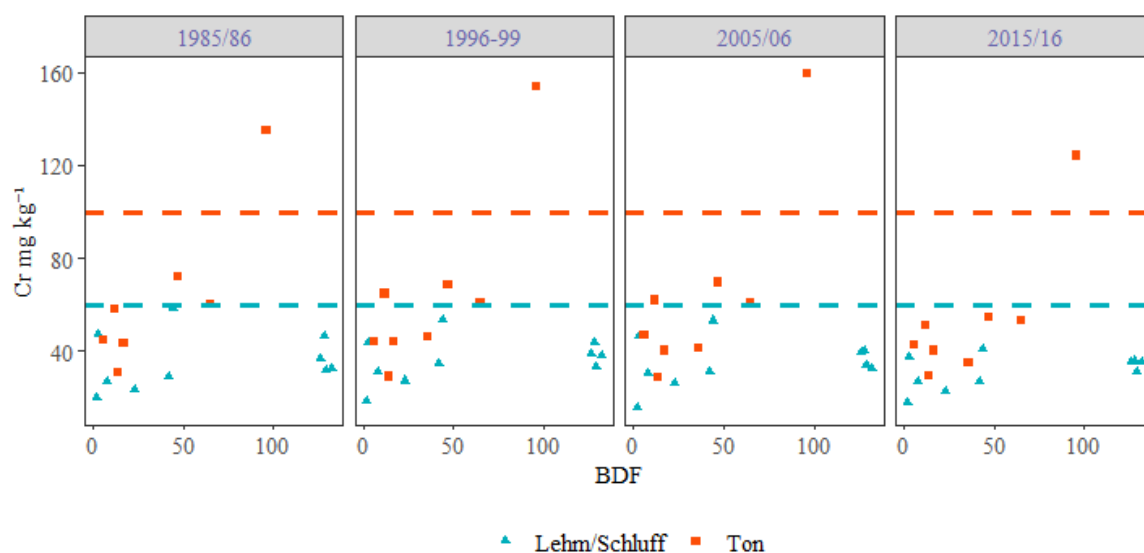


Abb. 18: Cr-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

Die mittleren Chromgehalte in den landwirtschaftlich genutzten BDF Bayerns sind meist gering und liegen überwiegend unter den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999).

In den Oberböden der Acker-BDF traten für die Hauptbodenart Sand keine VW-Überschreitungen auf, gleichermaßen gilt dies für die BDF mit Hauptbodenart Ton. Für die Hauptbodenart Lehm/Schluff traten 14 VW-Überschreitungen auf (**BDF 43**: bei allen Serien und Maximalwert für Oberböden auf Acker-BDF: 105 mg Cr kg⁻¹ Boden bei Beprobung 1996, **BDF 46**, **BDF 52**, **BDF 72** – Werte zwischen 60 und 100 mg Cr kg⁻¹ Boden).

Wie Abb. 16 und Abb. 17 zeigen sind die Chromgehalte in den Unterböden nicht viel höher als in den Oberböden. Bei **BDF 43** (Hauptbodenart Lehm/Schluff) Beprobung 1996

(127 mg Cr kg⁻¹ Boden) und Beprobung 2006 (113 mg Cr kg⁻¹ TS Boden) wurden auch Cr-Gehalte über 100 mg gemessen. Bei **BDF 56** und Hauptbodenart Sand, Beprobung 1998 (45,8 mg Cr kg⁻¹ Boden) und Beprobung 2007 (43,3 mg Cr kg⁻¹ Boden) traten leichte VW-Überschreitungen auf. Beide BDF liegen im Bayerischen Wald, die erhöhten Chromgehalte dürften also geogene Ursachen haben.

Bei den Grünland-BDF lag **BDF 96** (Hauptbodenart Ton) in allen Beprobungen des Oberbodens über dem VW (1985/86: 135 mg Cr kg⁻¹ Boden, 1996-99: 154 mg Cr kg⁻¹ Boden, 2005/06: 159 mg Cr kg⁻¹ Boden und 2015/16: 124 mg Cr kg⁻¹ Boden). Die Fläche befindet sich nahe der schwarzen Berge in der Rhön, die leicht höheren Chromgehalte sind auch hier geogen bedingt.

Entwicklung der Chromgehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

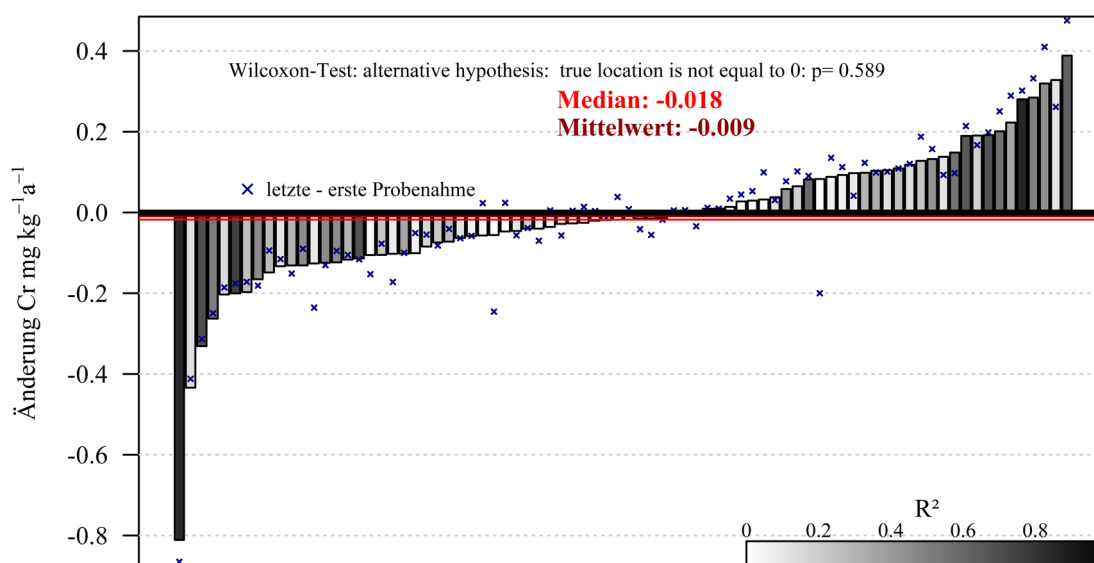


Abb. 19: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg⁻¹ a⁻¹; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 10: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Cr-Abnahme	Cr-Zunahme
Änderung absolut	38 (48%)	42 (52%)
Trend	46 (58%)	34 (42%)
davon mit R ² > 0,3	10	14
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	7	11

Eine gerichtete Änderung der Chromgehalte in bayerischen Ackerböden ist aus den Erhebungen der Bodendauerbeobachtungsflächen nicht abzulesen. Die berechneten Änderungen verteilten sich gleichmäßig um Null. So wurde auf 10 Acker BDF eine lineare Abnahme (R²>0.3) und auf 14 eine lineare Zunahme festgestellt, für die übrigen war keine Änderung oder keine geeignete Erklärung durch den linearen Trend festzustellen. Im Mittel lag der

Trend bei $-0,009 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Dies entspricht einer Abnahme von $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ innerhalb von 30 Jahren. Im Verhältnis zum Mittelwert lagen die theoretischen Änderungen auf den einzelnen BDF im Mittel bei 10% (0 – 34%) für diesen Zeitraum.

Die stärkste Abnahme der Chromgehalte wurde mit $0,81 \text{ mg Cr kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf **BDF 46** beobachtet. Hier fiel der Chromgehalt sehr deutlich und gleichmäßig ($R^2=0,83$) von 82 mg kg^{-1} im Jahr 1986, was einem hohen Ausgangswert entspricht auf 57 mg kg^{-1} im Jahr 2015. Die BDF befindet sich im Oberen Bayerischen Wald. Die Chromgehalte auf dieser BDF sind im Oberboden bei fast allen Serien höher als im Unterboden (am ausgeprägtesten ist der Unterschied bei der Erstbeprobung 1986 ($82,1 \text{ mg Cr}$ im OB und $48,5 \text{ mg}$ im UB). Es ist ein starker Wechsel des pH-Wertes im Oberboden zwischen 1986 pH 5,7 und 1996 pH 6,4 festzustellen, die Unterböden wiesen in der Regel deutlich niedrigere pH-Werte: 4,9 (1986) bis 6,1 (2015) und auch einen ausgeprägteren pH-Wechsel wie beim Oberboden auf. Der pH beeinflusst die Löslichkeit und Bindung des Chroms stark (vermehrte Löslichkeit des Chroms bei niedrigem pH-Wert und damit mögliche Tiefenverlagerung!). Grund für die starke Abnahme des Chromgehaltes im Oberboden der Acker-BDF 46 könnte also sein, dass Unterbodenmaterial in den Oberboden gelangt ist oder Chrom in tiefere Bodenschichten verlagert worden ist.

Die größte Zunahme fiel mit $0,39 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf der **BDF 106** ($R^2>0,3$, $R^2=0,62$) deutlich geringer aus. Hier wiesen die Unterböden außer bei der Beprobung 2016 geringere Chromgehalte als im Oberboden auf, der pH-Wert lag in allen Beprobungsserien und sowohl im Ober- als im Unterboden über pH 7,1. Es wurde ein Wechsel der Hauptbodenart vom Oberboden (Ton – 40,5 % Schluff) zum Unterboden (Lehm/Schluff – 48,2 % Schluff) festgestellt.

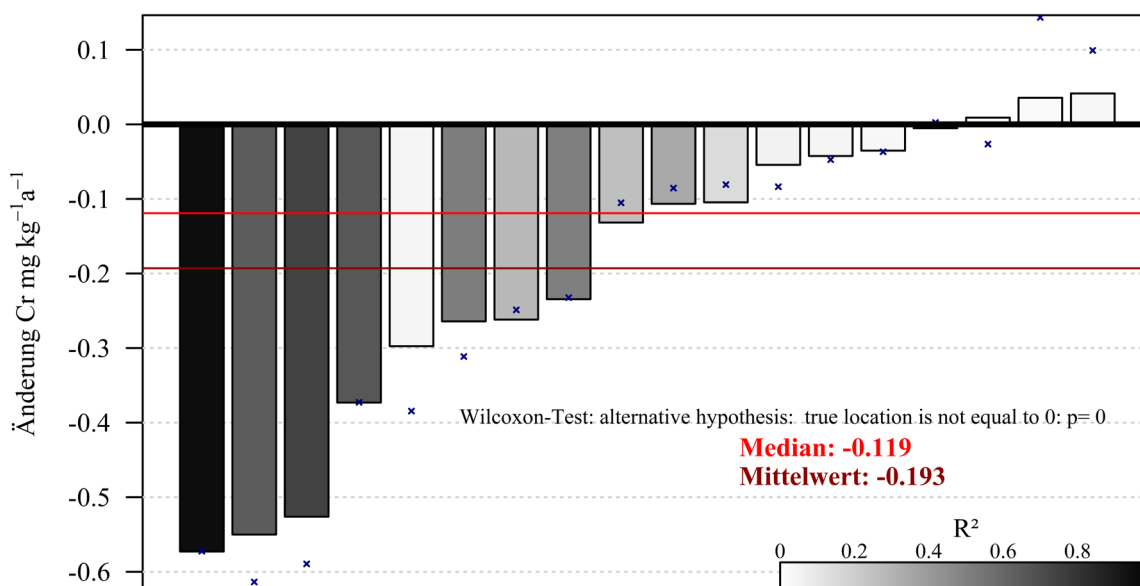


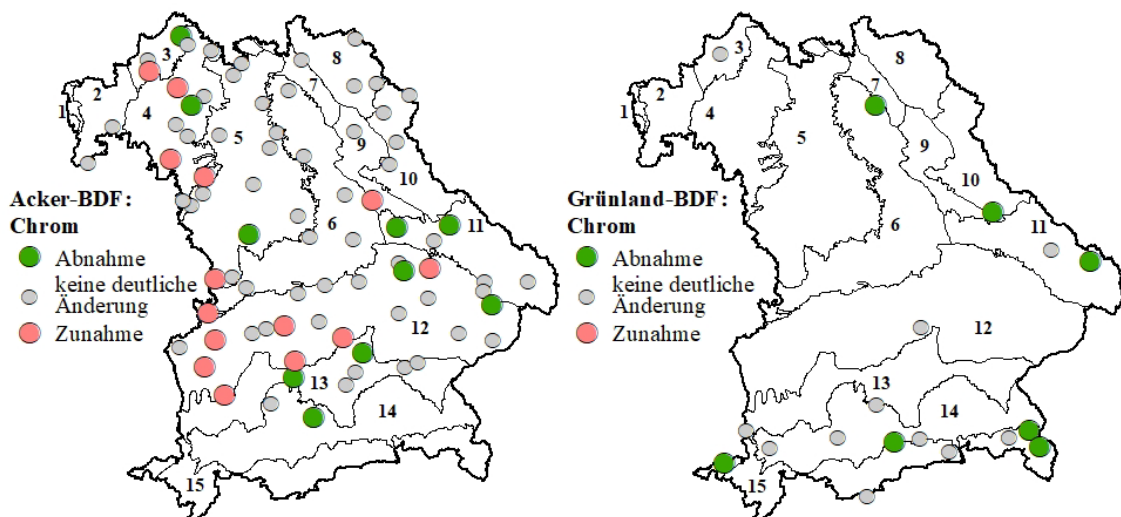
Abb. 20: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.

Tab. 11: Entwicklung der Cr-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Cr-Abnahme	Cr-Zunahme
Änderung absolut	14 (78%)	4 (22%)
Trend	15 (83%)	3 (17%)
davon mit $R^2 > 0,3$	7	0

In den Oberböden der 18 Grünland-BDF haben die Chromgehalte im Beobachtungszeitraum um im Mittel $-0,193 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ abgenommen. Von den 18 Grünland BDF zeigten 15 einen negativen Trend, sieben davon mit einem Bestimmtheitsmaß $>0,3$. Die Verteilung wich damit signifikant von einer zufälligen Verteilung um Null ab. Für einen Zeitraum von 30 Jahren ergibt sich eine Änderung von $5,79 \text{ mg kg}^{-1}$, was in etwa 13 % im Verhältnis zum Mittelwert der Grünland BDF entspricht.

Einen stärkeren Rückgang zeigte **BDF 47** im Landkreis Cham, hier ging der Chrom-Gehalt von 72 mg kg^{-1} 1986, über 68 mg kg^{-1} (1996) und 69 mg kg^{-1} (2005) auf 55 mg kg^{-1} (2015) zurück. Die Ursachen für den Rückgang sind unbekannt.



Hauptlandschaftseinheiten (Wittmann, 1991):

- | | | |
|---|---|---|
| 1 Rhein-Main-Niederung | 6 Fränkische und Schwäbische Alb | 12 Tertiärhügelland, Iller-Lechplatte und Donautal |
| 2 Spessart-Odenwald | 7 Oberrhein-Schollenland | 13 Schwäbisch-Bayer. Schotterplatten und Altmoränen |
| 3 Rhön | 8 Frankenwald Fichtelgebirge und Vogtland | 14 Schwäb.-Bayer. Jungmoräne und Molassevorberge |
| 4 Fränkische Platten | 9 Oberpfälzer Becken und Hügelland | 15 Bayerische Alpen |
| 5 Fränkisches und Schwäbisches Keuper-Lias-Land | 10 Oberpfälzer Wald | |
| | 11 Bayerischer Wald | |

Abb. 21: Veränderung der Cr-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend >0 & $R^2>0,3$, grün=Trend <0 & $R^2>0,3$, grau= $R^2<0,3$.

Gegenüber den vielen Acker- und Grünland-BDF, wo keine deutlichen Veränderungen der Chromgehalte in den Oberböden festgestellt werden konnten, nahmen auf 7 Grünland-BDF (überwiegend im Alpenraum und dem nordostbayerischen Grundgebirge) die Gehalte ab. Chrom ist überwiegend geogener Natur und daher vom Ausgangsgestein abhängig. Bei Acker-BDF standen den 10 Gehalts-Abnahmen, 14 Zunahmen (meist im Westen und

Nordwesten, dem Tertiärhügelland oder Unterfranken) gegenüber (s. Abb. 21). Die Höhe der Ab- und Zunahmen ist für Acker- und Grünland-BDF den Tab. 60 und Tab. 61 im ANHANG zu entnehmen.

Besonders deutlich haben die Cr-Gehalte im Oberboden bei Acker-**BDF 46** abgenommen ($-0,81 \text{ mg Cr kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$); die Zunahmen erreichten auf Acker-BDF für Chrom im Oberboden nur bis $+0,39 \text{ mg Cr kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei **BDF 106**. Die jährlichen Abnahmen des Cr-Gehalts im Oberboden der Grünland-BDF lagen zwischen $-0,11$ (**BDF 2**) und $-0,57 \text{ mg Cr kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (**BDF 36**).

2.3.3.4 Kupfer (Cu)

Kurzsteckbrief Kupfer [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Edelmetall der 1. Nebengruppe des Periodensystems der chemischen Elemente (Kupfergruppe), wichtiges Mikronährelement für Mensch, Tier und Pflanze (Kupfer-Mangel bei quarzreichen, sandigen, podsoligen oder moorigen Böden). Toxisch für Mikroorganismen. Bei Cu-Überschuss toxische Wirkungen auf Pflanzen („Wachstumsbeeinträchtigungen“) und Tiere (vor allem Schafe) möglich. Chronische Cu-Toxizität beim Menschen dagegen kaum bekannt.

Typische Gehalte im Boden: 1-40 (Ø≤5).

Kupfer wird in Ah-Horizonten von Böden gemäßigt-humider Klimabereiche vornehmlich an organische Substanzen und Mn- bzw. Fe-Oxide gebunden. Die Bindung von Kupfer in Unterböden ist weniger stark ausgeprägt - Cu ist dort vornehmlich an Mn- und Fe-Oxide gebunden.

Bei normalen Boden pH-Werten ist Cu meist fest im Boden gebunden.

Pflanzen nehmen Kupfer als Cu²⁺-Ionen und wahrscheinlich auch in Form niedermolekularer organischer und anorganischer Komplexe auf. Mit Ausnahme sogenannter Hyperakkumulatoren reichern Pflanzen Kupfer, wie auch andere Schwermetalle, in den Wurzeln an. In der Regel nehmen die Cu-Gehalte einzelner Pflanzenteile in der Reihe Wurzel → Spross → Frucht ab.

Cu findet Verwendung als elektrischer Leiter (Kabelmaterial), als Material für Dächer/Dachrinnen, Heizungs- oder Trinkwasserleitungen, Legierungsbestandteil (Messing, Bronze). Kupferverbindungen werden wegen der bioziden Eigenschaften als Holzschutzmittel oder Pflanzenschutzmittel eingesetzt.

Eintragsquellen: industrielle Emissionen (Kupferhütten), Klärschlämme und Abwässer (Einleitung Cu-belasteter Dachflächenwässer), Schweinegülle (Kupfer als Zusatz in Futtermitteln), Bioabfälle und Gärreste, wg. fungizider Wirkung Eintrag von Kupferpräparaten als Pflanzenschutzmittel bei Sonderkulturen (Hopfen+Wein) sowie bei Kartoffeln.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: niedrige Boden-pH-Werte (v.a. bei pH<5).

Typisch in Pflanzen 2-20, kritisch. Grenzwert Pflanzen: >15(20)-35, Transferfaktor: 0,1-1, Bei Unterversorgung kommt es zu Cu-Mangelsymptomen (peitschenartiger, gekrümmter Wuchs, Dürresymptome, Chlorosen und Weißfärbung der jüngeren Blätter) oder zu Mindererträgen.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 60/40/20 (Ton/Lehm+Schluff/Sand) (BBodSchV, 1999)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Scheffer, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

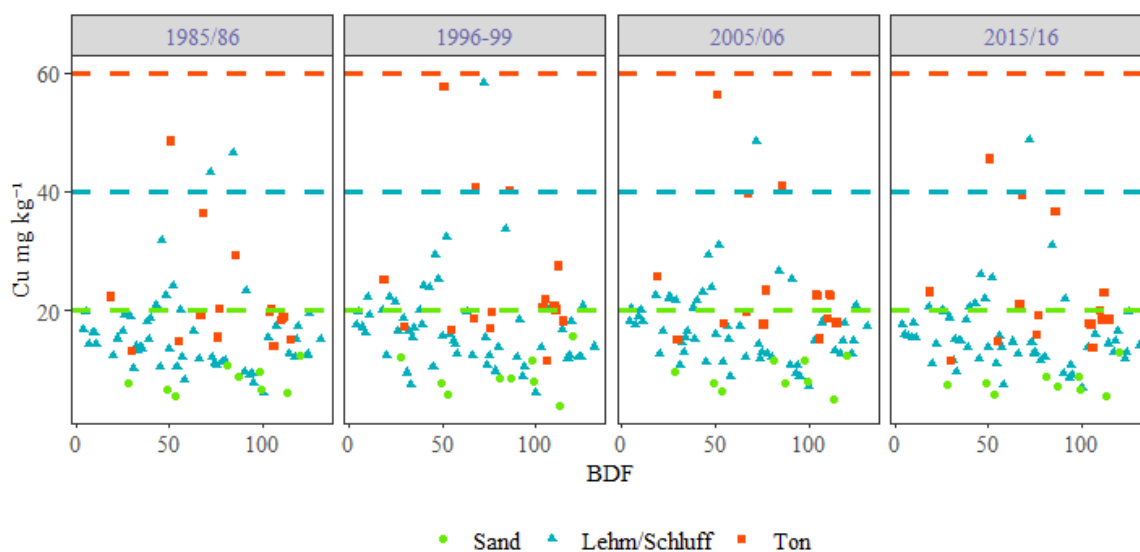
Kupfergehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

Abb. 22: Cu-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

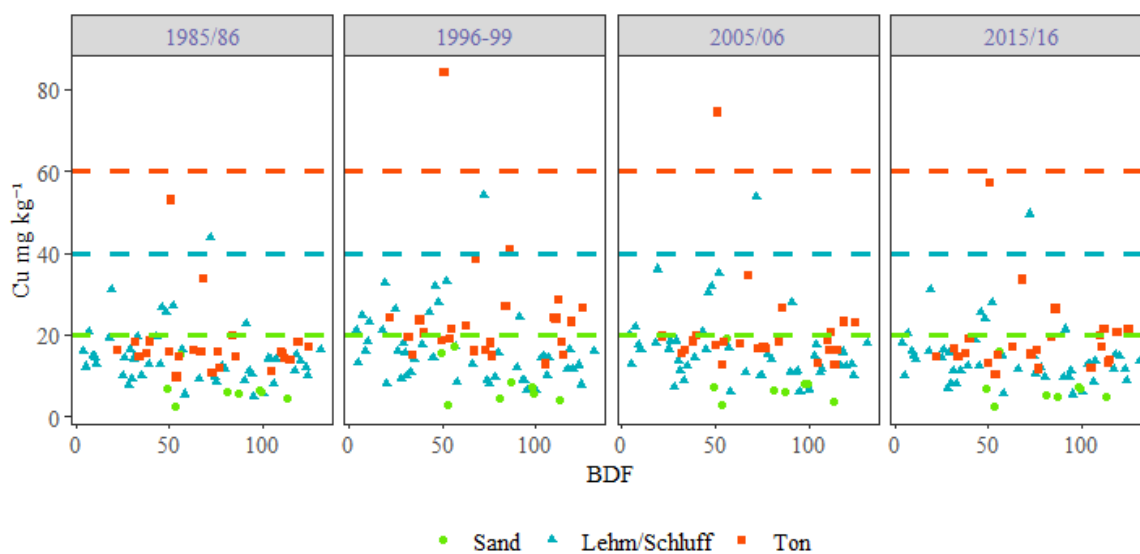


Abb. 23: Cu-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

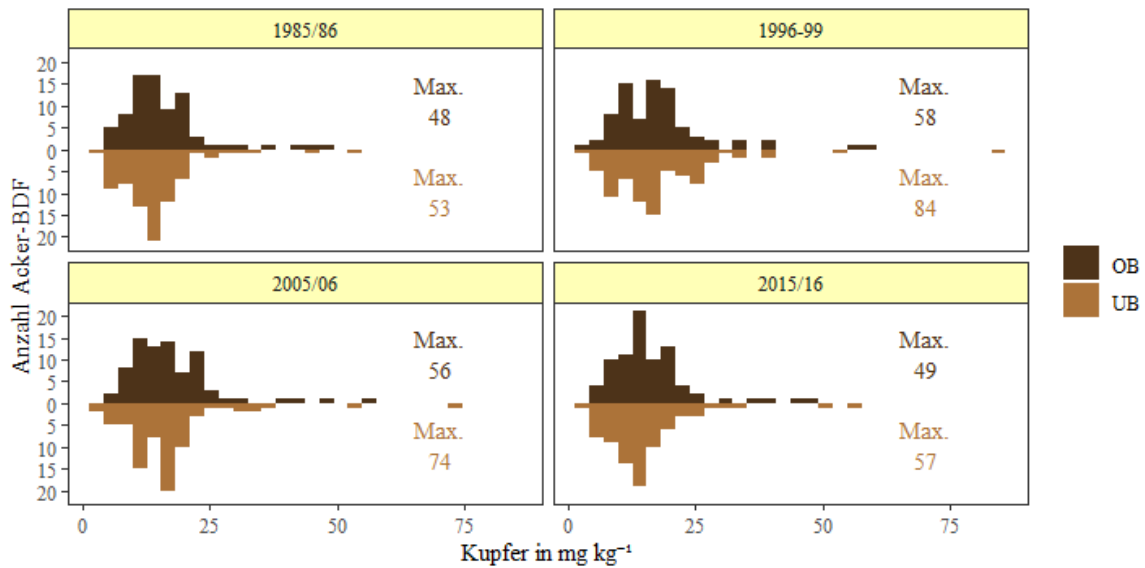


Abb. 24: Verteilung der Cu-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

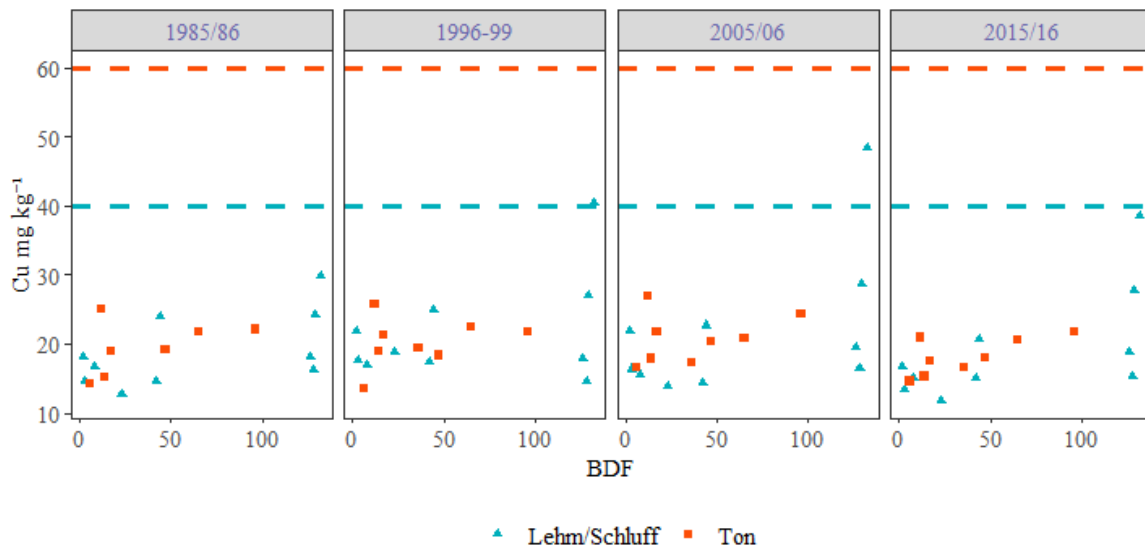


Abb. 25: Cu-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

Die mittleren Kupfergehalte in den landwirtschaftlich genutzten Acker- und Grünland-BDF von Bayern sind niedrig, liegen häufig sogar unterhalb 50 mg kg⁻¹ und bleiben auch meistens unter den Vorsorgewerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (s. Abb. 22, Abb. 23 und Abb. 25).

Bei den Oberböden der Acker-BDF und den Hauptbodenarten Sand und Ton traten keine Überschreitungen von Vorsorgewerten (VW) auf. Bei Hauptbodenart Lehm/Schluff allerdings traten VW-Überschreitungen bei **BDF 72** bei allen Beprobungen (1985/86: 43,3 mg Cu, 1996-99: 58,3 mg Cu (höchster Wert in Acker-BDF-Oberböden), 2005/06: 48,5 mg Cu und 2015/16: 48,8 mg Cu kg⁻¹ Boden) und **BDF 84** (nur bei Ersterhebung: 46,4 mg Cu kg⁻¹ Boden) auf. Die **BDF 72** liegt nordöstlich von Hof/Bayern. Für sie ist als

Bodenausgangsgestein (BAG), BAG-Einheit 53 ausgewiesen (Amphibolit, Serpentin, Diabas, Basalt, Gabbro und andere Metabasite und Basite, z.T. mit Löß und Lößlehm), womit eine gewisse geogene Vorbelastung vorliegen dürfte. **BDF 84** liegt in der fränkischen Alb.

Bei den Unterböden der Acker-BDF wurden bei der Hauptbodenart Sand keine VW-Überschreitungen festgestellt. Bei der Hauptbodenart Lehm/Schluff lagen die Cu-Gehalte nur bei **BDF 72** über den Vorsorgewerten der BBodSchV, jedoch bei allen Beprobungsreihen (1985/86: 44 mg Cu, 1996-99: 54,3 mg Cu, 2005/06: 53,6 mg Cu und 2015/16: 49,6 mg Cu kg⁻¹ Boden), bei der Haupt-Hauptbodenart Ton traten VW-Überschreitungen nur bei **BDF 51** (Standort geogen vorbelastet) und Beprobung 1997 und 2007 (84 mg Cu (höchster Wert in Acker-BDF-Unterböden) bzw. 74 mg Cu) auf.

Bei Grünland-BDF-Oberböden traten leichte VW(Vorsorgewert)-Überschreitungen nur bei **BDF 132**, Hauptbodenart Lehm/Schluff und Beprobung 1997 und 2005 (40,4 bzw. 48,4 mg Cu kg⁻¹ Boden) auf.

Kupfergehalte in Böden der Sonderkultur-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

Weil Kupfer und Zink (zu Zink, siehe Kap. 2.3.3.7) wegen der fungiziden Wirkungen häufig als Pflanzenschutzmittel bei Sonderkulturen (Hopfen, Obst, Wein) eingesetzt werden (s. a. Kap. 3.4), werden die Kupfergehalte auf Sonderkultur-BDF hier gesondert dargestellt.

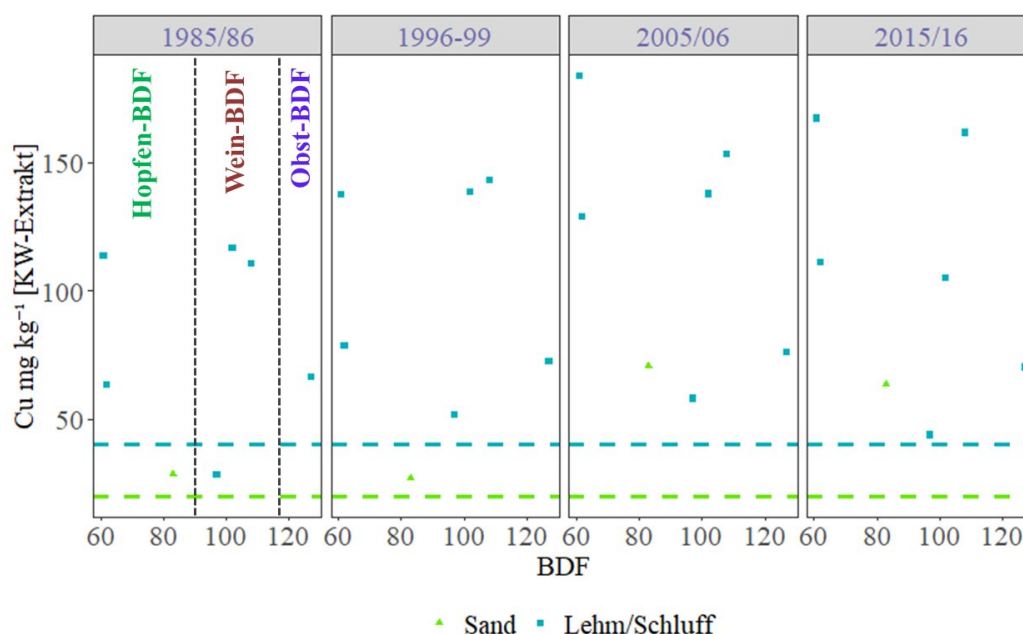


Abb. 26: Cu-Gehalte im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV (Einteilung in Hopfen-BDF links, Wein-BDF Mitte, Obst-BDF rechts bei Beprobung 1985/86 gilt analog auch für die übrigen Beprobungen).

Die Sonderkultur-BDF (Hopfen-, Obst- und Wein-Flächen) wiesen deutlich höhere Kupfergehalte im Boden als die Acker- und Grünland-BDF auf. Die Werte liegen fast durchwegs über den jeweiligen Vorsorgewerten wie Abb. 26 zeigt. Besonders hoch sind die Kupfergehalte bei **BDF 61** (einer Hopfenfläche mit bis 183,7 mg Cu, Beprobung 2006, aber auch bei Beprobung 2015: 167,3 mg Cu) und **BDF 108** (Weinparzelle bis 161,7 mg Cu kg⁻¹ Boden, Beprobung 2015) – beide BDF sind der Hauptbodenart Lehm/Schluff zuzuordnen.

Ein Überschreiten der Vorsorgewerte bei Kupfer, hieße für Acker- und Sonderkultur-Flächen, es muss untersucht werden, wie (pflanzen-)verfügbar Kupfer im Boden tatsächlich ist. Nach BBodSchV hat, wie in Kap. 2.3.5 beschrieben, die Bestimmung des verfügbaren Kupfers im Ammoniumnitratextrakt des Bodens zu erfolgen. Sind die Gehalte an pflanzenverfügbarem Cu im Boden über dem Prüfwert im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen (s. a. Kap. 2.3.1) und liegen weitere Hinweise vor, dass durch zu hohe verfügbare Kupfergehalte im Boden tatsächlich von Wachstumsbeeinträchtigungen auszugehen ist, läge ein Fall einer schädlichen Bodenveränderung vor.

Für Grünlandflächen aber existieren in der BBodSchV, derartige Prüf- oder Maßnahmenwerte pflanzenverfügbarer Gehalte (Ammoniumnitratextrakt des Bodens) nicht. Jedoch sind dort Maßnahmenwerte im Hinblick auf die Pflanzenqualität (Gesamtgehalte im Königswasserextrakt des Bodens) festgelegt worden (BBodSchV, 1999) (s. a. Kap. 2.3.1). Werden Maßnahmenwerte überschritten wäre eine schädliche Bodenveränderung bestätigt und wären sogar konkrete Maßnahmen erforderlich. Bei Kupfer liegt dieser Maßnahmenwert aber erst bei 1.300 mg kg^{-1} (bei der Nutzung des Grünlands durch Schafe gilt ein strengerer Maßnahmenwert von 200 mg kg^{-1}) und damit deutlich über den Vorsorgewerten (s. Kap. 2.3.1) oder den auf Sonderkultur-BDF gemessenen Gesamtgehalten.

Die Ursache der hohen Kupfergehalte in den Oberböden der Sonderkultur-BDF sind häufige Kupferspritzungen zur Bekämpfung von Pilzerkrankungen auf den 3 Hopfen-, 3 Wein- und der einen Obst-BDF. Besonders hoch sind die Kupferspritzungen im Hopfenanbau und etwas niedriger im Weinbau, wohingegen bei Obst weit weniger Kupfer gespritzt wird (s. Kap. 3.4), was die insgesamt niedrigeren Cu-Gehalte auf der Obst-BDF bestätigen. Die Kupferspritzungen (Anwendung als Pflanzenschutzmittel) erfolgten zum jeweiligen Zeitpunkt sachgemäß im Sinne des jeweils gültigen Pflanzenschutzmittelgesetzes. Wurde zu Beginn des Beobachtungszeitraums noch häufiger und in größerer Menge mit Kupferpräparaten gespritzt, sind die Applikationsmengen in den letzten Jahren stark zurückgegangen wie Abb. 127 zeigt. Trotzdem bleiben die Kupfergehalte auf Sonderkulturflächen hoch und akkumuliert sich Kupfer dort in den Böden. Der Grund dafür ist, dass weit weniger an Kupfer dem Boden mit der Ernte entzogen wird (laut gelbem Heft betragen die Ernteentzüge für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen zwischen $30\text{-}200 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Wendland, 2018)), als durch Kupferspritzungen an Cu appliziert wird (selbst bei den derzeit viel geringeren Spritzmengen - im Hopfenbau erlaubt sind derzeit $4,0 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, im Ökolandbau üblich sind sogar nur $2\text{-}3 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Damit ist häufig nur ein Nachbau der jeweiligen Sonderkulturen möglich. Eine negative Beeinflussung der Pflanzenqualität bei Sonderkulturen, lässt sich aus den hohen Kupfergehalten im Boden allerdings nicht ableiten. Weil Sonderkulturen als Dauerkulturen betrieben werden und auf Kupfer als Fungizid derzeit noch nicht vollständig verzichtet werden kann, ist bei Sonderkulturen auch in Zukunft mit Kupfereinträgen in den Boden zu rechnen.

Entwicklung der Kupfergehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

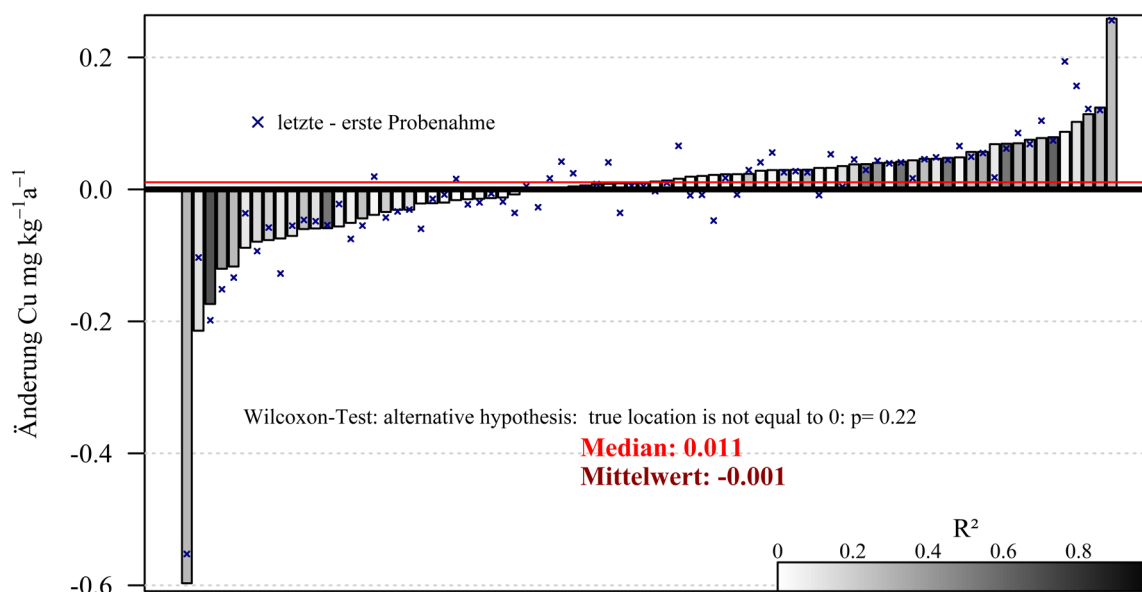


Abb. 27: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg⁻¹ a⁻¹; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 12: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Cu-Abnahme	Cu-Zunahme
Änderung absolut	35 (44%)	45 (56%)
Trend	30 (38%)	50 (62%)
davon mit R ² > 0,3	3	8
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	1	8

Auch für die Kupfer-Gehalte in den Oberböden der 80 Acker-BDF waren keine gerichteten Veränderungen nachzuweisen (Wilcoxon-Test p-Wert: 0,22). Im Mittel änderten sich die Kupfergehalte im Beobachtungszeitraum um 0,011 mg kg⁻¹ a⁻¹. Über die Dauer von 30 Jahre ergeben sich rechnerisch Veränderungen von 0,33 mg kg⁻¹, relativ zum Mittelwert lag diese Veränderung bei bis zu 52 %. Auf elf Acker BDF lag das Bestimmtheitsmaß für die angepasste lineare Regression über 0,3, hierbei überwogen die Zunahmen. Die größeren Zunahmen und Abnahmen waren in der Regel nur schlecht durch die lineare Regression erklärbar, die Abweichungen innerhalb der Probenahmeterminen entsprechend hoch.

Eine deutliche Abnahme von 0,17 mg kg⁻¹ a⁻¹ war wiederum auf der **BDF 46** festzustellen (wie auch für Cadmium, Kupfer, Nickel). Die stärkste Zunahme mit einem R² größer 0,3 war bei der **BDF 75** festzustellen. Hier stiegen die Gehalte relativ kontinuierlich um 0,01 mg kg⁻¹ a⁻¹ von 10,6 mg kg⁻¹ im Jahr 1986 auf 12,8 mg kg⁻¹ im Jahr 2016 an.

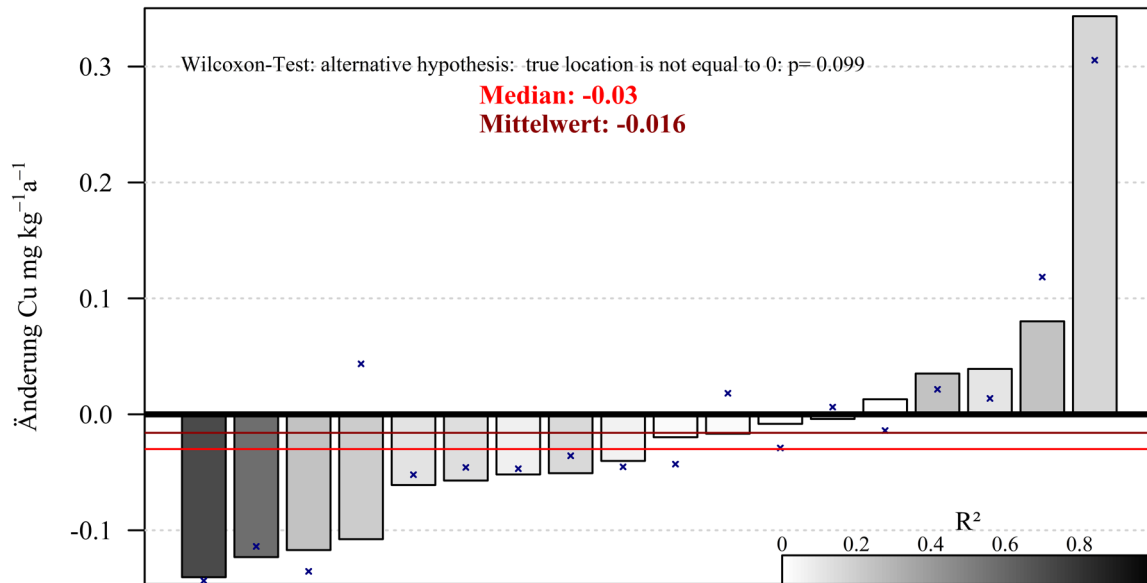


Abb. 28: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.

Tab. 13: Entwicklung der Cu-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Cu-Abnahme	Cu-Zunahme
Änderung absolut	11 (61%)	7 (39%)
Trend	13 (72%)	5 (28%)
davon mit $R^2 > 0,3$	2	0

Die Änderung der Kupfer-Gehalte in den Oberböden der 18 Grünland-BDF um im Mittel $-0,016 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$, liegt etwas über den für Acker-BDF festgestellten Werten. Über die Dauer von 30 Jahren ergibt sich rechnerisch daraus eine ausgeprägtere Abnahme von 2 % im Verhältnis zum Mittelwert. Die stärkste Änderung entsprach 26 % des Mittelwertes. Eine deutlich gerichtete Änderung der Cu-Gehalte auf bayerischem Grünland ist nicht abzuleiten, da den 13 Abnahmen auch 5 Zunahmen gegenüberstanden, wobei die stärkste Veränderung eine Zunahme war. Die Erklärungskraft der linearen Regressionen war allerdings nur auf zwei BDF höher ($R^2 > 0,3$).

Deutliche Änderungen ergaben sich für die **BDF 44**, auf der die Kupfer-Gehalte von 24 mg kg^{-1} 1986 auf 21 mg kg^{-1} 2015 zurückgingen.

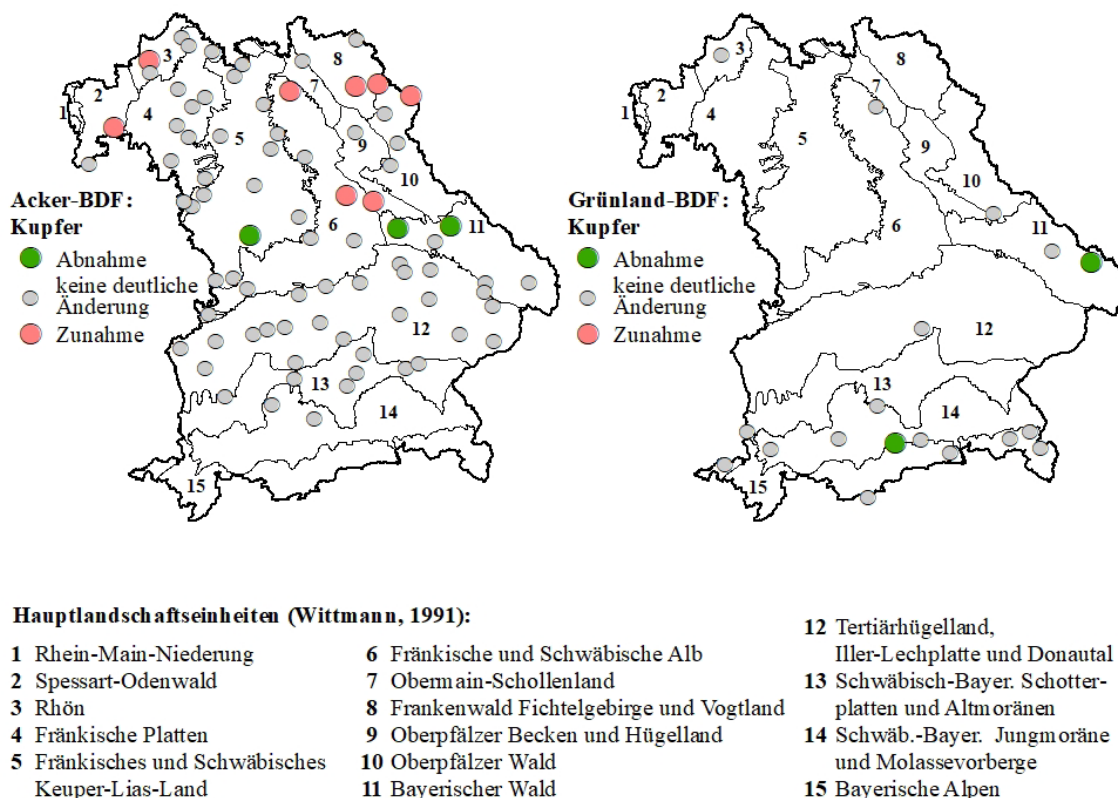


Abb. 29: Veränderung der Cu-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot= $Trend > 0$ & $R^2 > 0.3$, grün= $Trend < 0$ & $R^2 > 0.3$, grau= $R^2 < 0.3$.

Bei der überwiegenden Anzahl der Acker- und Grünland-BDF haben sich die Kupfergehalte im Oberboden über den Beobachtungszeitraum nur wenig verändert. Nur bei 2 BDF (**BDF 36** und **BDF 44**; Lage: Voralpenland bzw. bayr. Wald) konnte im Grünland eine leichte Abnahme für Kupfer im Oberboden ($-0,14$ bzw. $-0,12$ mg Cu kg⁻¹a⁻¹) festgestellt werden. Bei den Acker-BDF standen 3 Abnahmen, 8 Zunahmen für Kupfer in Oberböden, ausschließlich in Nordbayern, gegenüber. Jedoch nahmen bei den Acker-BDF **56** und **BDF 46** die Kupfergehalte im linearen Trend mit $-0,12$ bzw. $-0,17$ mg Cu kg⁻¹a⁻¹ sehr viel deutlicher ab als bei den 8 Acker-BDF mit Gehaltszunahmen im Oberboden (zwischen $+0,038$ mg bei **BDF 100** und $+0,079$ mg Cu kg⁻¹ pro Jahr bei **BDF 75**). Bodenausgangsgesteine des Grundgebirges führen in der Regel zu höheren Kupfergehalten in Böden, aber auch bei niedrigeren Kupfergehalten in Böden mit kalkhaltigem Bodenausgangsgestein, kann die Kalk-Verwitterung zu Zunahmen der Oberbodengehalte an Cu geführt haben.

2.3.3.5 Nickel (Ni)

Kurzsteckbrief Nickel [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg^{-1}]:

Schwermetall der 10. Nebengruppe des Periodensystems, das in natürlichen Böden als Spurenelement auftritt (u.a. in Serpentinböden mit Gehalten bis zu 7000(\varnothing 2000)). Ökotoxisch, über ein nützliches Potenzial für Tiere wird diskutiert.

Typische Gehalte im Boden: 2-50.

Nickel kann Oxidationsstufen von -1 bis +4 einnehmen. In der Natur spielen aber nur die Oxidationsstufen 0 und +2 eine Rolle.

Die wichtigsten Ni-Speicher im Boden sind Silikate und Eisenoxide, in denen Ni Fe-Ionen isomorph ersetzen kann. Es erfolgt eine adsorptive Bindung des Nickels an Al-, Fe- und Mn-Oxide sowie an Tonminerale (häufig sogar irreversible Fixierung). Als Baustein organischer Komplexe (Chelate) im Boden ist Nickel mobil. So vermag gelöste organische Substanz trotz der geringen Stabilität von Organo-Ni-Komplexen Ni zu mobilisieren, wenn sie in hoher Konzentration (20-50 mg gelöster organischer C) in der Bodenlösung auftritt. Auch unter reduzierenden Bedingungen wurde ein Anstieg der Ni-Konzentrationen in der Bodenlösung beobachtet. In Unterböden wird Nickel weniger stark festgelegt als in Oberböden. Die geogenen Ni-Gehalte steigen in der Regel mit zunehmender Bodentiefe an, während anthropogen eingetragenes Ni überwiegend im Oberboden akkumuliert.

Nachdem eine Reihe von für höhere Pflanzen lebenswichtige Funktionen von Ni bekannt geworden sind, wird Ni inzwischen zu den essenziellen Mikronährstoffen gezählt. In der Pflanze gehört Ni zu den mobilen Elementen, die relativ leicht im Xylem und Phloem transportiert werden können. Andererseits reagieren sensitive Pflanzen bereits bei sehr geringen Nickelbelastungen ($> 10 \text{ mg kg}^{-1}$) mit Schadsymptomen, wohingegen mäßig Ni-tolerante Pflanzen erst ab 50 mg Ni kg^{-1} im Pflanzengewebe Toxizitätserscheinungen zeigen.

Nickel findet Verwendung als Legierungsbestandteil von rostfreiem Stahl. Andere Einsatzgebiete sind Oberflächenbeschichtungen, Batterien, elektronische Bauteile und Katalysatoren.

Eintragsquellen: atmosphärische Deposition aus Verbrennungsprozessen (Öl, Kohle), Klärschlämme sowie aus metallverarbeitenden Betrieben.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: niedrige Boden-pH-Werte (v.a. bei $\text{pH} \leq 5,5$) und durch reduzierendes Boden-Milieu.

Typisch in Pflanzen 0,1-5(10), toxisch für Pflanzen: 20-30, Transferfaktor: 0,1-1.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 70/50/15 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Scheffer, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

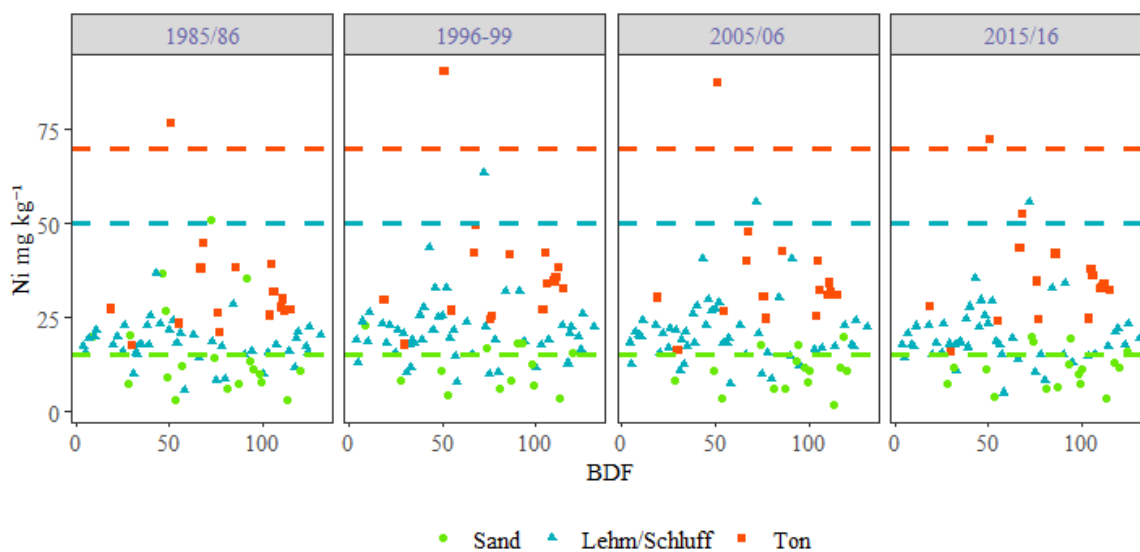
Nickelgehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

Abb. 30: Ni-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

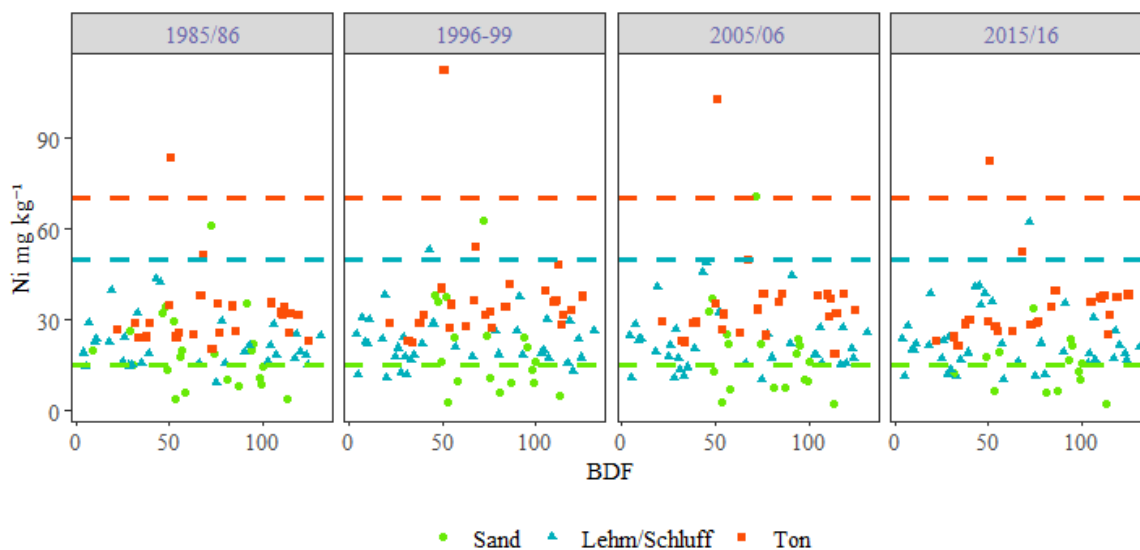


Abb. 31: Ni-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

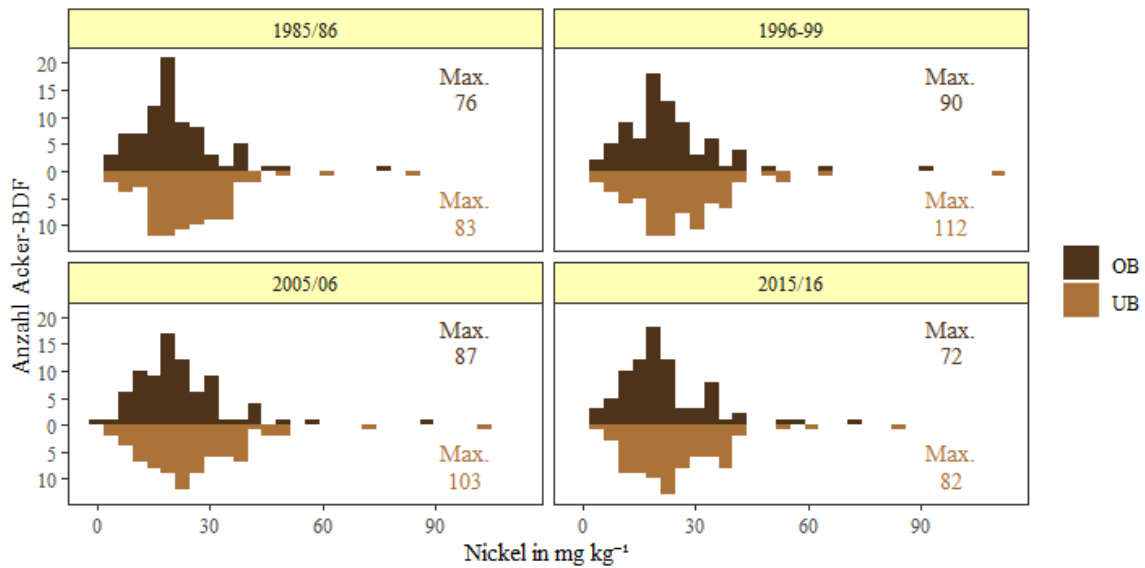


Abb. 32: Verteilung der Ni-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

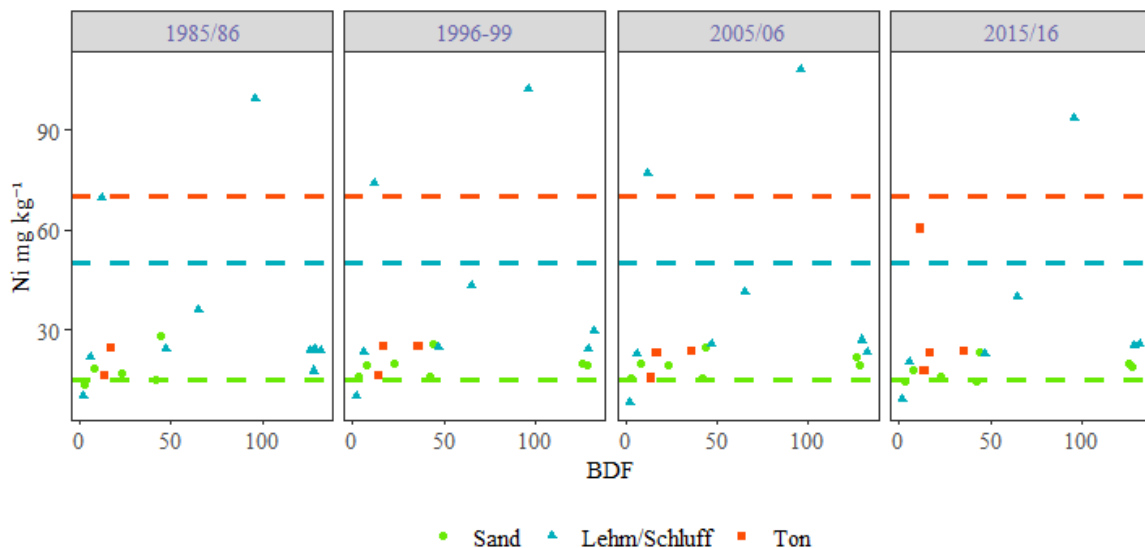


Abb. 33: Ni-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

Die mittleren Nickelgehalte in landwirtschaftlich genutzten BDF Bayerns sind niedrig und liegen fast durchwegs unter 50 mg kg⁻¹, dem Vorsorgewert der BBodSchV für die Hauptbodenart Lehm/Schluff. Wenige, aber leichte VW-Überschreitungen sind aus den Abb. 30, Abb. 31 und Abb. 33 abzulesen, häufiger jedoch treten diese bei Sandböden auf - dort gilt auch ein strengerer Vorsorgewert. Bei Nickel ist wie bei Pb, Cd und Zn ein tiefer pH-Wert für die Anwendung der Vorsorgewerte bzw. Einstufung in die jeweilige Hauptbodenart zu berücksichtigen (s. a. Kap. 2.3.1 und Kap. 4.3 in Anh. 2 der BBodSchV).

Bei Acker-BDF-Oberböden der Hauptbodenart Sand wird der Vorsorgewert bei 14 BDF überschritten (höchste Werte (> 20 mg Ni) bei Erstbeprobung 1988 und **BDF 72**: 51 mg Ni, **BDF 46** 1986: 36,5 mg Ni, **BDF 91** 1986: 35,6 mg Ni, **BDF 48** 1986: 26,9 mg Ni, **BDF 9**,

Beprobung 1998: 23,1 mg Ni und, **BDF 29** 1986: 20,2 mg Ni kg⁻¹ Boden. Bei 17 der 18 Oberboden-Untersuchungen wäre der Boden eigentlich der Hauptbodenart Lehm/Schluff zuzuordnen, wegen des pH-Wertes unter pH 6 aber sind diese Böden als Sande zu bewerten (s. Anh. 2, Kap. 4.3 BBodSchV).

Bei der Hauptbodenart Lehm/Schluff wurde nur bei einer BDF eine VW-Überschreitung festgestellt, **BDF 72** (einem geogen vorbelasteten Standort) 1998: 63,3 mg Ni, 2006: 55,6 mg Ni und 2016: 55,8 mg Ni kg⁻¹ Boden, der OB dieser BDF war bei Erstbeprobung wg. eines pH-Wertes < 6 als Sand eingestuft worden (s. oben). Bei der Hauptbodenart Ton wird der Vorsorgewert nur bei **BDF 51** (ebenfalls ein geogen vorbelasteter Standort – Residualton in der fränkischen Alb) jedoch bei allen Beprobungsserien überschritten (1987: 76,5 mg Ni, 1997: 90,2 mg Ni (= höchster Oberbodenwert bei den Acker-BDF!), 2007: 87,4 mg Ni und 2016: 72,4 mg Ni kg⁻¹ Boden).

Bei den Unterböden der Acker-BDF und Hauptbodenart Sand zeigten 40 (von 72) Unterböden und 16 BDF VW-Überschreitungen. Höchste Werte bei **BDF 72** (geogene Vorbelastung), 2006: 70,9 mg Ni, 1998: 62,9 mg Ni und Ersterhebung: 60,9 mg Ni, **BDF 46**, 1996: 37,8 mg Ni und **BDF 52**, 1997: 37,3 mg Ni kg⁻¹ Boden. In 34 der 40 Fälle wäre der Boden als Lehm/Schluff einzustufen, wegen pH < 6 aber Zuordnung zur Hauptbodenart Sand. Bei der Hauptbodenart Lehm/Schluff wurden 2 VW-Überschreitungen festgestellt: **BDF 72**, 2016: 62 mg Ni und **BDF 43**, 1996: 53,1 mg Ni kg⁻¹ Boden. Bei der Hauptbodenart Ton traten 4 VW-Überschreitungen aber ausschließlich bei **BDF 51** (geogene Vorbelastung), dafür über alle Beprobungsserien: 1986: 83,3 mg Ni, 1997: 112,2 mg Ni (höchster Unterbodenwert bei den Acker BDF!), 2007: 102,7 mg Ni und 2016: 82,4 mg Ni kg⁻¹ Boden, auf. Bei geogen vorbelasteten Standorten (z.B. **BDF 51** und **BDF 72**) lagen die Ni-Gehalte nicht nur im Ober- sondern auch im Unterboden hoch und teilweise auch über den jeweils geltenden Vorsorgewerten.

Im Mittel sind bei den Acker-BDF die Nickelgehalte in den Unterböden höher als die Nickelgehalte in den Oberböden wie Tab. 14 zeigt.

Tab. 14: Mittlere Nickelgehalte in Ober- und Unterböden der Acker-BDF in mg kg⁻¹.

Beprobungszeitpunkt	Oberböden	Unterböden
1985/86	20,6	24,5
1996-99	23,1	26,5
2005/06	22,0	25,6
2015/16	21,4	24,9

Bei den Oberböden der Grünland-BDF wurde für die Hauptbodenart Sand bei 7 BDF eine VW-Überschreitung festgestellt. Jedoch handelte es sich immer um Lehm/Schluff-Böden, die nur aufgrund pH < 6 nach Hauptbodenart Sand eingestuft wurden. Höchster Wert bei **BDF 44**, Erstbeprobung 1986: 28 mg Ni kg⁻¹ Boden. Bei der Hauptbodenart Lehm/Schluff wurden in 7 Fällen aber nur bei **BDF 96** (1986: 99 mg Ni, 1996: 102 mg Ni, 2005: 108 mg Ni (= höchster Ni-Wert im Oberboden der Grünland-BDF!) und 2015: 93,6 mg Ni) und **BDF 12** (1986: 69 mg Ni, 1996: 73,8 mg Ni und 2005: 77,1 mg Ni) die Vorsorgewerte überschritten. Anmerkung: eigentlich handelt es sich in beiden Fällen (BDF 96 und BDF 12) ursprünglich um Tonböden, die nur wegen des pH-Wertes < pH 6 als Lehm/Schluff

eingestuft werden müssen (s. Anmerkungen in Anh. 2, Kap. 4.3 BBodSchV (BBodSchV, 1999)).

Bei der Hauptbodenart Ton trat hingegen keine VW-Überschreitung auf.

Entwicklung der Nickelgehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

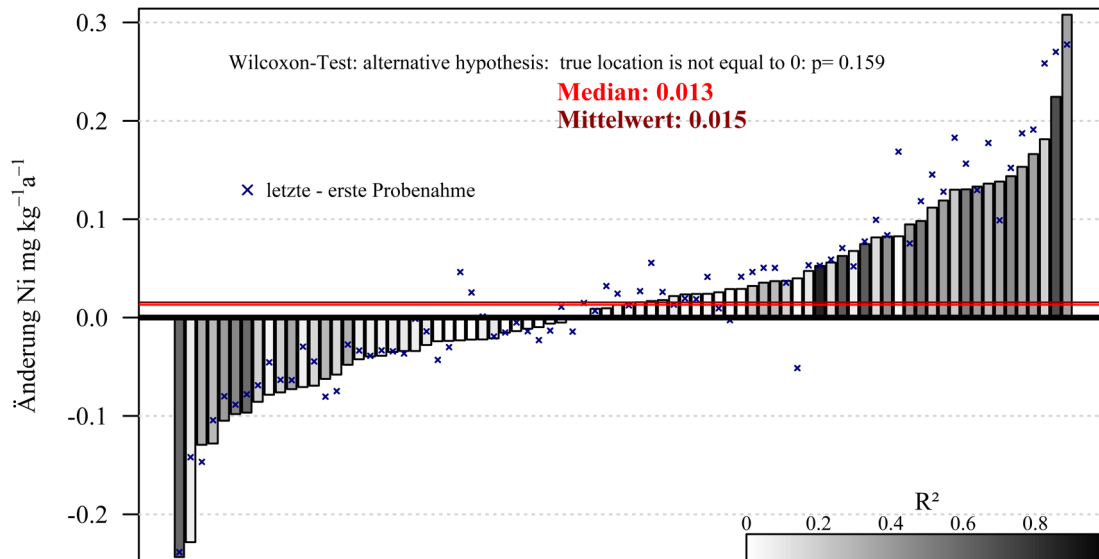


Abb. 34: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert–Anfangswert an.

Tab. 15: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Ni-Abnahme	Ni-Zunahme
Änderung absolut	34 (43%)	46 (57%)
Trend	36 (45%)	44 (55%)
davon mit $R^2 > 0,3$	7	15
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	4	13

Die Nickelgehalte nahmen im Mittel für die 80 Oberböden der Acker BDF um $0,013 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ zu. Dies entspricht rein rechnerisch einer Zunahme von $0,39 \text{ mg kg}^{-1}$ in 30 Jahren. Ähnlich wie bei den übrigen Gehaltswerten lag die Änderungen innerhalb von 30 Jahren im Vergleich zum Mittelwert bei maximal 33%. Allerdings ergab sich aus der Verteilung der berechneten Trends keine nachweisbare gerichtete Verteilung der Änderungen (Wilcoxon-Test p-Wert: 0,159). Für 22 BDF wurde ein Bestimmtheitsmaß größer 0,3 ermittelt, bei diesen Flächen überwogen leicht die Zunahmen.

Wie bereits erwähnt wurde die größte Abnahme der Nickelgehalte auf der **BDF 46** festgestellt ($0,24 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$). Eine deutliche Zunahme um $0,30 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ zeichnete die **BDF 76** im Landkreis Ansbach aus. Hier stieg der Gehalt von im Mittel 26 mg kg^{-1} im Jahr 1986 auf $34,6 \text{ mg kg}^{-1}$ 2016.

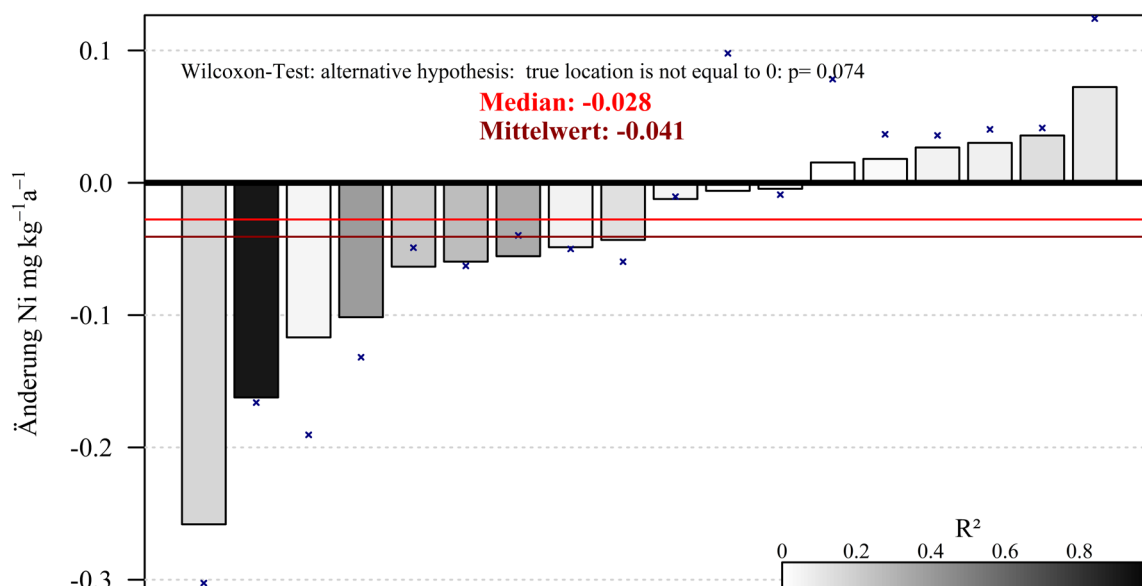


Abb. 35: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 16: Entwicklung der Ni-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Ni-Abnahme	Ni-Zunahme
Änderung absolut	11 (61%)	7 (39%)
Trend	12 (67%)	6 (33%)
davon mit $R^2 > 0,3$	3	0

In den Oberböden der 18 Grünland-BDF haben sich die Nickelgehalte im Beobachtungszeitraum um im Mittel $-0,041 \text{ mg Ni kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ verändert. Eine Verschiebung der Änderung hin zu den mehr und größeren Abnahmen war nur als Tendenz zu beobachten (Wilcoxon-Test, p-Wert = 0,074). Über die Dauer des Beobachtungszeitraums (≥ 30 Jahre) ergeben sich rechnerisch entsprechend Veränderungen von bis zu 19 % im Verhältnis zum Mittelwert.

Die stärkste Abnahme mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,3 wurde auf der **BDF 44** im Landkreis Freyung-Grafenau festgestellt bei der auch die Kupfer-Gehalte deutlich zurückgegangen waren. Der Nickelgehalt im Oberboden ging hier von 28 mg kg^{-1} 1986 auf 23 mg kg^{-1} 2015 zurück. Durch den linearen Trend gut erklärbare Zunahmen ($R^2 > 0,3$) waren für die Nickelgehalte auf Grünland-BDF nicht festzustellen.

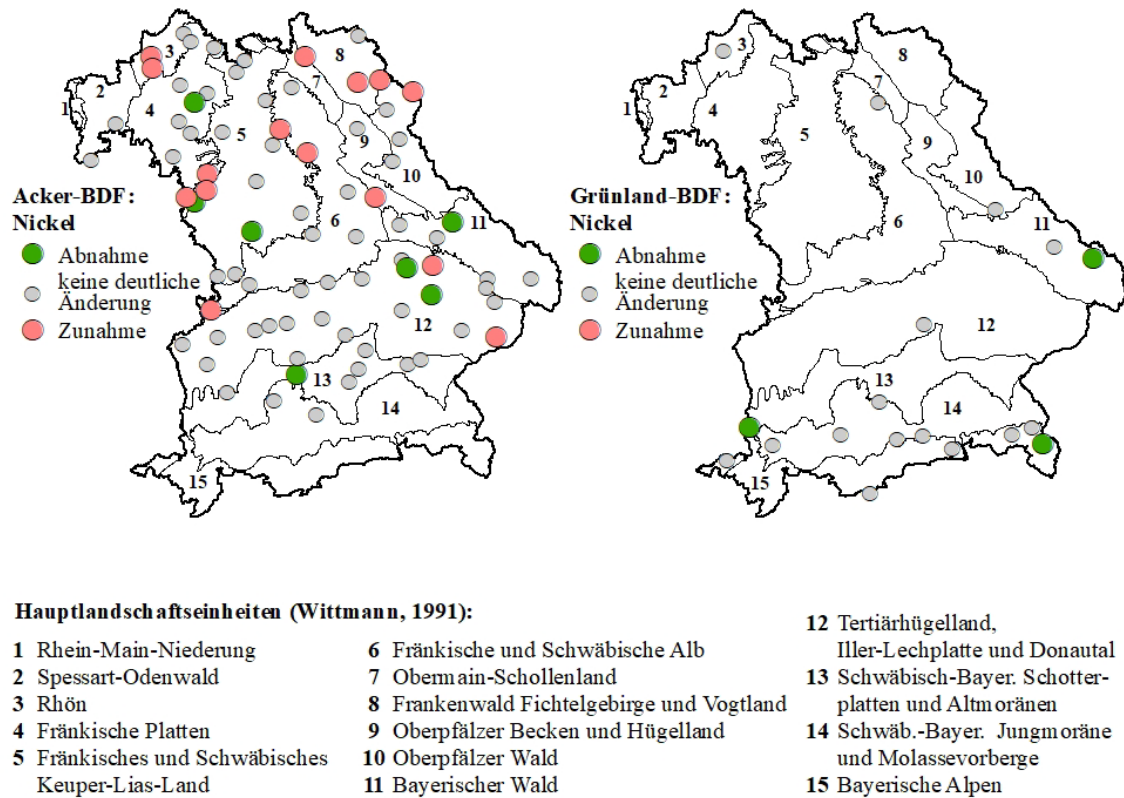


Abb. 36: Veränderung der Ni-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot= $Trend > 0$ & $R^2 > 0.3$, grün= $Trend < 0$ & $R^2 > 0.3$, grau= $R^2 < 0.3$.

Bei den meisten BDF haben sich die Nickelgehalte im Oberboden seit 1985 nur wenig verändert. Bei 2 Grünland-BDF im Alpenraum und 1 Grünland BDF im bayerischen Wald haben die Gehalte um $-0,06$ bis $-0,16 \text{ mg Ni kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ abgenommen.

Bei Acker-BDF zeigten 7 BDF Abnahmen und 15 BDF Zunahmen. Räumlich lagen diese Acker-BDF alle nördlich des Alpenlands, dort aber verteilt auf verschiedene Landschaftseinheiten.

2.3.3.6 Quecksilber (Hg)

Kurzsteckbrief Quecksilber [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Bei Raumtemperatur flüssiges Schwermetall der 2. Nebengruppe des Periodensystems der chemischen Elemente.

Typische Gehalte im Boden: 0,05-0,5 (Ø≤0,1).

Elementar und in den Oxidationsstufen +1 und +2 auftretend, wobei zweiwertigen Hg-Verbindungen quantitativ die weitaus bedeutendere Rolle zukommt. In Oxidationsstufe +1 in anorg. Verbindungen nur in Doppelmolekülen vorkommend. In wässriger Lösung disproportioniert Hg₂²⁺ leicht zu Hg⁺ und Hg⁰.

Quecksilber weist einen relativ hohen Dampfdruck auf (Möglichkeit zur Ausgasung in die Bodenluft!). In unterschiedlichem Maße zeichnet viele Verbindungen des Quecksilbers eine gewisse Flüchtigkeit aus. Eine besondere Rolle kommt der Methylierung von anorg. Hg zu Methyl-Hg besitzt ein höheres (öko)toxikologisches Potenzial, es wird in Böden aber schwächer adsorbiert und ist mobiler als anorganisches Hg. Wenn die Methylierung bis zum Dimethyl-Hg führt (z.B. durch methanogene und sulfatreduzierende Bakterien), einer hochflüchtigen Verbindung, kann dies andererseits zur Elimination von Hg aus dem Boden beitragen. Im Boden ist Hg stark an Austausch (v.a. die org. Substanz) adsorbiert, daher Anreicherung in den oberen Horizonten. Es weist auch starke Affinität zu Tonmineralen und Sesquioxiden auf. In normalen Böden immobil und wenig pflanzenverfügbar, bei niedrigen pH-Werten (<pH 4) aber auch im Alkalischen (Bildung löslicher Hydroxokomplexe) kann Hg mobilisiert werden. Die Retention anorganischer Hg-Verbindungen in organischen und mineralischen Oberbodenhorizonten führt dazu, dass die Hg-Gehalte im Unterboden in der Regel deutlich geringer als im Oberboden sind (Ausnahme hydromorphe Böden). Wegen der über einen weiten pH-Bereich starken Fixierung von Hg in Böden sind die mit der Bodenlösung verlagerten Mengen üblicherweise gering. Aus sauren Oberböden mobilisiertes Hg und Methyl-Hg wird aufgrund des steigenden pH im Unterboden meist wieder immobilisiert, der Austrag von Hg-Verbindungen über die Lösungsphase aus Unterbodenhorizonten ist daher gering.

Verwendung: Gewinnung von Metallen (z.B. Gold durch Legierung/Amalgamierung), anorg. Hg als Elektrodenmaterial in der Chloralkalielektrolyse, als Thermometer- und Manometerflüssigkeit, als Initialzündler, als Depolarisator in Batterien, als Zahnfüllungsmaterial, in Leuchtstoffröhrenfüllungen, Imprägniermitteln für Holzprodukte; ferner Anwendung als Katalysator zur Synthese von Urethanen und Vinylacetat; organ. Quecksilberverbindungen wird wegen der bioziden Wirkung zur Saatgutbeizung, als Antiseptika, Fungizid, Algizid, Germizid und zur Konservierung pharmazeutischer sowie kosmetischer Produkte verwendet.

Eintragsquellen: natürliche Ursachen „geogen“, Hg-reiche Gesteine und Böden, auch elementar vorkommend, bei Vulkanemissionen, anthropogen durch Emissionen aus Verbrennungsprozessen (Kraftwerken zur Verbrennung fossiler Energieträger, Müllverbrennung, bei der Zementherstellung), Hg-haltige Fungizide (Weinbau, Reis) – bis 1970 Quecksilber-(II)-chlorid als Holzschutzmittel für Zaunpfähle, Hopfenstangen, Rebpfähle; in Klärschlämmen, Abfällen, Altlasten (z.B. Spiegelmanufakturen), Bergbau.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: niedrige Boden-pH-Werte ($\text{pH} \leq 4$).

Wurzeln höherer Pflanzen scheinen als effektive Barriere für ion., anorg. Hg zu fungieren. Auf kontaminierten Standorten zwar deutlich erhöhte Hg-Gehalte im Wurzelgewebe, Translokation über den Wurzelpfad in oberirdische Pflanzenorgane jedoch gering, da Hg-Ionen stark an äußeren Zellwänden und Zellmembranen des Wurzelgewebes gebunden sind. Im Gegensatz dazu kann physik. in der Bodenlösung gelöstes elementares Hg mit dem Transpirationsstrom höherer Pflanzen in oberirdische Pflanzenteile transportiert werden. Allerdings werden davon nur geringe Mengen in der Biomasse akkumuliert; der überwiegende Teil wird in die Atmosphäre emittiert (Aufnahme von Hg-Verbindungen aus der Gasphase möglich). Kritische Hg-Gehalte in oberirdischer Biomasse daher nur selten erreicht. Organische Quecksilberverbindungen werden jedoch in stärkerem Maße als anorganisches Hg in oberirdische Pflanzenorgane verlagert.

Typisch in Pflanzen 0,05-0,5, toxischer Grenzwert für Pflanzen: 0,5-1, Transferfaktor: 0,01-0,1.

Lösliche anorganische Hg-Salze weisen eine große, akute Humantoxizität auf.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 1/0,5/0,1 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln:

Höchstgehalt in mg kg^{-1} (ppm), bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (FuttMV, 2002/32/EG Anh. 1 - konsolid. Text v. 28.11.2019) für Futtermittel-Ausgangserzeugnisse: 0,1.

(Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

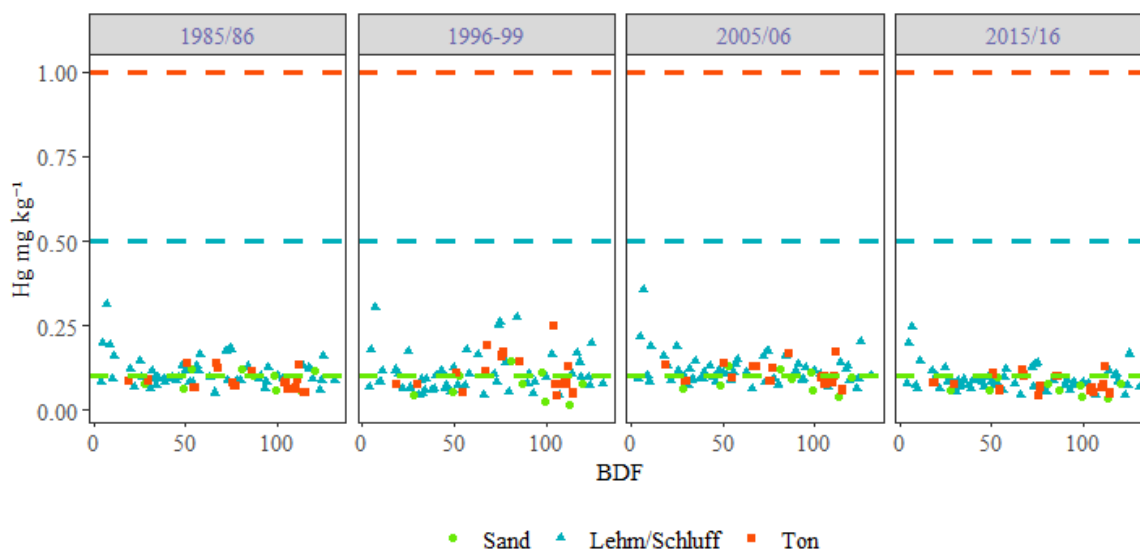
Quecksilbergehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

Abb. 37: Hg-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

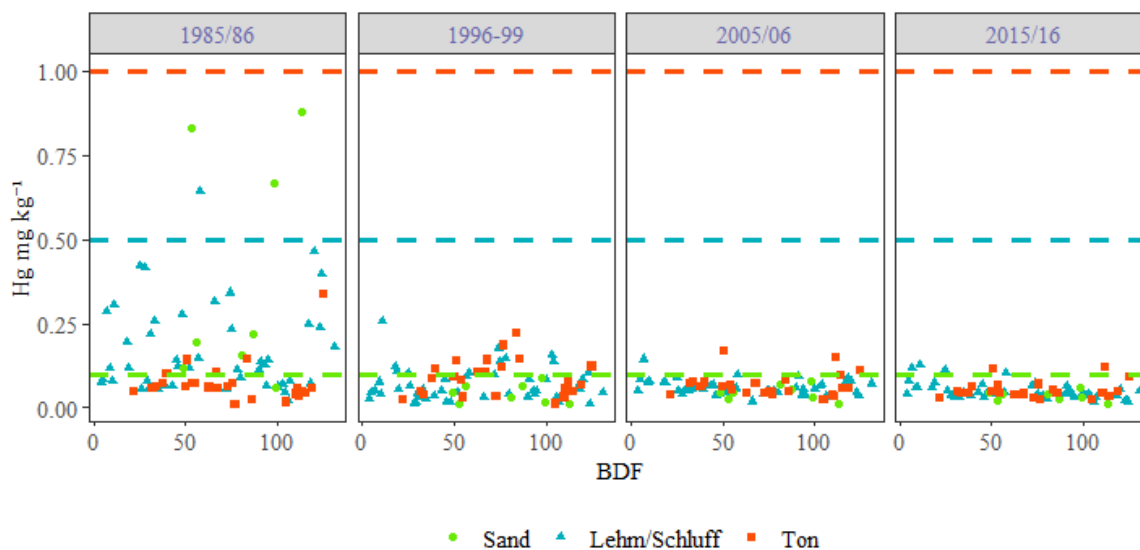


Abb. 38: Hg-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

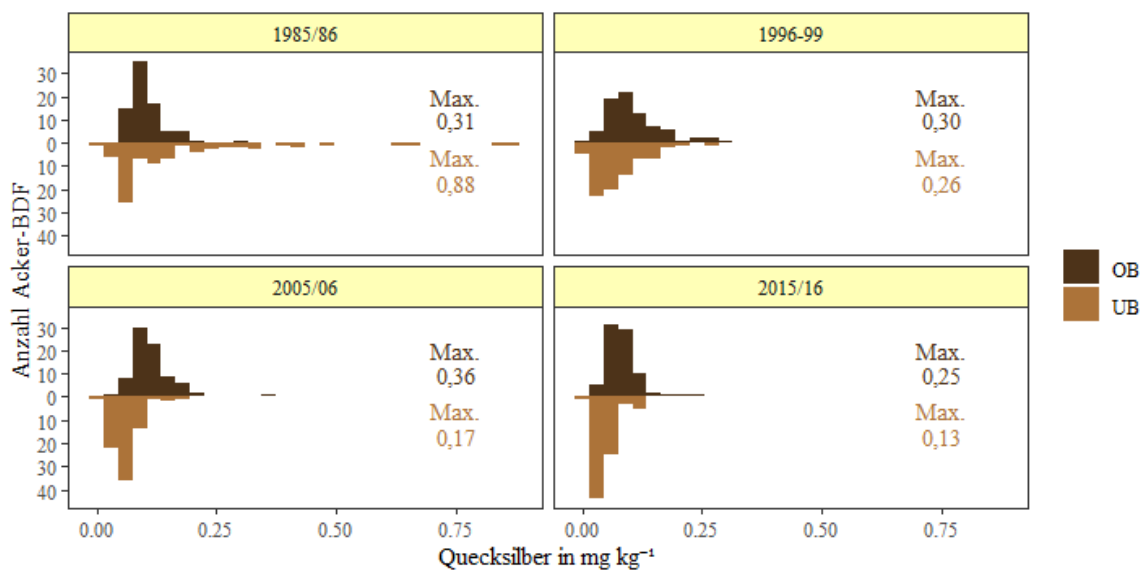


Abb. 39: Verteilung der Hg-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt.)

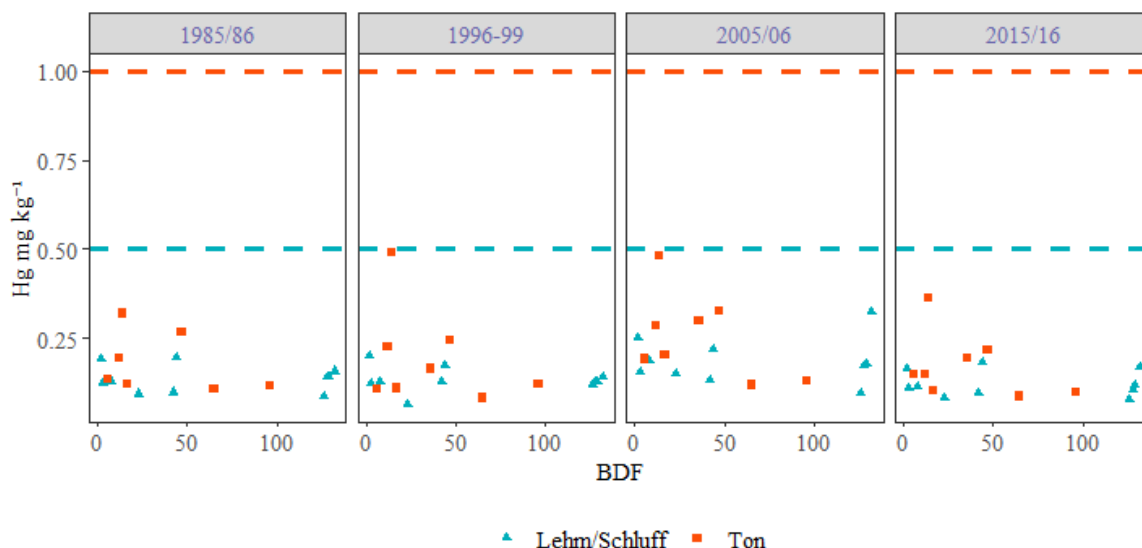


Abb. 40: Hg-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

In den landwirtschaftlich genutzten BDF Bayerns sind die mittleren Quecksilbergehalte überwiegend sehr niedrig und liegen fast durchwegs unter den Vorsorgewerten (VW) der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (s. Abb. 37, Abb. 38, Abb. 39 und Abb. 40).

Für die Hauptbodenart Sand wird der Vorsorgewert bei den Acker-BDF-Oberböden bei 4 BDF (**BDF 53, 81, 98 und 120**) und 10 Untersuchungen, allerdings nur leicht überschritten (höchste Werte bei **BDF 81**, Beprobung 1996: 0,145 mg Hg, **BDF 53**, Beprobung 2007: 0,132 mg Hg und **BDF 81**, Erstbeprobung 1986: 0,123 mg Hg). Für die Hauptbodenarten Ton und Lehm/Schluff traten im Beobachtungszeitraum keine VW-Überschreitungen auf.

Bei den Unterböden der Acker-BDF traten für die Hauptbodenart Sand bei 7 BDF (nur bei der Erstaufnahme 1986) VW-Überschreitungen auf (höchste Werte: **BDF 113**: 0,879 mg

Hg, **BDF 53**: 0,829 mg Hg, **BDF 98**: 0,664 mg Hg und **BDF 87**: 0,218 mg Hg). Für die Hauptbodenart Lehm/Schluff trat nur bei **BDF 58** (Erstbeprobung 1986) eine leichte VW-Überschreitung im Unterboden auf (0,644 mg Hg kg⁻¹ TM Boden). Für die Hauptbodenart Ton jedoch trat im Beobachtungszeitraum keine VW-Überschreitung auf.

Wie Abb. 39 zeigt, sind die Quecksilbergehalte in den Unterböden der Acker-BDF im Allgemeinen etwas niedriger als in den Oberböden. Das Mittel über alle Beprobungsserien bestätigt dies (s. Tab. 4).

Dies würde belegen, dass Quecksilber häufig nicht geogene Ursachen hat, sondern atmosphärisch in Böden eingetragen wird.

Bei den Oberböden der Grünland-BDF traten im Beobachtungszeitraum keine VW-Überschreitungen für Hg auf.

Entwicklung der Quecksilbergehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

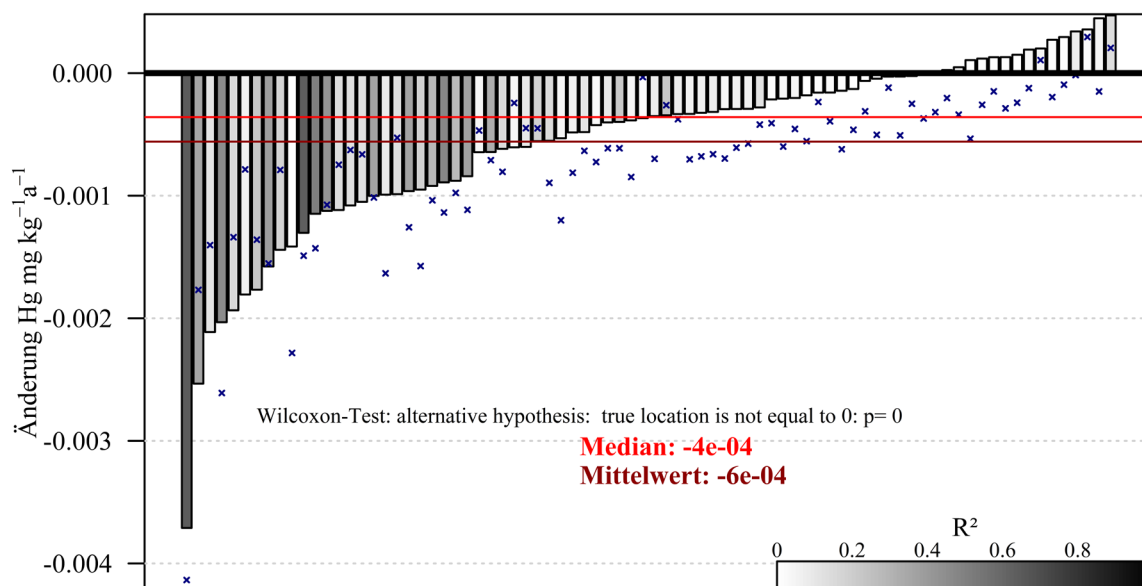


Abb. 41: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in mg kg⁻¹ a⁻¹; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R²) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 17: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Hg-Abnahme	Hg-Zunahme
Änderung absolut	77 (96%)	3 (4%)
Trend	65 (81%)	15 (19%)
davon mit R ² > 0,3	12	0
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	8	0

Die Quecksilbergehalte in den Oberböden der 80 Acker-BDF haben sich im Beobachtungszeitraum in der Mehrzahl verringert. 80 % der Acker BDF zeigten diesen positiven Trend. Die Verteilung der Trends war höchstsignifikant von Null verschoben. Zunahmen mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,3 traten nicht auf. Im Mittel und Median nahm der Quecksilber-

Gehalt um $-0,0006$ bzw. $-0,0004 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ab. Die Quecksilbergehalte im Boden sind von allen untersuchten anorganischen Schadstoffen am geringsten. Die Änderungen im Verhältnis zum Mittelwert für einen Zeitraum von 30 Jahren lagen etwas höher als bei den übrigen Elementen bei im Mittel 18 %, wobei auf einer Fläche (**BDF 9**) eine Änderung von beinahe 100 % im Verhältnis zum Mittelwert festgestellt wurde – dort lag besonders aber der Initialwert aus der Erstbeprobung recht hoch, vielleicht liegt dort ein Ausreißer vor. Für die mittlere Änderung ergibt sich eine bayernweite Abnahme von $0,017 \text{ mg kg}^{-1}$ in 30 Jahren, was im Verhältnis zum Mittelwert etwa 16 % entspricht. Die Quecksilber-Gehalte der bayerischen Ackerflächen scheinen demnach zurückzugehen.

Ursachen könnten sein, dass die allgemeine Umweltverschmutzung zurückgegangen ist und damit die einhergehenden Quecksilberimmissionen abgenommen haben. Auch könnte Quecksilber und seine Verbindungen wegen seiner Leichtflüchtigkeit durch Ausgasung und/oder mikrobielle Umsetzung aus dem Boden ausgetragen worden sein. Wegen der gegenüber anderen Schwermetallen insgesamt geringeren Hg-Gehalte im Boden beeinflusst bei der Analyse die Messgenauigkeit den Wert natürlich in viel stärkerem Maß, als dies bei den anderen Schwermetallen der Fall ist.

Die stärkste Abnahme wurde auf der **BDF 9** im Landkreis Mühldorf am Inn nachgewiesen, hier fielen die Gehalte besonders von $0,19 \text{ mg kg}^{-1}$ im Jahr 1987 bereits zur zweiten Aufnahme 1998 um mehr als die Hälfte auf $0,08 \text{ mg kg}^{-1}$ ab, und verblieben in etwa auf diesem Niveau. Auf der Acker BDF mit der zweit und dritt stärksten Abnahme (und $R^2 > 0,3$) (**BDF 74** und **BDF 56**) gingen die Quecksilber-Gehalte besonders zu den letzten beiden Aufnahmen hin zurück, wobei die Schwankungen innerhalb der einzelnen Stichproben und des Jahres hier deutlich größer waren. Dabei könnte der Methodenwechsel von AAS-Hydrid-Technik zu ICP-OES(MS) eine Rolle gespielt haben.

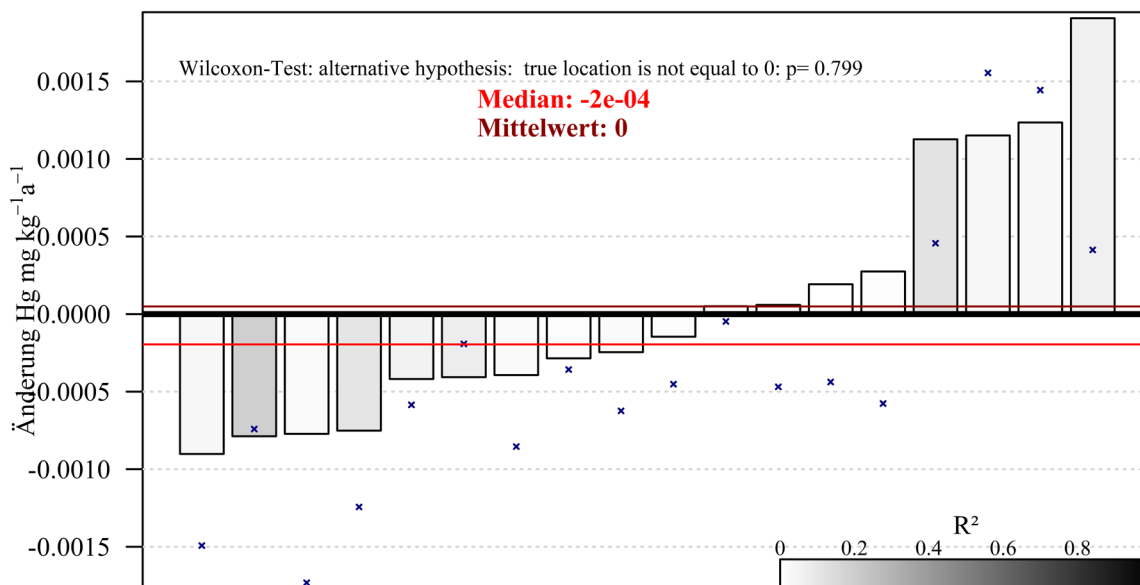
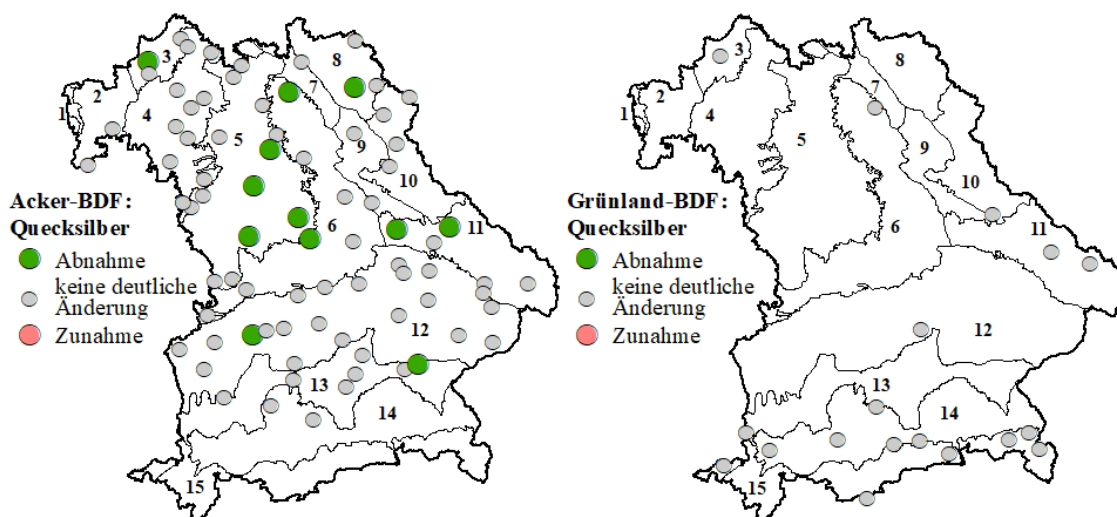


Abb. 42: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 18: Entwicklung der Hg-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Hg-Abnahme	Hg-Zunahme
Änderung absolut	14 (78%)	4 (22%)
Trend	10 (56%)	8 (44%)
davon mit $R^2 > 0,3$	0	0

In den Oberböden der 18 Grünland-BDF haben sich die Quecksilbergehalte im Beobachtungszeitraum äußerst gering verändert. Die Schwankungen zwischen den Serien, waren sehr hoch und keine der angepassten Ausgleichsgeraden konnte mehr als 30 % der Varianz erklären. Die absoluten Änderungen von der ersten zur letzten Probenahme wich deutlich vom ermittelten Trend ab. Die mittlere Änderung relativ zum mittleren Gehalt auf Grünland-BDF entsprach nur 0,9 %, bei den Acker-BDF lag sie bei 16 %.



Hauptlandschaftseinheiten (Wittmann, 1991):

- | | | |
|---|---|---|
| 1 Rhein-Main-Niederung | 6 Fränkische und Schwäbische Alb | 12 Tertiärhügelland, Iller-Lechplatte und Donautal |
| 2 Spessart-Odenwald | 7 Oberrhein-Schollenland | 13 Schwäbisch-Bayer. Schotterplatten und Altmoränen |
| 3 Rhön | 8 Frankenalb, Fichtelgebirge und Vogtland | 14 Schwäb.-Bayer. Jungmoräne und Molassevorberge |
| 4 Fränkische Platten | 9 Oberpfälzer Becken und Hügelland | 15 Bayerische Alpen |
| 5 Fränkisches und Schwäbisches Keuper-Lias-Land | 10 Oberpfälzer Wald | |
| | 11 Bayerischer Wald | |

Abb. 43: Veränderung der Hg-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2>0.3$, grün=Trend<0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$.

Die Karten in Abb. 43 stellen dar, wie sich im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF in Bayern, die Quecksilbergehalte im Beobachtungszeitraum (1985-2018) entwickelt haben. Bei den Grünland-BDF konnte keine deutliche Änderung festgestellt werden. Bei den Acker-BDF haben jedoch bei 12 BDF die Hg-Gehalte jeweils abgenommen. Die Lage dieser Acker-BDF innerhalb von Bayern, lässt keine räumliche Differenzierung auf bestimmte Landschaftseinheiten zu. Zur Höhe der Ab- und Zunahmen der einzelnen BDF siehe ANHANG, Tab. 60 und Tab. 61.

Vielleicht sind die derzeit niedrigeren Hg-Gehalte und dessen Rückgang in Böden dafür verantwortlich, dass die Vorsorgewerte in der Novelle der BBodSchV (MantelV, 2021), die erst ab 01.08.2023 gültig sein werden, angepasst wurden. Es gelten dann für die jeweiligen Hauptbodenarten bei Quecksilber die folgenden Vorsorgewerte:

0,3/0,3/0,2 (Ton/Lehm+Schluff/Sand).

2.3.3.7 Zink (Zn)

Kurzsteckbrief Zink [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg^{-1}]:

Unedles Schwermetall der 2. Nebengruppe des Periodensystems. In vielen Böden häufig. Wichtiges, essenzielles Element für Organismen (Pflanzen, Tiere, Mensch).

Typische Gehalte im Boden 10-300 ($\text{Ø}50$).

Häufig von Cd begleitet (selbe Nebengruppe im Periodensystem - kann Zn isomorph in Mineralen ersetzen); Cd-Gehalte in der Regel 0,05 % der Zn-Gehalte. Böden mit hohen Zink-Gehalten daher häufig auch mit Cadmium belastet. Starke Sorptionsneigung an Tonminerale, Huminstoffe, Sesquioxide. Die wichtigsten Zn-Speicher im Boden sind Silikate und Eisenoxide, in denen Zn Fe-Ionen isomorph ersetzen kann. Im sauren Bereich wird Zn desorbiert bzw. aus dem Bodensubstrat herausgelöst. Von Sesquioxiden häufig irreversibel okkludiert. Starker Antagonist zu Phosphor (hohe Phosphatgehalte im Boden verringern die Pflanzenverfügbarkeit von Zn). In der Bodenlösung bildet Zn nur schwache organische Komplexe, die unterhalb von pH 5 nicht mehr stabil sind. Anthropogen eingetragenes Zn ist in der Regel weniger fest gebunden und somit leichter mobilisierbar als geogenes. Zink wird in Unterböden weniger stark festgelegt als in Oberböden, was vermutlich auf geringere Gehalte an Sorbenten (Humus, pedogene Oxide, Tonminerale) zurückzuführen ist. Mit dem Bodenwasser verlagert werden in erster Linie gelöste $\text{Zn}^{\text{II}+}$ -Spezies. Aufgrund der meist starken Festlegung des größten Teils der Zn-Gehalte im Boden kann nur wenig Zn verlagert werden.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: tiefe Boden-pH-Werte $<\text{pH } 5,5$.

Typisch in Pflanzen 15-150, phytotoxisch ab 100(150)-(200)300, Transferfaktor: 1-10

Zink ist ein für den Stoffwechsel der Pflanze essenzielles Element. Unterhalb von 15-20 mg kg^{-1} im Pflanzengewebe tritt Zn-Mangel auf (reduzierter Wuchs, Kleinblättrigkeit). Hohe Zn-Gehalte wirken toxisch auf Kleinstlebewesen (weniger auf höhere Lebewesen) und Pflanzen (reduziertes Wurzelwachstum, Chlorosen junger Blätter). Das ökotox. Potential von Zn ist gering.

Verwendung: Zink wird vor allem als Schutzüberzug von Eisen und Stahl verwendet („Verzinkung“), außerdem für Messing und andere Metall-Legierungen; als Zinkblech, Zinkstaub für Farben und als Reduktionsmittel sowie zur Herstellung von ZnO , der ökonomisch bedeutendsten Zn-Verbindung. Zink-Oxid findet Verwendung in der Gummi-Industrie, als Pigment in Farben, als Zusatz in Fotokopierpapier, in Pharmaka (Zinktabletten, Zinkleim, Zinkcreme) und vielen anderen Chemikalien.

Eintragsquellen: Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft (Futter-Supplementierung für Tiergesundheit). Atmosphärische Einträge - Zn-Emissionen (Verkehr), Pflanzenschutzmittel fungizider Wirkung (Hopfen, Weinbau), Klärschlamm, Bioabfälle, Niederschlagsablaufwasser von Zink-/verzinkten Blechen und Dachrinnen.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte BBodSchV: 200/150/60 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Blume, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016)

Zinkgehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

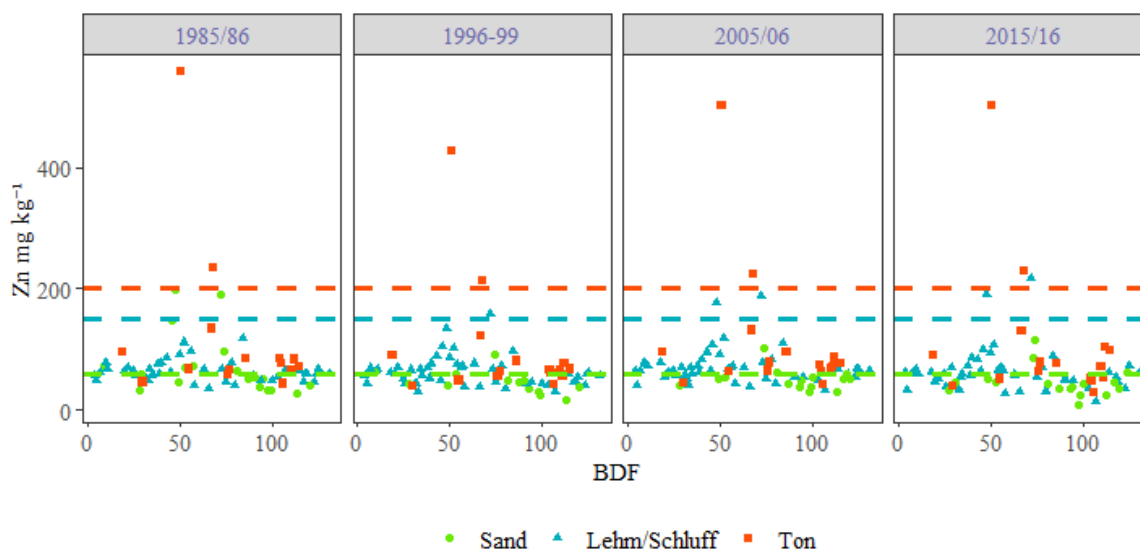


Abb. 44: Zn-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

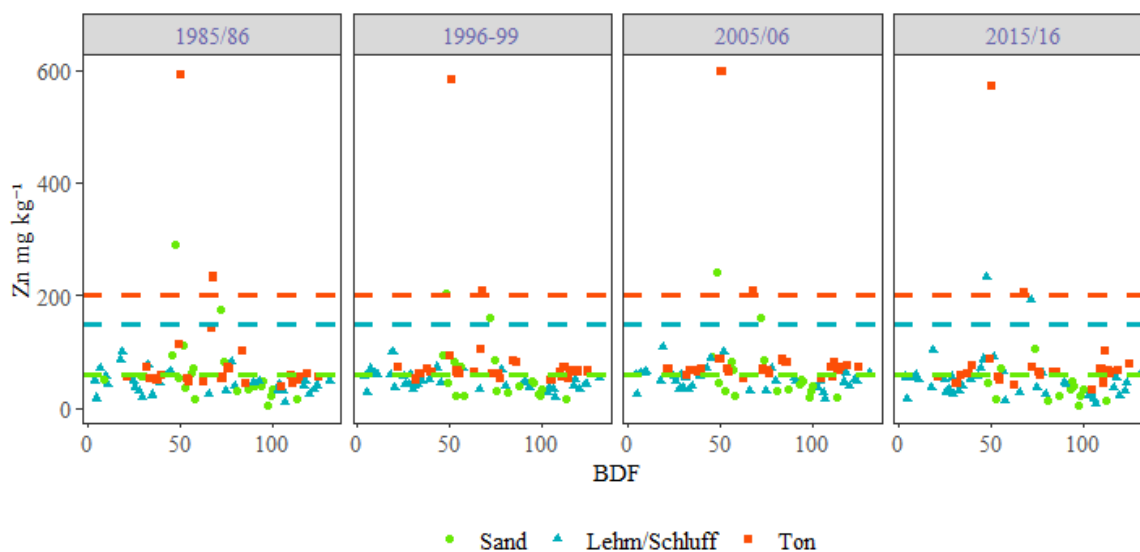


Abb. 45: Zn-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

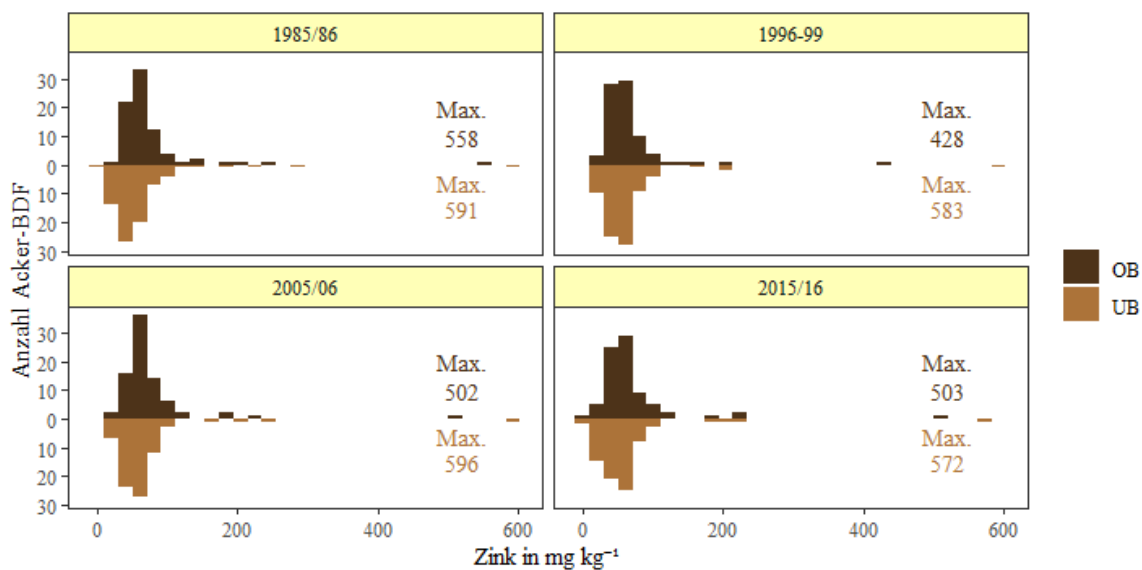


Abb. 46: Verteilung der Zn-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

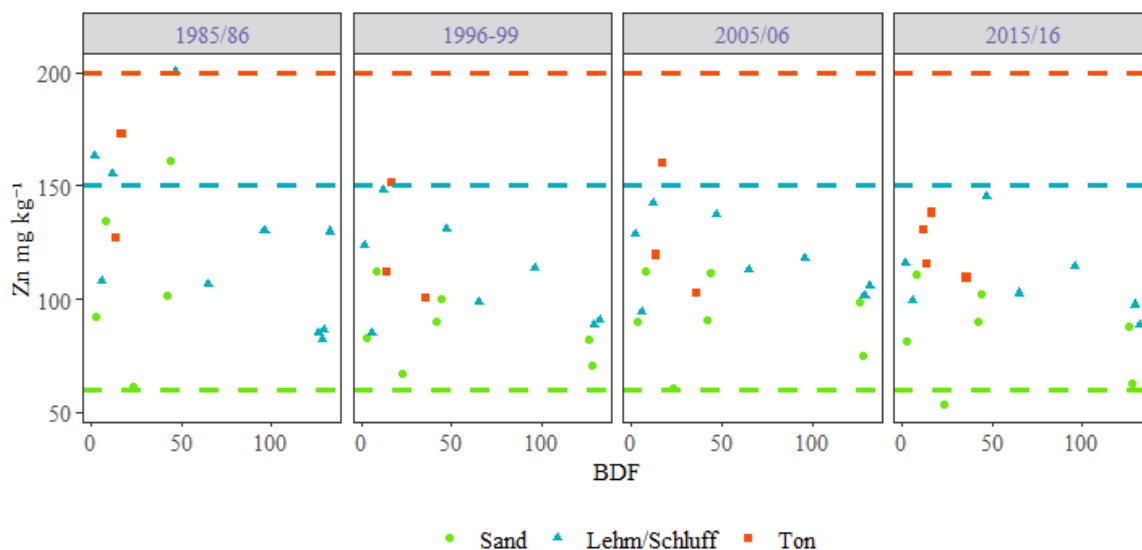


Abb. 47: Zn-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV.

Zink ist eines der am häufigsten im Boden vorkommenden Schwermetalle. Es ist auch wichtiges Spurenelement für die Ernährung von Pflanzen, Tieren und Menschen. Insgesamt zeichnet es sich gegenüber anderen Schwermetallen durch geringe Toxizität aus. Die mittleren Zinkkonzentrationen in den landwirtschaftlich genutzten BDF Bayerns sind gegenüber anderen Schwermetallen zwar deutlich höher, in den BDF-Böden traten jedoch keine außergewöhnlich hohen Zn-Konzentrationen auf (Keine Zn-Gehalte > 600 mg Zn kg⁻¹ TM Boden, in der Regel < 200 mg Zn kg⁻¹ TM Boden). Häufig wurden niedrige Gehalte gemessen und damit die jeweiligen Vorsorgewerte der BBodSchV unterschritten (s. Abb. 44 bis Abb. 45 und Abb. 47).

Bei den Oberböden der Acker-BDF und Hauptbodenart Sand wurde bei 11 BDF und 17 von 64 Untersuchungen der Vorsorgewert (VW) überschritten. Höchste Werte bei **BDF 48**, Erstbeprobung 1986, 199 mg Zn und **BDF 72**, Erstbeprobung 1988, 190 mg Zn kg⁻¹ TM Boden. Bei 9 BDF und 13 von 17 Untersuchungen war die eigentliche Hauptbodenart Lehm/Schluff; die Zuordnung zur Hauptbodenart Sand erfolgte aufgrund des pH<6 (s. Kap. 4.3 im Anh. 2 der BBodSchV zur Anwendung der Vorsorgewerte, (BBodSchV, 1999)).

Für die Hauptbodenart Lehm/Schluff lagen 15 von 190 Datensätzen und 5 BDF über dem jeweils anzuwendenden Vorsorgewert (höchste Werte bei **BDF 72**, Beprobung 2016, 218 mg Zn, **BDF 48**, Beprobung 2016, 191 mg Zn, **BDF 72**, Beprobung 2006, 189 mg Zn und **BDF 48**, Beprobung 2007, 177 mg Zn – die BDF mit dem nächstniedrigeren Zn-Gehalt ist **BDF 52**, wo aber 2007 nur noch 119 mg Zn kg⁻¹ TM Boden gemessen wurden).

Hauptbodenart Ton, 13 von 64 Werten und 4 BDF > VW. Höchste Zn-Gehalte bei: **BDF 51** (geogen vorbelasteter Standort) alle 4 Beprobungen im Beobachtungszeitraum > VW, maximal aber 558 mg Zn (Erstbeprobung 1987), **BDF 68**, alle 4 Beprobungen > VW (Werte von 213 mg Zn (1996) bis 235 mg Zn (Erstbeprobung 1987)).

Unterböden der Acker-BDF, Hauptbodenart Sand: 21 von 72 Werten > VW (höchste Werte bei **BDF 48**, Erstbeprobung 1986, 291 mg Zn und **BDF 72**, 175 mg Zn (Erstbeprobung 1986)). Bei 17 der 21, Hauptbodenart eigentlich Lehm/Schluff aber pH<6.

Hauptbodenart Lehm/Schluff, 7 Werte und 4 BDF über dem VW, höchste Werte bei **BDF 48**, Beprobung 2016, 234 mg Zn und **BDF 72**, Beprobung 2016, 194 mg Zn.

Hauptbodenart Ton, 13 von 98 Werten über dem Vorsorgewert, **BDF 51** (geogen vorbelastet) alle Beprobungsserien im Beobachtungszeitraum über dem VW, Werte von 572 mg Zn (2016) bis 596 mg Zn (Beprobung 2007, gleichzeitig höchster, bei Acker-BDF gemessener Zinkgehalt!), nächst höherer Zinkgehalt bei **BDF 68** (Erstbeprobung 1986) mit 233 mg Zn kg⁻¹ TM im Unterboden.

Keine deutlichen Unterschiede zwischen den Gehalten in Ober- und Unterböden der Acker-BDF (s. Tab. 4 und Abb. 46).

In den Oberböden der Grünland-BDF liegen 25 von 26 Werten über dem VW der Hauptbodenart Sand (höchste Werte **BDF 44**, Erstbeprobung 1986, 161 mg Zn und **BDF 8**, Beprobung 1986, 135 mg Zn). In allen 25 Fällen ist die Hauptbodenart ursprünglich Lehm/Schluff, der pH-Wert liegt aber unter pH 6.

Für die Hauptbodenart Lehm/Schluff liegen 22 von 33 Werten und 8 BDF über dem VW (höchste Werte mit 201 mg Zn bei **BDF 47** (Erstbeprobung 1986) und **BDF 2** (Erstbeprobung 1987), 163 mg Zn). Bei 15 der 22 Untersuchungen ist die eigentliche Hauptbodenart Ton, aufgrund des pH<6 sind diese aber wie Lehm/Schluff zu beurteilen (s. Anh. 2, Tab. 4.3 der BBodSchV (BBodSchV, 1999)).

Bei der Hauptbodenart Ton liegen alle 12 Oberbodenwerte aus 4 Beprobungen der Grünland-BDF (4 BDF) unter dem VW; Höchstwert bei **BDF 17** mit 173 mg Zn kg⁻¹ (Erstbeprobung 1986).

Zinkgehalte in Böden der Sonderkultur-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

Weil neben Kupfer (s. Kap. 2.3.3.4) auch Zink fungizide Wirkungen aufweist, wird es teilweise als Pflanzenschutzmittel beim Anbau von Sonderkulturen eingesetzt.

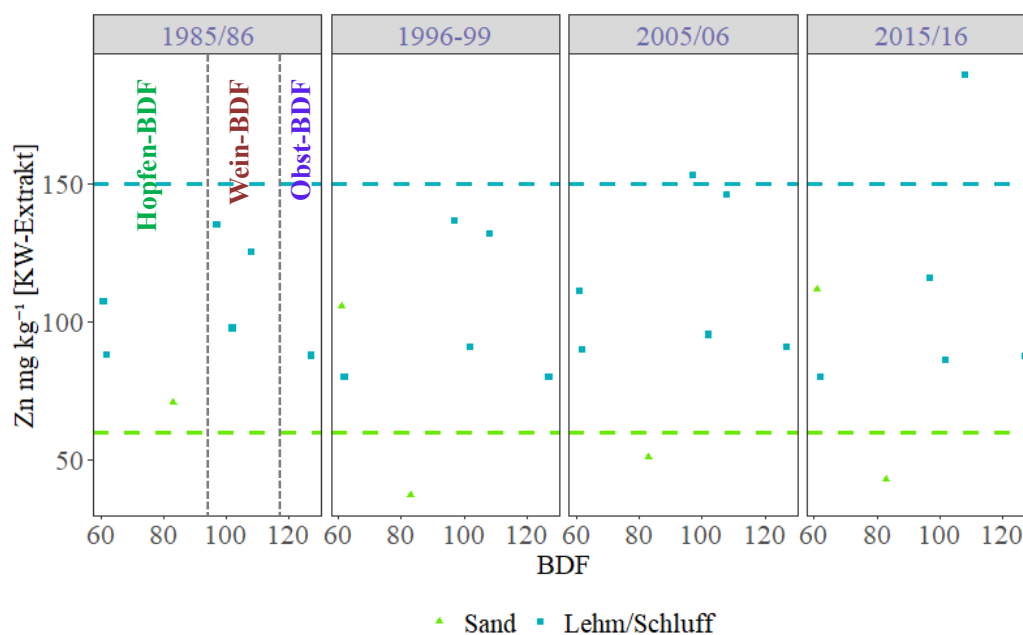


Abb. 48: Zn-Gehalte im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der BBodSchV (Einteilung in Hopfen-BDF links, Wein-BDF Mitte, Obst-BDF rechts bei Beprobung 1985/86 gilt analog auch für die übrigen Beprobungen).

Anders als bei Kupfer weisen Sonderkultur-BDF (Hopfen-, Obst-, Wein-Flächen) im Oberboden keine deutlich höheren Zinkgehalte als Acker- oder Grünland-BDF auf.

Bei der Hauptbodenart Sand liegen 3 von 6 Werten > VW, Maximalwert bei Hopfen-BDF 61, Beprobung 2015 und dort bei nur 112 mg Zn (Hauptbodenart ursprünglich Lehm/Schluff, pH aber unter pH 6).

Hauptbodenart Lehm/Schluff bei 10 von 22 Untersuchungen (\cong 3 BDF), Werte > 100 mg Zn, aber nur 2 VW-Überschreitungen bei 2 BDF: Höchstwerte bei Wein-BDF 108 (Beprobung 2015): 189 mg Zn kg⁻¹ TM Boden und BDF 97 (Beprobung 2006): 153 mg Zn kg⁻¹ TM Boden.

Dass im Unterschied zum Kupfer Sonderkultur-BDF keine höheren Zn-Gehalte als Acker- und Grünland-BDF aufweisen, liegt an den gegenüber Kupfer, wesentlich geringeren Applikationsmengen Zn-haltiger Pflanzenschutzmitteln im Sonderkultur-Anbau (s. Kap. 3.4).

Entwicklung der Zinkgehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

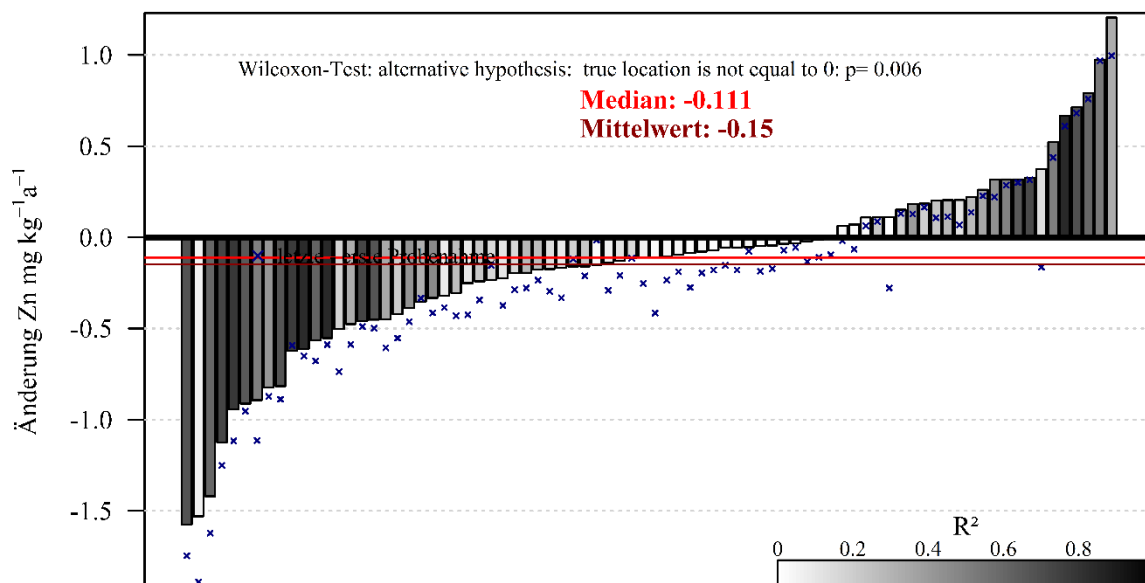


Abb. 49: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 19: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Zn-Abnahme	Zn-Zunahme
Änderung absolut	60 (75%)	20 (25%)
Trend	55 (69%)	25 (31%)
davon mit $R^2 > 0,3$	19	12
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	14	10

In den Oberböden der 80 Acker-BDF haben sich die Zinkgehalte im Beobachtungszeitraum im Mittel um etwa $0,15 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ verringert. Insgesamt wurden deutlich mehr Abnahmen als Zunahmen und eine signifikante Abweichung der Verteilung um Null festgestellt (Wilcoxon-Test $p=0.006$). Allerdings waren die Unterschiede geringer, wenn man nur die BDF berücksichtigt, die ein Bestimmtheitsmaß größer 0,3 aufwiesen. So traten zahlreiche Abnahmen im Bereich kleiner $0,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ auf, die jedoch durch den linearen Trend nur unzureichend erklärt werden können. Generell ist aber für die bayerischen Ackerböden eher mit einer Abnahme der Zink-Gehalte in den Böden zu rechnen. Für einen Zeitraum von 30 Jahren entspräche die Abnahme bei Annahme des Mittelwertes aus den BDF etwa $4,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Nicht zu vernachlässigen ist allerdings, dass es sowohl Abnahmen bis maximal $47,3 \text{ mg kg}^{-1}$ und Zunahmen bis maximal $36,2 \text{ mg kg}^{-1}$ für diesen Zeitraum gab. Deutlich zu erkennen ist auch, dass die absoluten Abnahmen bei der Differenz der letzten und ersten Probenahme (blaue Kreuze) in der Regel noch größere Abnahmen als die Trends zeigten.

Die im Landkreis Schweinfurt liegende **BDF 107** zeigte den stärksten Rückgang der Zn-Gehalte im Oberboden. 1986 lagen die Gehalte noch etwa im Mittel der bayerischen Acker BDF bei $65,2 \text{ mg kg}^{-1}$, fielen dann aber auf $30,5 \text{ mg kg}^{-1}$ 1997 und schließlich auf $14,6 \text{ mg kg}^{-1}$ 2015 (2006: $33,6 \text{ mg Zn}$). Der Zinkgehalt fiel damit im Beobachtungszeitraum um 78 % ab. Organische Dünger werden dort regelmäßig ausgebracht, vor allem erfolgt regelmäßig eine Düngung mit Schweinegülle. Für die im Rahmen des BDF-Programms vom landwirtschaftlichen Betrieb untersuchte Schweinegülle, haben die bei Ansatz von $170 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (nach DüV max. zulässige Düngemenge) errechneten Zinkfrachten im Beobachtungszeitraum abgenommen: 1986: $2367 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 1988: $2596 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 1993: $148 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 1999: $1855 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 2006: $1177 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und 2018: $632 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Über eine Aufbringung von Wirtschaftsdüngern (Schweinegülle) wird derzeit dort also weniger an Zink in den Boden eingetragen als noch zu Beginn des Beobachtungszeitraums.

Die größte Zunahme wurde andererseits für **BDF 72** im Landkreis Hof festgestellt. Hier fiel der Gehalt im Oberboden von zunächst 190 mg kg^{-1} 1988 auf 159 mg kg^{-1} 1998 um dann bis 2016 auf 218 mg kg^{-1} (2006: $189 \text{ mg Zn kg}^{-1}$) anzusteigen. Die BDF zeigte auch bei den Cadmium-Gehalten den stärksten Anstieg (bei $R^2 > 0,3$) – Cadmium ist sehr häufig ein Begleitelement von Zink (s. Elementsteckbrief oben, Kap. 2.3.3.2). Für diesen Standort wurde auch eine gewisse geogene Grundbelastung für andere der hier behandelten Schwermetalle festgestellt. Wie bei **BDF 107** handelt es sich bei **BDF 72** um einen konventionell wirtschaftenden Betrieb und Schweinehalter, wo in der Fütterung Zink häufig als Supplement eingesetzt wird. Bei **BDF 72** wird auch organisch mit Schweinegülle gedüngt, aber weniger regelmäßig. Der relative Anstieg des Zinkgehaltes ausgehend vom höheren Startwert von 190 mg Zn beträgt rd. 15 %.

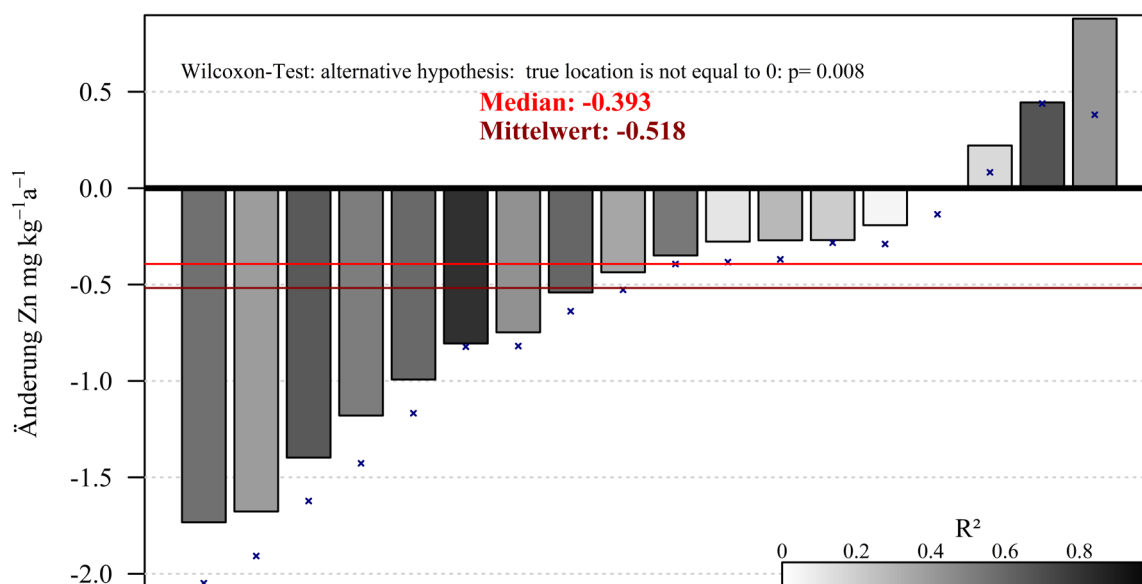


Abb. 50: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 20: Entwicklung der Zn-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Zn-Abnahme	Zn-Zunahme
Änderung absolut	15 (83%)	3 (17%)
Trend	14 (78%)	4 (22%)
davon mit $R^2 > 0,3$	10	2

Die berechnete Änderung der Zink-Gehalte der Grünlandflächen lag wie bei den Ackerflächen maximal etwas über $1,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Relativ zum Mittelwert ergaben sich Änderungen zwischen 4 % und 44 % im Zeitraum von 30 Jahren. Im Mittel lag die Änderung mit einer Abnahme von $-0,393 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich höher als bei den Ackerflächen. Es ergaben sich sowohl Zunahmen als auch Abnahmen mit einem Bestimmtheitsmaß $> 0,3$, wobei jedoch die Abnahmen deutlich überwogen. Insgesamt wurde eine signifikante Verschiebung vom Nullpunkt festgestellt (Wilcoxon-Test p-Wert: 0,008). In den meisten Fällen zeigte die absolute Änderung der ersten zur letzten Probenahme noch deutlich stärkere Abnahmen als der angepasste lineare Trend.

Die größte Abnahme der Zinkgehalte auf Grünland-BDF war für die **BDF 44** im Landkreis Freyung Grafenau festzustellen. Hier fielen die Gehalte von etwa 160 mg kg^{-1} 1986 auf etwa 100 mg kg^{-1} 2015, wobei der Rückgang schon zur zweiten Probenahme 1996 auftrat. Dieses Phänomen trifft für alle Grünland-BDF auch auf die folgenden **BDF 47**, **BDF 2**, **BDF 132** und **BDF 17** zu, aber auch für **BDF 12**, **BDF 8** und **BDF 128** sowie die übrigen Grünland-BDF, außer **BDF 23** und **BDF 65** zu. Die größte Zunahme der Zink-Gehalte im Oberboden auf Grünland-BDF trat auf der **BDF 129** in Kempten auf. 1986 lag hier der Zink-Gehalt noch bei etwa 86 mg kg^{-1} , 2016 aber bei 98 mg kg^{-1} .

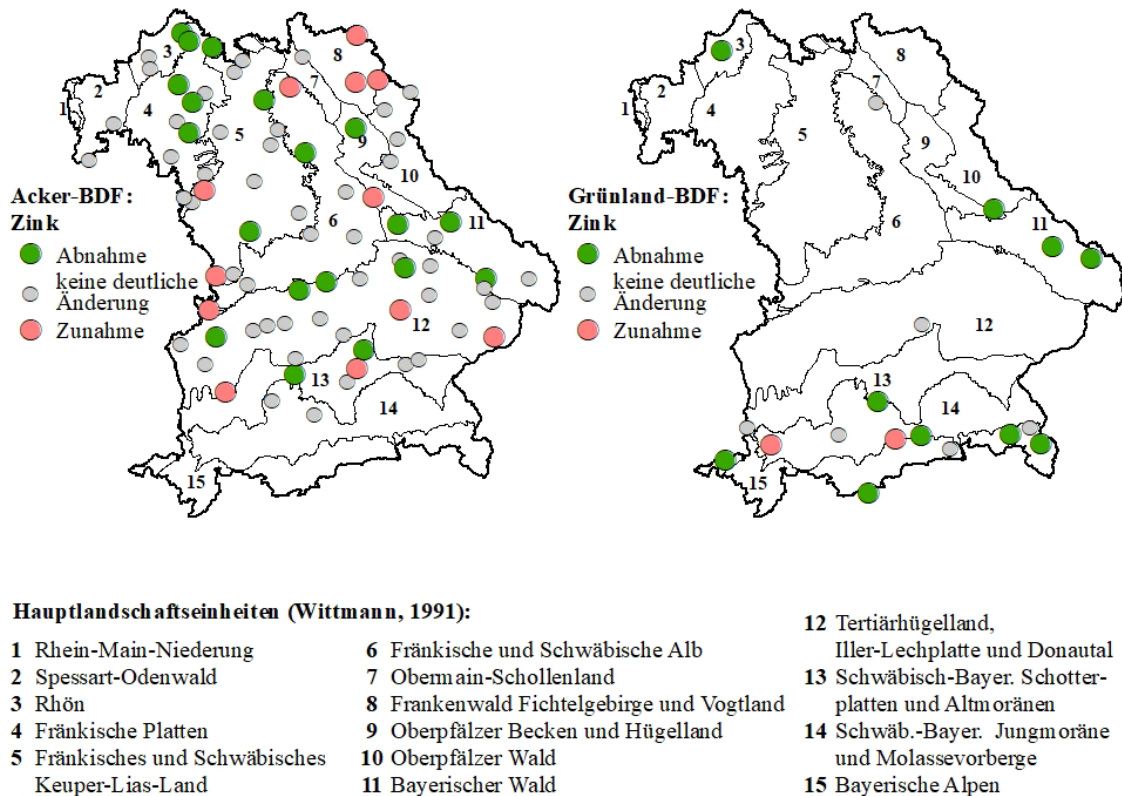


Abb. 51: Veränderung der Zn-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot= $Trend > 0$ & $R^2 > 0.3$, grün= $Trend < 0$ & $R^2 > 0.3$, grau= $R^2 < 0.3$.

Bei Zink haben sich die Gehalte der Oberböden im Beobachtungszeitraum etwas stärker verändert als bei den übrigen Elementen. Bei den Acker-BDF standen 19 Abnahmen, 12 Zunahmen gegenüber (s. Tab. 19); beim Grünland zeigten 10 BDF Abnahmen und 2 BDF Zunahmen (s. Tab. 20) Zur Höhe der Ab- und Zunahmen der einzelnen BDF siehe ANHANG, Tab. 60 und Tab. 61).

Die räumliche Lage der Acker- und Grünland-BDF mit Ab- und Zunahmen ergibt kein klares, differenzierbares Bild eines Zusammenhangs mit Geologie oder Landschaftseinheit.

2.3.3.8 Antimon (Sb)

Kurzsteckbrief Antimon [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Silberglänzendes, mäßig hartes, sprödes, selten vorkommendes Halbmetall - wie Stickstoff, Phosphor und Arsen in der 5. Hauptgruppe des Periodensystems der chem. Elemente, ähnliche(s) Eigenschaften/Verhalten wie As und P. Wegen seiner Dichte manchmal zu den Schwermetallen gezählt.

Häufiger in Tongesteinen als in Carbonaten, Sandsteinen, Granit oder Basalt, Bodengehalte meist höher als im Ausgangsgestein. Typische Gehalte im Boden 0,1(0,2) - 1(0,3) (Hintergrundwert: 0,9 (Ø 0,5)). In der Natur auch gediegen vorkommend, mögliche Oxidationsstufen +III, +V und -III. Sb und die meisten seiner Verbindungen sind sehr schwer oder nicht wasserlöslich. Wichtigste Ionen sind: Antimonyl-Ion (SbO⁺) und Antimonat-Ion (SbO₄³⁻), letzteres zeigt gegenüber den Bodenbestandteilen ähnliches Verhalten wie Phosphat. Das Antimonoxyanion SbO₄³⁻ existiert in Böden jedoch nicht, stattdessen Komplexierung als [Sb(OH)₆]⁻-Anion und Bindung an Fe-Oxide. Starke Affinität zu Sesquioxiden und zur organischen Substanz im Boden.

Für Organismen nicht essentiell, Anreicherung in Wurzeln und älteren Pflanzenteilen, höhere Gehalte in Gras. Wasserpflanzen scheinen Sb stärker aufzunehmen als terrestrische Pflanzen. Meist geringe Pflanzenbelastung wg. der extrem niedrigen Mobilität des Antimons (<< 1 % des Gesamtgehalts) bzw. der geringen Löslichkeit der vorwiegend im Boden vorkommenden Antimonsulfide und starke Bindung an Eisen-Mangan-Oxide (Manganhydroxide untergeordnet) sowie die organische Substanz. Typisch in Pflanzen <0,1 (bez. auf TS) (0,0001- 1, Ø 0,01), tox. Grenzwerte für Pflanzen: 5-10. Die Toxizität ist stark von Verbindung und Oxidationszustand des Sb abhängig; wie bei Arsen ist dreiwertiges Sb^{III+} grundsätzlich toxischer als fünfwertiges Sb^{V+}.

Verwendung/Eintragsquellen: Schmelzprozesse (z.B. Kupferverhüttung), in Legierungen als „Letternmetall“ im Buchdruck (dehnt sich beim Erstarren aus – Legierungen daher auch in Verschlüssen von Sprinkleranlagen und Sicherheitsventilen verwendet und als Lötmetall für elektr. Sicherungen), bei Erdkabeln (Bleiummantelung) in Blei-Akkumulatoren, in der Halbleiterindustrie, Pyrotechnik, Streichholzerstellung, zum Vulkanisieren von Kautschuk gebraucht, in Bremsbelägen/-abrieb von Kfz, als Sulfid (Stibnit) in der Kosmetik (Kajal), als Oxid Läuterungsmittel bei der Glasherstellung, als Legierungsbestandteil zur Härtung von Schrotkugeln aus Blei verwendet (bis 5 %), daher bei (Wurfscheiben-)Schießplätzen relevant, als Brandschutzmittel in Haushaltsgegenständen (z. B. Polstermöbel) eingesetzt. Sb-Einträge in die Atmosphäre auch durch verhütende Industrie, Kohlekraftwerke, vulkanische Aktivität, Verbrennung fossiler Energieträger, zählt zu den atmosphilen Elementen, d.h. Einträge ins Meer aus Atmosphäre größer als über Flüsse; auch in Klärschlämmen enthalten.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: gering/in Böden vergleichsweise immobil (weniger kritisch als As zu bewerten), atmosphärisch eingetragenes Sb verweilt lange im Oberboden.

Grenzwerte/Höchstgehalte: -

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Hintermaier-Erhard, 1997), (Litz, 2004-2016)

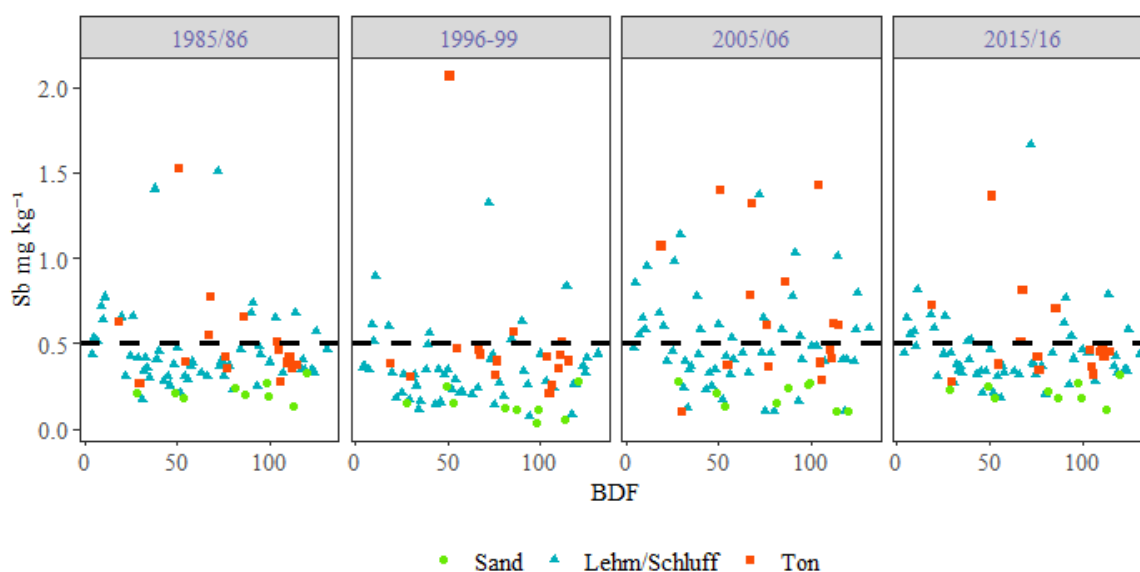
Antimongehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und typischer Hintergrundwert

Abb. 52: Sb-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (Sb wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

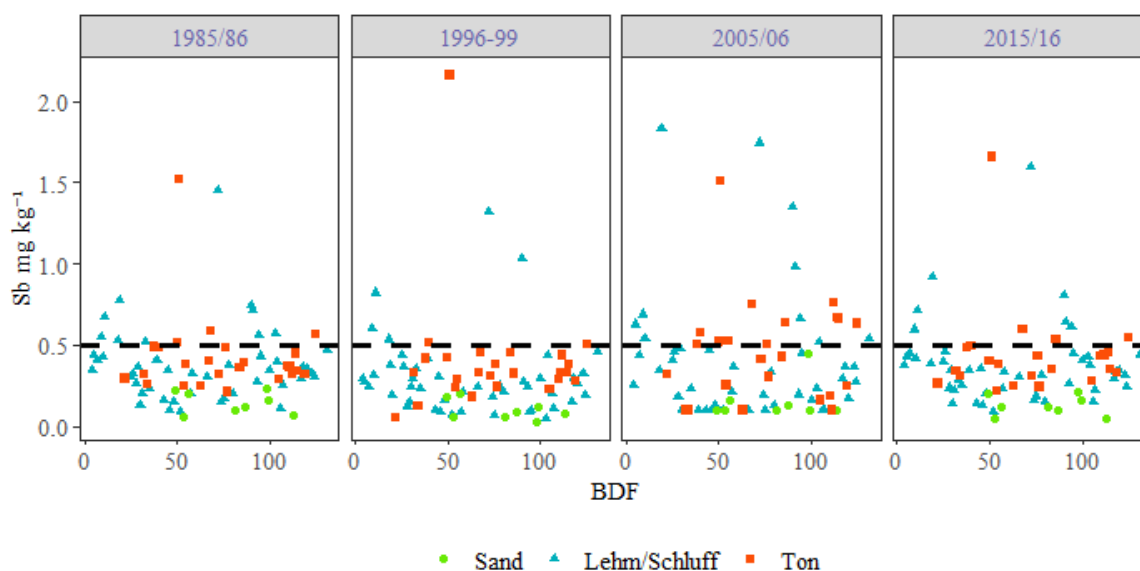


Abb. 53: Sb-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (Sb wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

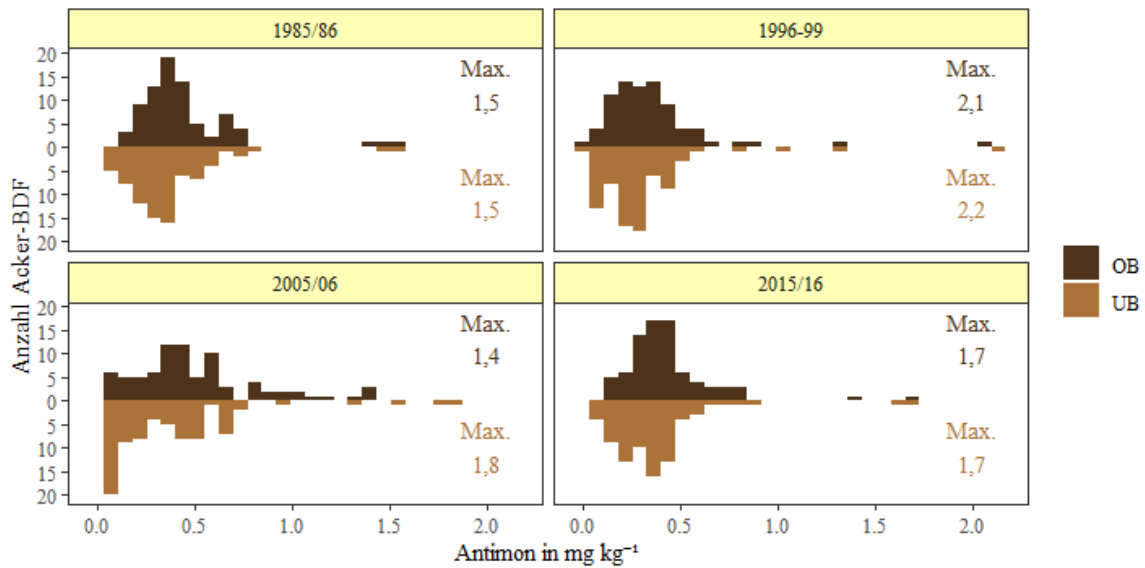


Abb. 54: Verteilung der Sb-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

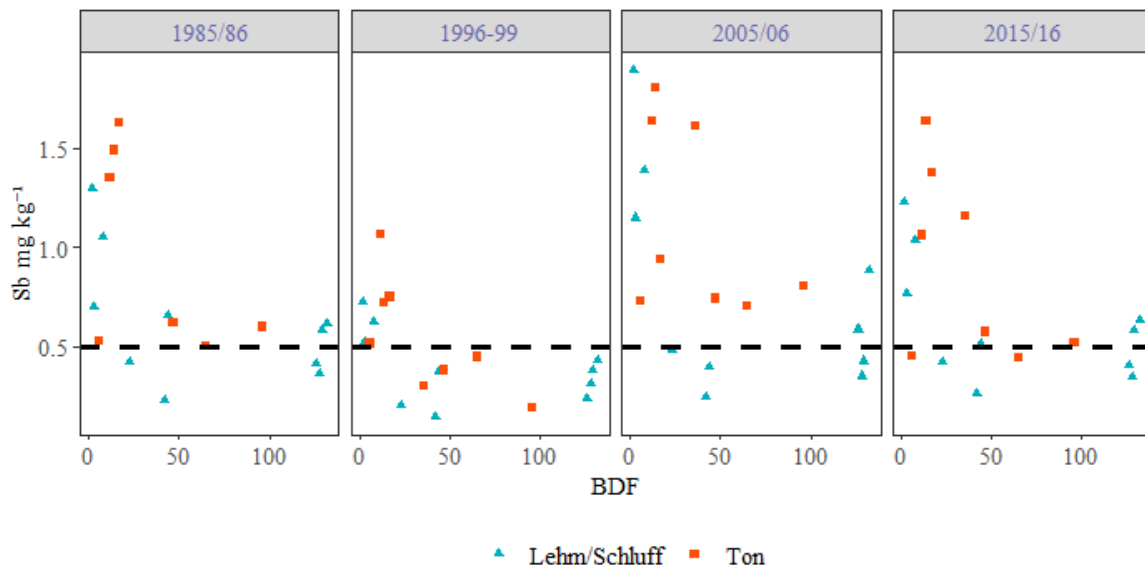


Abb. 55: Sb-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (Sb wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

In der BBodSchV oder der Novelle dazu ist kein Vorsorgewert für Antimon festgelegt. Als typische Hintergrundwerte für Antimon in Böden werden in der Literatur rd. 0,5-1 mg Antimon kg⁻¹ Boden angegeben. In obigen Grafiken wird als Referenzwert daher ein Hintergrundwert von 0,5 mg Sb kg⁻¹ eingezeichnet (s. Abb. 52, Abb. 53 und Abb. 55). In Bayern liegen die typischen Gehalte für Antimon im Boden bei 0,1-1 mg kg⁻¹, die Hintergrundwerte können aber je nach Bodenausgangsgestein (BAG) für lehmige und tonige Böden bis 5 mg Sb kg⁻¹ Boden und knapp mehr erreichen (LfU, 2011).

Ein Großteil, der auf BDF gemessenen Antimon-Gehalte beträgt weniger als 1 mg kg^{-1} im Boden und bleibt somit im Bereich oder unterhalb des Hintergrundwertes. Nur vereinzelt wurden in den Böden der BDF auch Gehalte über $1,5$ bzw. 2 mg kg^{-1} Antimon gemessen, so bei Acker-BDF **BDF 51** (Hauptbodenart Ton), 1997: $2,07 \text{ mg kg}^{-1}$ im Oberboden und $2,16 \text{ mg kg}^{-1}$ im Unterboden (=höchster Antimonwert in BDF-Böden). Bei **BDF 51** handelt es sich um einen geogen vorbelasteten Standort. **BDF 51** liegt in der BAG(Bodenausgangsgesteins)-Einheit 51 „Ton-, Schluff-, Mergel-, Sand- und Dolomitstein, Kalkstein“ im fränkischen Jura. Für diese BAG-Einheit werden Antimonwerte bis $5,3 \text{ mg kg}^{-1}$ im Boden ausgewiesen. Die bei **BDF 51** gemessenen Antimongehalte sind geogen bedingt zwar höher als bei anderen BDF in Bayern, sie liegen für BAG-Einheit 51 aber eher im unteren Bereich, dort vorherrschender Hintergrundwerte für Antimon im Boden.

Die Gehalte sind in den Ober- und Unterböden unterschiedlich verteilt, eindeutig höhere oder geringere Werte beim Vergleich der Ober- und Unterböden sind aber nicht auszumachen (s. Abb. 54).

Antimonwerte über 2 mg kg^{-1} weist auch **BDF 108**, eine Sonderkultur-BDF mit Nutzung Weinanbau und Hauptbodenart Lehm/Schluff auf, (OB, Beprobung 2015: $2,55 \text{ mg Sb}$, OB, Beprobung 2006: $2,44 \text{ mg Sb}$, UB, Beprobung 2015: $2,39 \text{ mg Sb}$). Die Fläche liegt nahe Würzburg. Es ist auch dort anzunehmen, dass Antimon sich bei der Kalksteinverwitterung (Würzburg liegt im Muschelkalk, geolog. Zeitabschnitt der Trias) und infolge der Bodenbildung im Boden aufkonzentriert hat.

Antimon kommt in Böden der BDF-Flächen insgesamt in viel niedrigeren Konzentrationen als das chemisch sehr ähnliche Arsen (gleiche Hauptgruppe im Periodensystem der chemischen Elemente – „Stickstoffgruppe“) vor, weist aber auch eine geringere Toxizität als Arsen auf. Die in den Böden der landwirtschaftlich genutzten BDF gemessenen Antimonkonzentrationen sind für eine Schadstoffbelastung daher nur von geringer Relevanz.

Entwicklung der Antimongehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

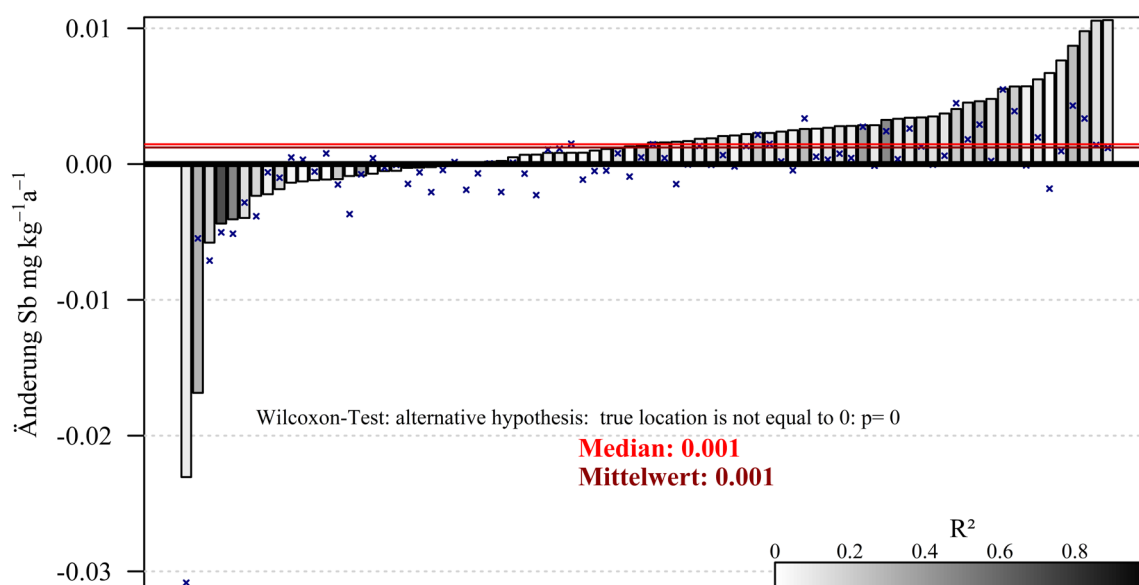


Abb. 56: Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 21: Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Sb-Abnahme	Sb-Zunahme
Änderung absolut	37 (46%)	43 (54%)
Trend	25 (31%)	55 (69%)
davon mit $R^2 > 0,3$	3	2

Die Entwicklung der Antimon-Gehalte in den Oberböden der 80 Acker-BDF zeigt eine signifikante Verschiebung hin zu den Zunahmen (Wilcoxon-Test p-Wert $<0,001$). Allerdings waren sowohl bei den absoluten Änderungen (letzte Probenahme – erste Probenahme) so gut wie keine Unterschiede festzustellen und insgesamt konnte nur auf fünf BDF eine lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß $>0,3$ angepasst werden. Im Mittel nahmen die Antimon-Gehalte in den Oberböden um $0,0012 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zu, was in 30 Jahren $0,37 \text{ mg kg}^{-1}$ und etwa 8 % vom Mittelwert entspricht. Angesichts der schlechten Erklärungswerte durch die lineare Regression, sollten die Ergebnisse nicht überinterpretiert werden, ein Hinweis auf einen steigenden Antimongehalt ist aber in jedem Fall gegeben und die Anreicherung dieses Schwermetalls im Boden sollte beobachtet werden.

Der stärksten Zunahme des Antimon-Gehaltes im Oberboden auf der **BDF 110** mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,3 standen 20 Acker BDF mit einer höheren Zunahme aber geringen Bestimmtheitsmaßen ($<0,3$) gegenüber. Auf der **BDF 20** stiegen die Gehalte zwischen der zweiten und der dritten Probenahmeserie um etwa $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ an. Insgesamt zeigte sich ein häufiger Wechsel von Zu- und Abnahmen. Bei der stärksten Abnahme um etwa $0,02 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf **BDF 9** fielen die Gehalte von $0,71 \text{ mg kg}^{-1}$ 1987 auf $0,57 \text{ mg kg}^{-1}$ 2016.

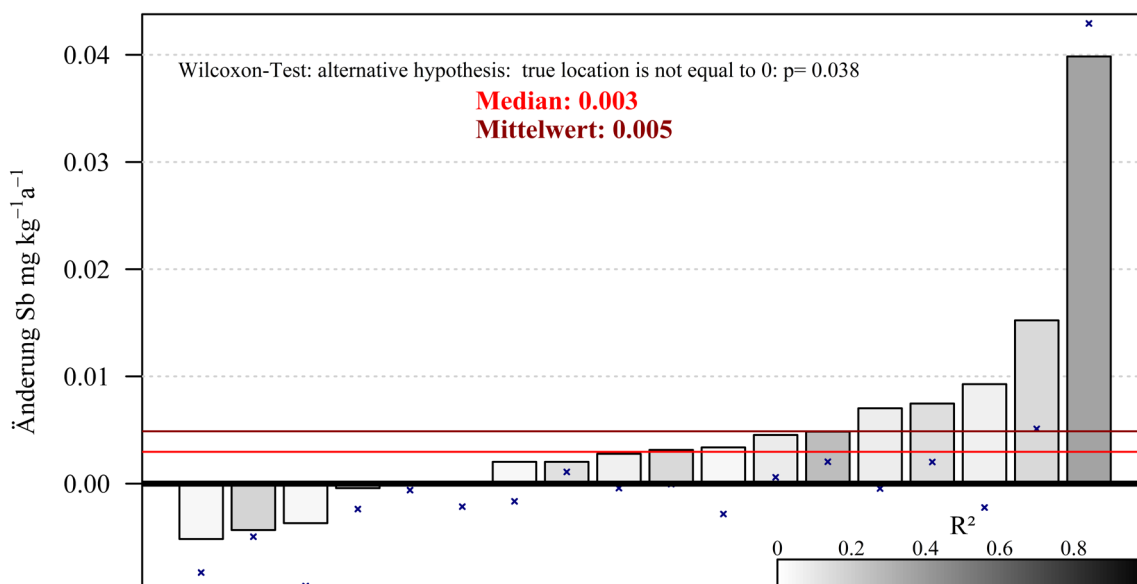


Abb. 57: Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 22: Entwicklung der Sb-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Sb-Abnahme	Sb-Zunahme
Änderung absolut	12 (67%)	6 (33%)
Trend	6 (33%)	12 (67%)
davon mit $R^2 > 0,3$	0	1

Ähnlich wie bei den Acker BDF zeigten sich auch bei Grünland mehr Zunahmen der Antimon-Gehalte im Oberboden (Wilcoxon-Test p-Wert: 0,038). Die mittlere Änderung lag hierbei noch deutlich höher bei $0,005 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, was einem Anstieg um etwa $0,15 \text{ mg kg}^{-1}$ in 30 Jahren entspricht (im Verhältnis zum Mittelwert 19%). Doch auch hier gab es deutliche Unterschiede zwischen den absoluten Zunahmen und den bestimmten Trends. Die Verläufe der Antimon Gehalte waren durch einen Wechsel von Anstiegen und Abfällen gekennzeichnet. Wie in Abb. 55 ersichtlich, wurden bei den Grünland-BDF und der Beprobung 1996-1999 insgesamt etwas niedrigere Antimonwerte gemessen als bei den übrigen Beprobungsserien. Weil Antimon nicht gleich bei Erstbeprobung der BDF, 1985/86 untersucht wurde, und die Sb-Werte aus dieser Zeit erst aus einer viel später erfolgten Untersuchung von Rückstellproben stammen, hat damit nach Beprobung und Untersuchung 1996-99 ein Laborwechsel stattgefunden, was vielleicht eine Erklärung für die insgesamt niedrigeren Messwerte an Antimon im Boden der Grünland-BDF von 1996-99 liefern könnte.

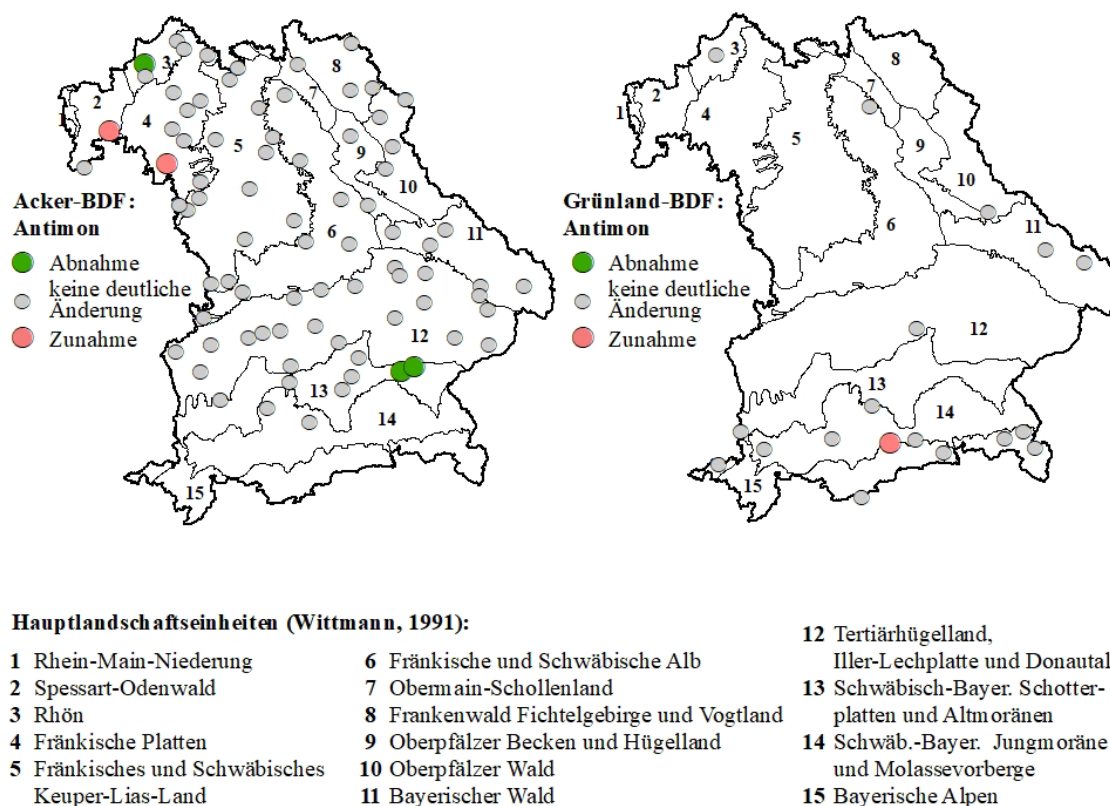


Abb. 58: Veränderung der Sb-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2 > 0.3$, grün=Trend<0 & $R^2 > 0.3$, grau= $R^2 < 0.3$.

In den in Abb. 58 dargestellten Karten wird die Entwicklung der Antimongehalte im Oberboden der 80 Acker- und 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraums (1985-2018) und die räumliche Verteilung der eindeutigen Ab- und Zunahmen der Bodengehalte an Antimon in Bayern dargestellt, wie es die lineare Regression (s. Abb. 56 und Abb. 57 bzw. Tab. 21 und Tab. 22) ergeben hat.

Bei Antimon haben sich die Gehalte in den Oberböden im Beobachtungszeitraum häufig nicht viel verändert. Bei den Acker-BDF standen lediglich 3 Abnahmen, 2 Zunahmen gegenüber; bei Grünland zeigte 1 BDF Zunahmen. Die bestätigten, also eindeutigen Ab- und Zunahmen fallen auch in der Höhe sehr gering aus, wie Tab. 60 und Tab. 61 im ANHANG zeigen, was auch an den insgesamt sehr niedrigen Antimongehalten in den untersuchten Böden liegt.

Die räumliche Verteilung der Ab- und Zunahmen für Antimon lässt auf keinen Zusammenhang mit der Lage der BDF innerhalb von Bayern schließen.

2.3.3.9 Arsen (As)

Kurzsteckbrief Arsen [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg^{-1}]:

Toxisches Halbmetall der 5. Hauptgruppe des Periodensystems. Typische Gehalte im Boden 0,2-40 ($\text{Ø}10$), wichtige Oxidationsstufen: Arsenat (+V), Arsenit (+III), chemische Ähnlichkeiten zu Phosphaten/Phosphiten, Molybdaten und Vanadaten. Anreicherung in Oberböden/obersten Lagen, Sorption an Sesquioxiden, Al- und Ca-Verbindungen.

Eintragsquellen: Abwasser + Klärschlämme, Komposte, Pestizide (früher), Desinfektionsmittel, Holzschutzmittel. Nebenprodukt der Verhüttung von Blei-, Kupfer-, Nickel-, Gold- und Silbererzen, Verbrennungsprozesse (Kohle), Vulkanausbrüche, geogen bedingte Belastungen z.B. in Niedermooren.

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: bei wechselfeuchten Böden (Reisböden), wechselndem Redoxpotential und bei niedrigen pH-Werten.

Typisch in Pflanzen <0,1-5, kritische Grenzwerte Pflanzen: 10-20, Transferfaktor: 0,01-0,1

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte der Novelle der BBodSchV (MantelV, 2021):

20/20/10 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalt in Lebens- und Futtermitteln:

Höchstgehalt in Lebensmitteln (2006/1881/EG* – (EG-KontamV, 2006), konsolidierte Fassung vom 14.10.2020) (Angaben in mg kg^{-1} Frischgewicht) - Reis für die Herstellung von Lebensmitteln für Säuglinge und Kleinkinder: 0,10, Geschliffener Reis, nicht parboiled (polierter oder weißer Reis) 0,20.

*Inzwischen (25.04.2023) ersetzt durch EU 2023/915 (s. dort).

Höchstgehalt in mg kg^{-1} (ppm), bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (FuttMV, 2002/32/EG Anh. 1 - konsolid. Text v. 28.11.2019) für Futtermittel-Ausgangserzeugnisse und Alleinfuttermittel: 2.

(Scheffer, 2010) (Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016).

Arsengehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

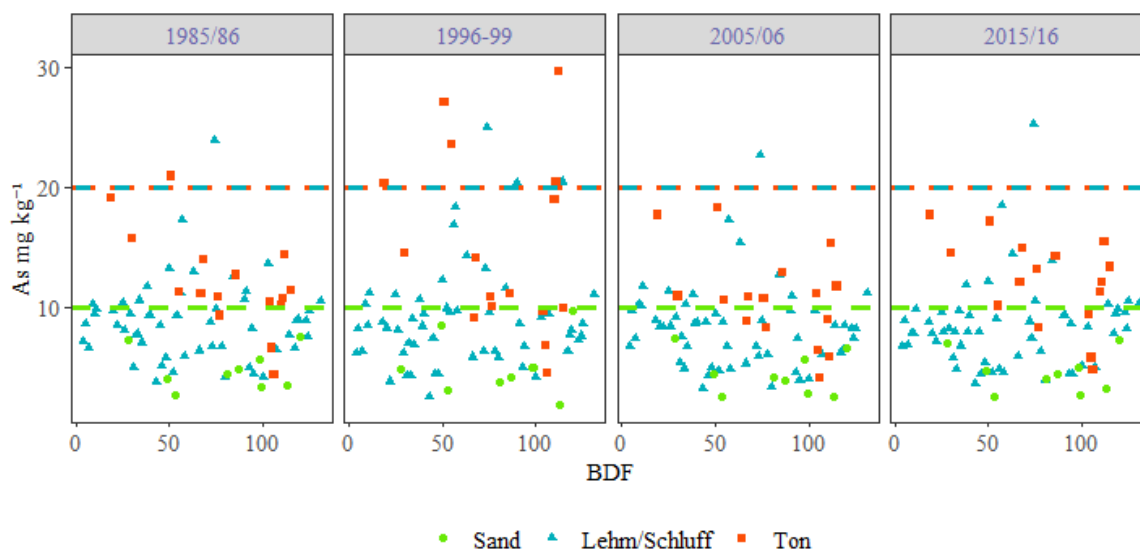


Abb. 59: As-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (As wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

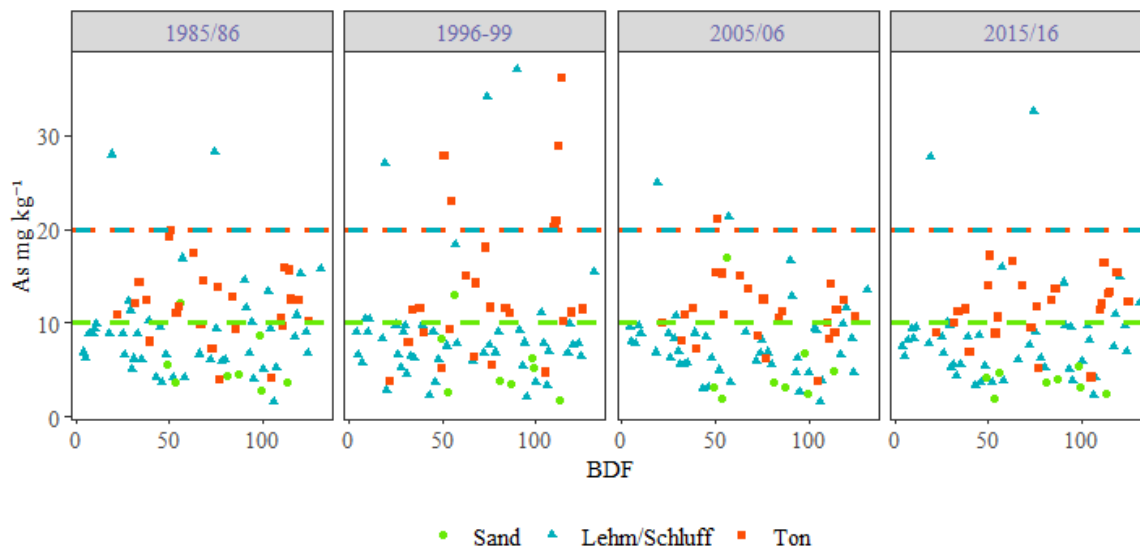


Abb. 60: As-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (As wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

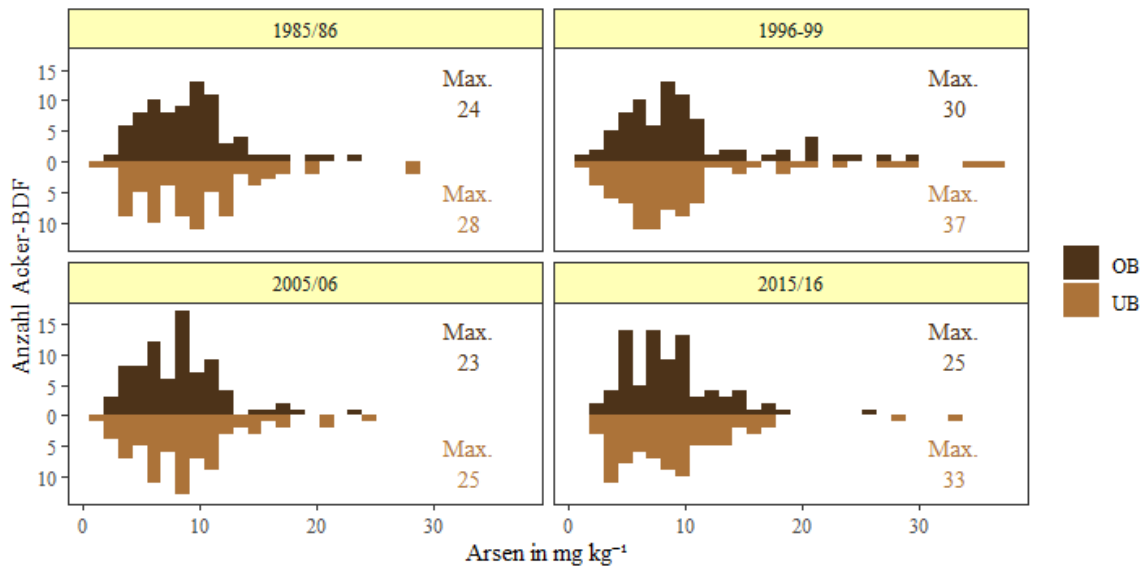


Abb. 61: Verteilung der As-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

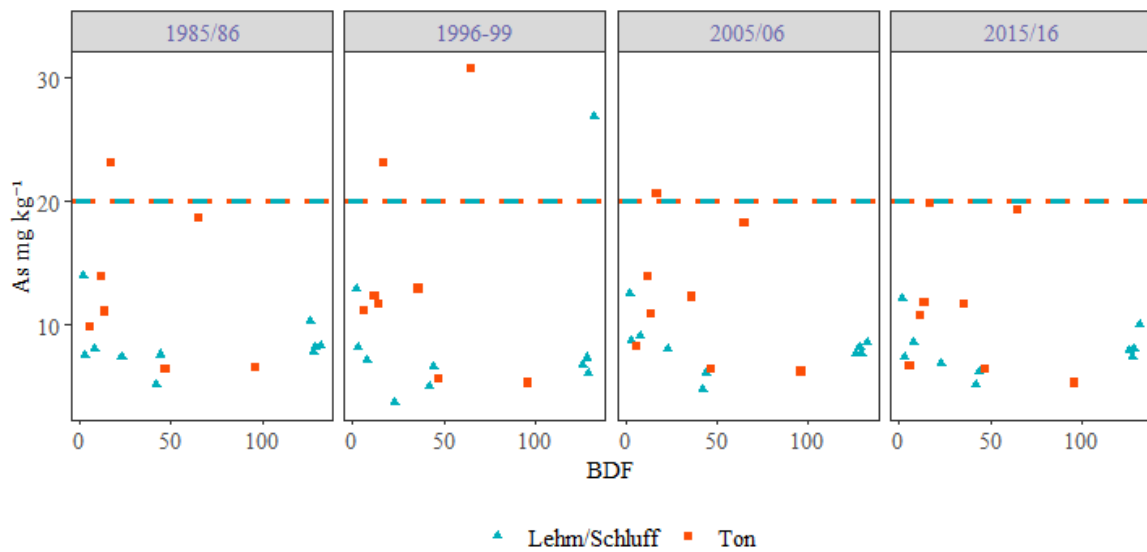


Abb. 62: As-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (As wurde erst ab 1996 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

Die mittleren Arsengehalte in den landwirtschaftlich genutzten BDF in Bayern liegen weitgehend unter den Vorsorgewerten (VW) der Novelle der BBodSchV und im Bereich der Hintergrundwerte für Bayern. Einige BDF überschreiten jedoch die jeweiligen Vorsorgewerte der Hauptbodenart:

- Bei den Acker-BDF-Oberböden, Hauptbodenart Sand: Keine Vorsorgewert-Überschreitungen.

- Oberböden der Acker-BDF mit Hauptbodenart Lehm/Schluff: 3 Überschreitungen bei Beprobung 1996-99 und je 1 Überschreitung bei Beprobung 1985/86, 2005/06 und 2015/16 (höchster Arsengehalt bei **BDF 74**, Beprobung 2016: 25,2 mg As).
- Oberböden der Acker-BDF mit Hauptbodenart Ton: eine Überschreitung, Beprobung 1985/86 und 5 Überschreitungen bei Beprobung 1996-99 (höchste As-Konzentration im Oberboden bei **BDF 112**: 29,6 mg und **BDF 51**(geogen belasteter Standort): 27,1 mg As kg⁻¹ Boden, Beprobung jeweils 1997).

Eine Gegenüberstellung der Ober-(OB) und Unterböden (UB) zeigt, dass die Arsengehalte in den Unterböden der Acker-BDF deutlich höher sind als in den jeweiligen Oberböden (s. Tab. 23), was die geogene Herkunft des Arsens in Böden unterstreicht.

Tab. 23: Mittlere und Maximale Arsen-Gehalte in Ober-(OB) und Unterböden (UB) der Acker-BDF.

Beprobungszeitpunkt	Mittelwert [mg kg ⁻¹]		Maximalwert [mg kg ⁻¹]	
	OB	UB	OB	UB
1985/86	9,0	9,7	23,9	28,2
1996-99	9,8	10,3	29,6	37,1
2005/06	8,3	8,8	22,7	24,9
2015/16	8,7	9,1	25,2	32,6

Die höchsten As-Konzentrationen (über 30 mg As kg⁻¹ Boden) wurden im Unterboden von **BDF 90** (BAG-Einheit 61d: Sandstein, selten Tonstein): 37,1 mg As kg⁻¹ Boden; Hauptbodenart Lehm/Schluff, Beprobung 1997, **BDF 114** (BDF liegt in einem Niedermoorgebiet): 36,1 mg As kg⁻¹ Boden; Hauptbodenart Ton, Beprobung 1997 und **BDF 74** (BAG-Einheit 55: Gneis): 34,1 mg bzw. 32,6 mg As kg⁻¹ Boden; Hauptbodenart Lehm/Schluff, Beprobung 1996 bzw. 2016 gemessen.

In den Oberböden der Grünland-BDF liegen die Arsenwerte hingegen fast durchwegs unter den Vorsorgewerten und betragen meistens auch weniger als 30 mg As kg⁻¹ Boden.

Insgesamt wurden damit also keine Arsengehalte über 37,1 mg As kg⁻¹ Boden auf BDF festgestellt - die auf landwirtschaftlich genutzten BDF gemessenen Arsenwerte in Böden sind also meistens sehr niedrig. Die leichten Überschreitungen der Vorsorgewerte (VW) der Novelle der BBodSchV (Hinweis: die VW gelten eigentlich erst ab 01.08.2023) dürften in den meisten Fällen geogen bedingt sein. Die Arsengehalte auf BDF erreichen bei weitem auch nicht die extrem hohen Arsenkonzentrationen, wie sie auf geogen belasteten Niedermoorflächen in Südbayern (s. „Arsen in Südbayern“: https://www.lfu.bayern.de/boden/hintergrundwerte/geogene_grundbelastungen/arsen/) gemessen wurden (> 2000 mg As im Boden). Zumindest **BDF 114** liegt ebenfalls in einem Niedermoorgebiet, weist demgegenüber aber weitaus geringere As-Gehalte auf (s. oben).

Entwicklung der Arsengehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

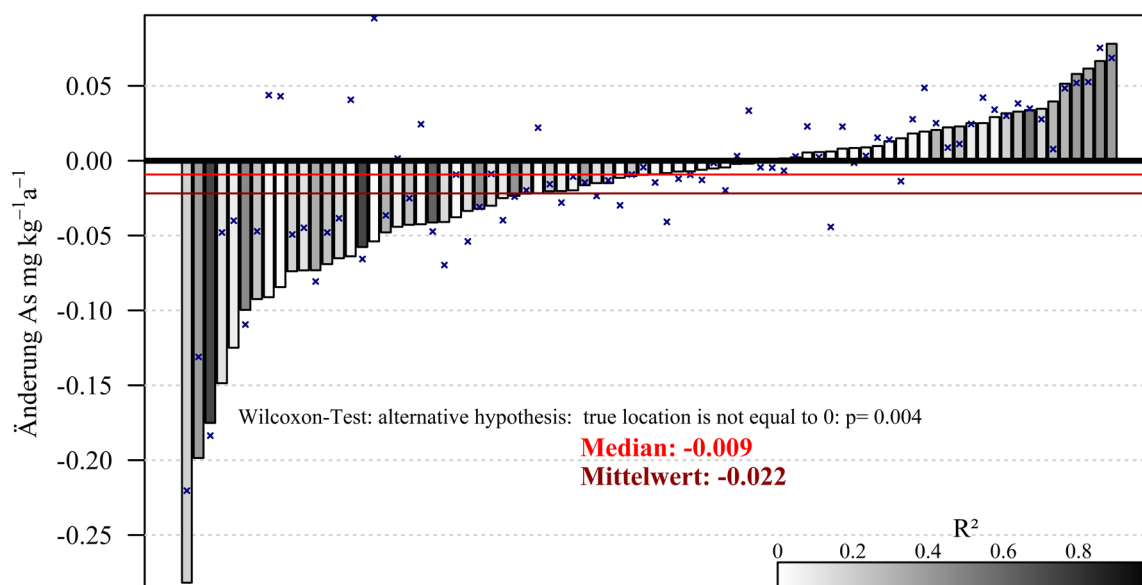


Abb. 63: Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 24: Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	As-Abnahme	As-Zunahme
Änderung absolut	46 (58%)	34 (42%)
Trend	51 (64%)	29 (36%)
davon mit $R^2 > 0,3$	10	5
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	9	5

In den Oberböden der 80 Acker-BDF haben sich die Arsengehalte im Beobachtungszeitraum im Mittel nur unwesentlich verändert (Mittelwert $-0,022 \text{ mg As kg}^{-1}$ bzw. Median $-0,009 \text{ mg As kg}^{-1}$ pro Jahr). Zieht man den Median heran, entspricht dies einer Abnahme um etwa 3 % in einem Zeitraum von 30 Jahren. Jedoch erklärt der angenommene lineare Zusammenhang nur auf 15 (von 80) Acker BDF mehr als 30 % der Varianz der Einzelwerte. Auch war der tatsächliche/absolute Rückgang (Ende-Anfang) auf mehr als 10 Flächen gegenläufig zum errechneten Trend. Auffallend ist, dass insgesamt deutlich mehr Acker BDF eine Abnahme der Arsengehalte zeigten und dass auf deutlich mehr Flächen der Arsengehalt um mehr als $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ pro Jahr zurückging als zunahm. Die festgestellte Abweichung von einer zufälligen Verteilung um 0 ist hochsignifikant (Wilcoxon-Test: $p < 0,01$). Die Änderungen traten nicht verstärkt auf BDF auf, bei denen die Bodenbearbeitung während des Untersuchungszeitraums umgestellt wurde.

Lediglich auf **BDF 51** war eine deutliche und durch den linearen Trend gut erklärte ($R^2=0.38$) Abnahme der Arsengehalte um etwa $0.2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und gleichzeitig ein verringerter Pflugeinsatz zu beobachten. Bei den ersten beiden Probenahmen (1987, 1997) lagen die Gehalte noch über den Vorsorgewerten, fielen dann aber auf 18 und 17 mg kg^{-1} ab.

Die stärkste Zunahme der Arsengehalte wurde auf der **BDF 115** festgestellt ($R^2=0,38$; Trend $0.08 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Hier lag insbesondere das Ergebnis der letzten Probenahme mit 13 mg kg^{-1} deutlich über dem Ausgangswert von 11 mg kg^{-1} .

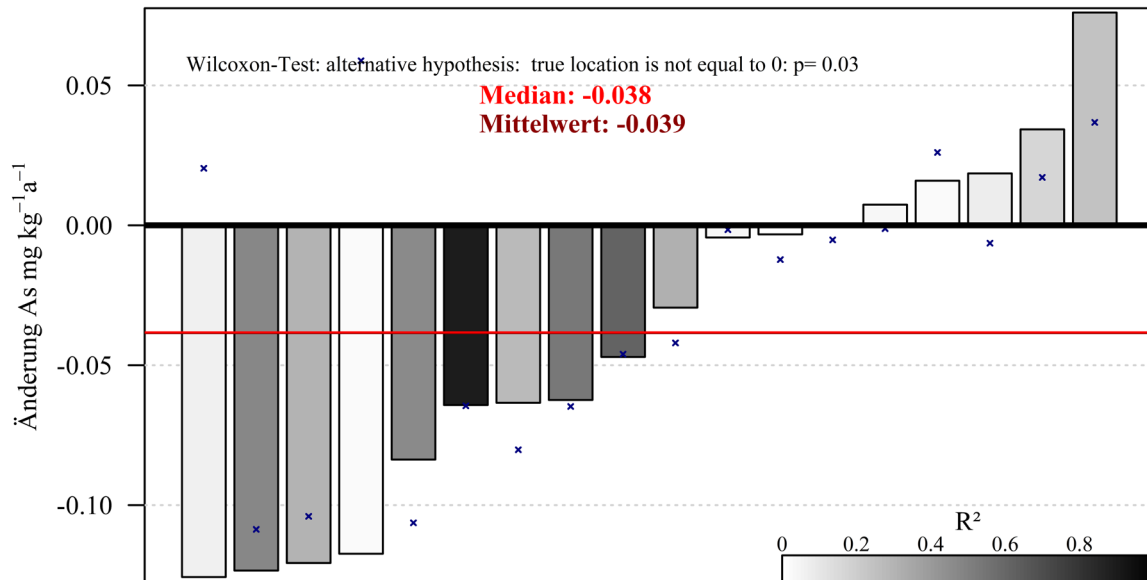


Abb. 64: Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 25: Entwicklung der As-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	As-Abnahme	As-Zunahme
Änderung absolut	13 (72%)	5 (28%)
Trend	12 (67%)	6 (33%)
davon mit $R^2 > 0,3$	6	0

Auch in den Oberböden der 18 Grünland-BDF nahmen die Arsengehalte im Beobachtungszeitraum im Mittel ab. Die Änderung lag hierbei etwas höher als bei den Acker BDF bei $-0,039 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$, was relativ zum Mittelwert einer Änderung von 11 % in einem Zeitraum von 30 Jahren entspricht. Ebenfalls wie in den Ackerböden waren auf den Grünland BDF statistisch auffällig mehr Abnahmen als Zunahmen der Arsengehalte zu beobachten (Wilcoxon-Test: p-Wert 0,03). Auf sechs der Flächen zeigte die lineare Regression ein Bestimmtheitsmaß größer 0,3, d.h. dort ist ein eindeutiger Trend zu erkennen.

Der stärkste relative Rückgang der Arsengehalte im Grünland war für **BDF 6** festzustellen (R^2 ist aber knapp unter 0,3) (s. Abb. 64, 3. Säule von links). Hier ging der Wert im Oberboden von 9,8 im Jahr 1986 auf 6,7 mg As im Jahr 2016 zurück. In der zweiten Serie (1996,

1997) stiegen die Werte zwar zwischenzeitlich wieder an, fielen dann aber deutlich und kontinuierlich ab.

Die beobachteten Zunahmen von As im Oberboden der Grünland-BDF konnten nicht ausreichend durch einen linearen Trend erklärt werden ($R^2 < 0,3$) wie Abb. 64 zeigt.

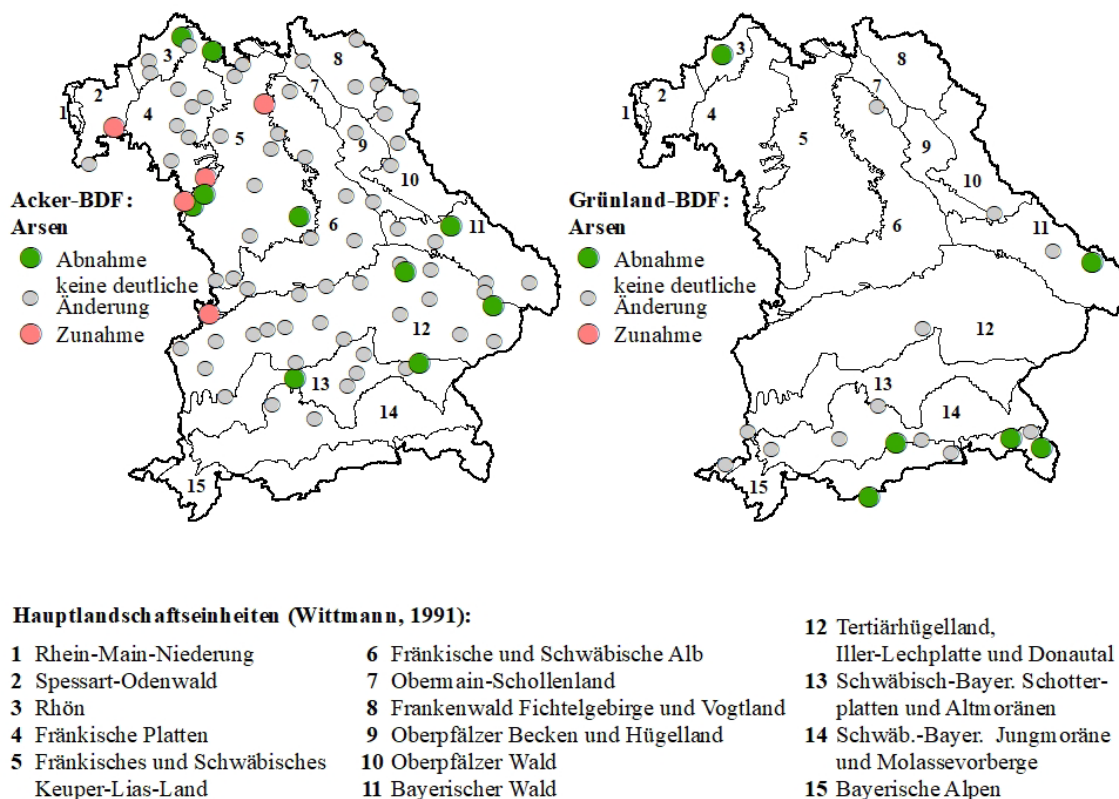


Abb. 65: Veränderung der As-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend>0 & $R^2 > 0,3$, grün=Trend<0 & $R^2 > 0,3$, grau= $R^2 < 0,3$.

Bei Arsen haben sich die Gehalte in Oberböden im Beobachtungszeitraum meistens nicht verändert (s. Abb. 65). Bei den Acker-BDF kam es bei 10 BDF zu Abnahmen (von $-0,016 \text{ mg As kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ bei **BDF 78** bis $-0,199 \text{ mg As kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ bei **BDF 51**) und bei 5 BDF zu Gehaltszunahmen ($+0,03$ (**BDF 100**) bis $+0,08 \text{ mg As kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ (**BDF 115**)).

Bei Grünland nahmen bei 6 BDF die Arsengehalte im Oberboden eindeutig ($R^2 > 0,3$) ab: von $-0,03$ bei **BDF 96** bis $-0,12 \text{ mg As kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ bei **BDF 17** – bei letzterer BDF haben die absoluten Gehalte zwischen 1986 und 2016 um $-3,26 \text{ mg}$ im Oberboden abgenommen, bei einem Ausgangsgehalt (Beprobung 1986) von $23,1 \text{ mg As kg}^{-1}$ im Boden und einem R^2 von 0,47.

Für As überwiegen bei den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF also die Gehaltsabnahmen. Viel geringfügiger als die Abnahmen haben die As-Gehalte bei einigen Acker-BDF vorwiegend in Nordwestbayern zugenommen, wie oben ersichtlich. Die Gründe dafür sind jedoch unbekannt.

2.3.3.10 Thallium (Tl)

Kurzsteckbrief Thallium [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Weiches Schwermetall der 3. Hauptgruppe des Periodensystems. Nicht essenziell für Säuger, (neuro)toxisch, ökotoxisch; ionische Eigenschaften mit Kalium vergleichbar. Tl einwertig und dreiwertig (Tl⁺, Tl^{III+}) auftretend. Tl⁺-Verbindungen sind meist stabiler als die von Tl^{III+}. Die Halogenide von Tl⁺ liegen außer bei Fluoriden vollständig dissoziiert vor und sind in Luft stabil. Tl-haltige Mineralien sind selten. Im Gegensatz zu den meisten Schwermetallen ist der Gehalt in sauren Gesteinen höher als in basischen. Tl ist Bestandteil sulfidischer Schwermetall-Erze und somit Begleiter von Zn-, Cu-, Fe- und Pb-Erzen. Es kommt in verschiedenen Verbindungen ubiquitär in geringen Konzentrationen in Gesteinen vor, besonders in kaliumhaltigen Tonen und Böden. Die hohe Löslichkeit und das geringe Komplexierungsvermögen von Tl⁺-Ionen dürfte eigentlich zu niedrigen Gehalten in Carbonaten und Tonmineralen führen. Die Hintergrundwerte in Bayern zeigen aber, dass Tl in Böden aus Kalkstein sowie aus Ton/Tonstein (Ackerböden) und besonders in Granit erhöht sind.

Typische Gehalte im Boden 0,01-0,5.

Böden mit hohem Humus- und Tongehalt in China und pH-Werten von 6,8 (Schwarzerden) enthielten am meisten Tl. Eine Untersuchung von Oberböden in Oberösterreich zeigte, dass die Tl-Gehalte im Boden sehr stark von den Gehalten und der Verwitterungsintensität des geologischen Ausgangsmaterials abhängen. Geogenes Tl ist vorwiegend in der Festphasenstruktur inkorporiert, Tl anthropogenen Ursprungs jedoch locker an die Austauschplätze der Mineraloberflächen adsorbiert und folglich leicht extrahierbar und bioverfügbar. Zusammen mit Cd und Zn, ist Tl das in Böden mobilste Schwermetall – das gilt v.a. für den (schwach) sauren Bereich. Dominierender Mechanismus der Tl-Adsorption ist der Kationenaustausch; Fällung, Mitfällung oder Okkludierung spielen eine untergeordnete Rolle. Die leichte Freisetzung von Tl⁺ durch Kationenaustausch bedingt rasche Verlagerung mit dem Sickerwasser. Tl wird zu gewissen Anteilen an stabile Humuskomplexe gebunden, kaum ausgewaschen und lange im Boden zurückgehalten (langes Kontaminationspotenzial). Die Gehalte an mobilem Tl in unkontaminierten, geogen Tl-armen Böden sind selbst bei niedrigem pH-Wert gering. Untersuchungen zeigten einen abnehmenden Tl-Gehalt mit zunehmender Probentiefe. Nur ein geringer Anteil wird bei anthropogen verursachten Tl-Einträgen in untere Schichten verlagert. Da Tl im Boden retardiert wird, verbleibt es hauptsächlich in den obersten Bodenschichten. In sauren Böden ist die Mobilität deutlich erhöht, so dass Tl ins Grundwasser ausgewaschen werden kann.

Tl ist ein mobiles Element, das leicht über Wurzeln in den Spross gelangt. Durch Nutzung des Aufnahmemechanismus für Kalium können Tl⁺-Ionen in alle Pflanzenteile aufgenommen werden. Tl-akkumulierende Kulturpflanzen sind Kohl und Grünraps. Tl und seine Verbindungen sind außerordentlich toxisch und giftiger als Verbindungen des Bleis, Cadmiums oder Quecksilbers.

Typisch in Pflanzen 0,01-0,5, phytotoxisch 20-30, Transferfaktor: 1-10

Mobilitäts- und Mobilisierungskriterien/-potential: tiefe Boden-pH-Werte <pH 5,5, Redoxpotenzial, Tongehalte, Gehalte organischer Substanz, sowie Menge an Eisen- und Manganoxiden im Boden.

Verwendung: Metallisches Tl und Tl-Verbindungen werden nur in begrenztem Umfang, aber einem breiten Spektrum industriell genutzt. Wegen der hohen Toxizität wurde Tl^+ , in Form von Tl_2SO_4 , als Rodentizid („Rattengift“) oder Insektizid verwendet (in Deutschland inzwischen aber verboten). In der Industrie wird Tl zur Herstellung von Tieftemperatur-Thermometern verwendet. Es dient zur Herstellung von Photo-Halbleitern und sehr beständigen, niedrig schmelzenden Spezialgläsern mit hohem Brechungsindex. Binäre Mischkristalle aus Tl-Halogeniden eignen sich wg. der hohen Durchlässigkeit für Infrarotstrahlung zur Herstellung von Linsen, Prismen, Zählrohren. In der Medizin wird Tl in der Thallium-201-Szintigraphie eingesetzt (Melanomdiagnose). Wegen der hohen Flüchtigkeit von Tl-Verbindungen wird es bei Verhüttungsprozessen anderer Metalle, bei der Zementfabrikation sowie bei der Kohle- und Müllverbrennung freigesetzt. Vor allem die Verwendung eisenoxidhaltiger Kiesabbrände bei der Zementherstellung trägt zu lokal erhöhten Thallium-Belastungen bei (Tl-haltige Flugstäube in der Umgebung von Zementwerken wurden auch in Deutschland festgestellt). Tl findet Verwendung in elektronischen Geräten mit Hochtemperatur-Supraleitfähigkeitsfilmen. Tl-haltige Dünnschichten finden breite Anwendung, z.B. in Mobilfunkgeräten.

Eintragsquellen: Emissionen (Zementwerke, Erzröstereien - Verhüttung von Blei- und Zinkerzen, Manganproduktion, Aufbereitungsrückstände von Golderzen und -konzentrat, Kohlekraftwerke). Bis auf lokale Emittenten (Bestandteil von Zementzuschlagstoffen) ist der Tl-Eintrag jedoch gering.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte der Novelle der BBodSchV (MantelV, 2021):

1/1/0,5 (Ton/Lehm+Schluff/Sand)

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016) (UBA, 2011).

Thalliumgehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und Vorsorgewerte

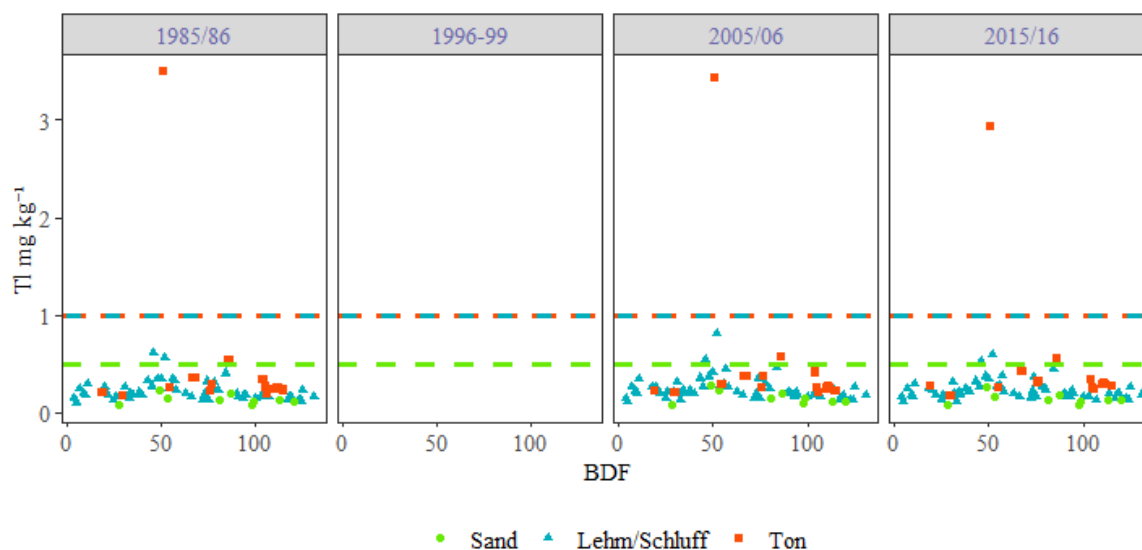


Abb. 66: Tl-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Tl wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

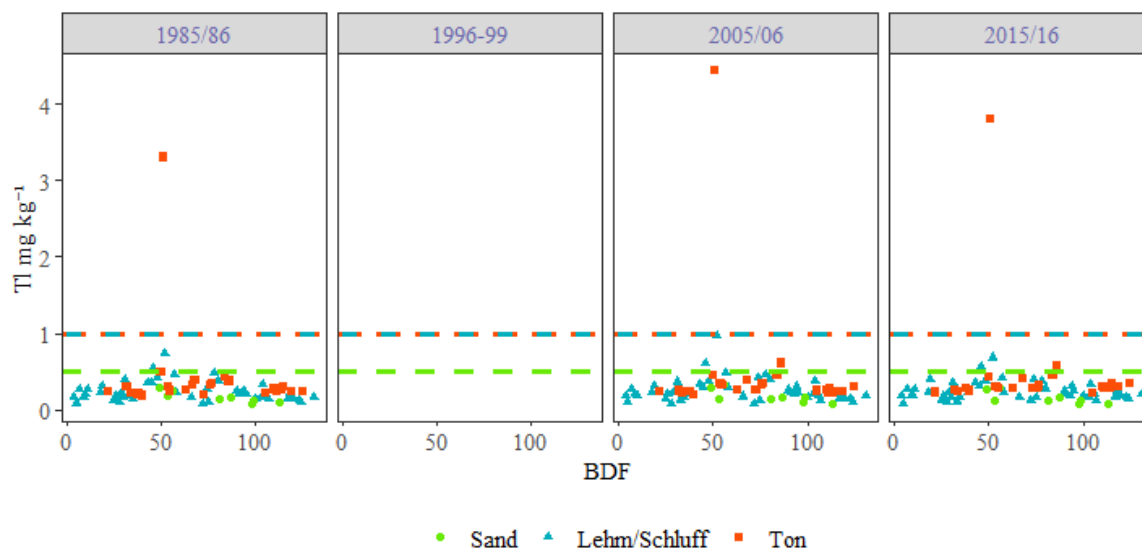


Abb. 67: Tl-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Tl wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

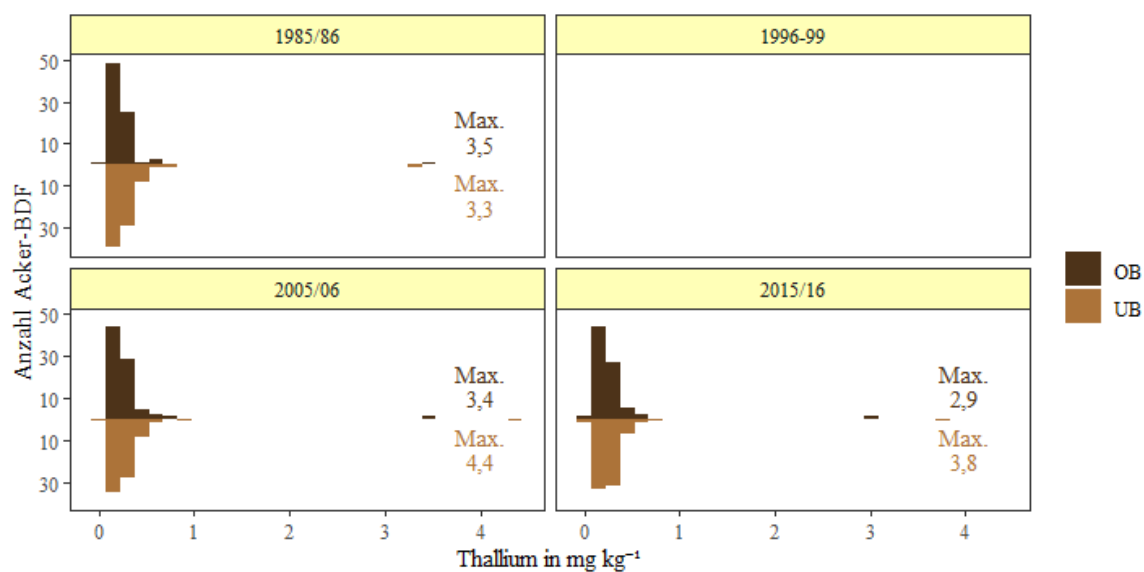


Abb. 68: Verteilung der Tl-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt)

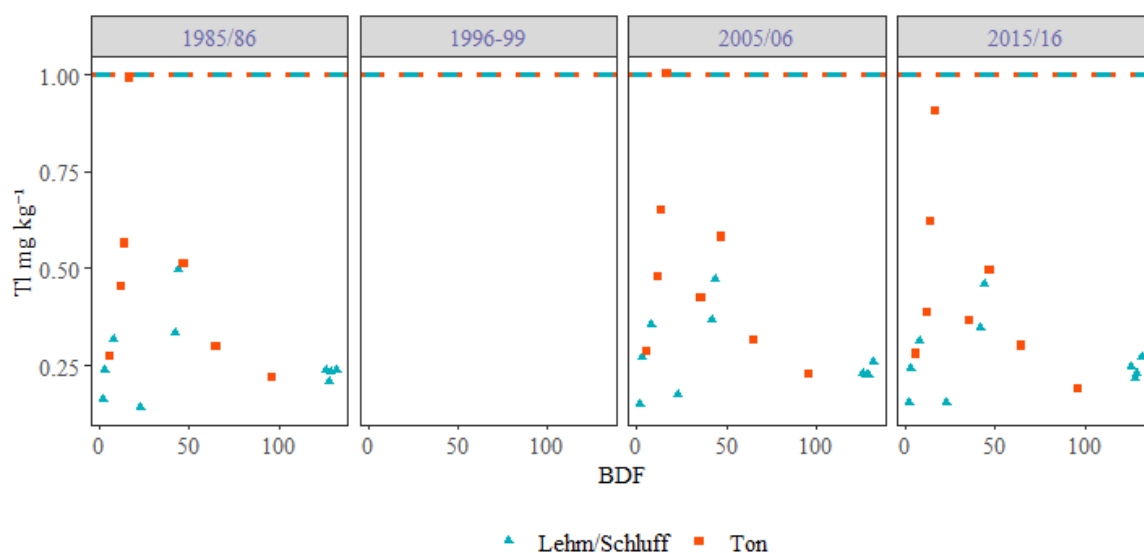


Abb. 69: Tl-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) und Vergleich zu Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Tl wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

Die mittleren Thallium-Gehalte in den landwirtschaftlich genutzten BDF Bayerns sind meist sehr niedrig (überwiegend $<1 \text{ mg Tl kg}^{-1}$) und liegen mit je einer Ausnahme für die Acker- bzw. Grünland-BDF unter den Vorsorgewerten der Novelle der BBodSchV (Mantelverordnung) (MantelV, 2021) (s. Abb. 66- Abb. 69). Thallium wird erst seit 2005 routinemäßig bei den BDF untersucht. Daher liegen nur Werte von 3 Beobachtungszeiträumen vor. Die Werte von 1985/86/87 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben.

Bei den Oberböden der Acker-BDF der Hauptbodenarten Sand und Lehm/Schluff wurden keine VW-Überschreitungen festgestellt, bei der Hauptbodenart Ton wurden nur bei einer

BDF (**BDF 51** – ein bekannt, geogen vorbelasteter Standort, s. auch oben) Vorsorgewert-Überschreitungen festgestellt und zwar bei Erstbeprobung 1987: 3,49 mg Tl, bei Beprobung 2007: 3,43 mg Tl und bei Beprobung 2016: 2,94 mg Tl kg^{-1} TM Boden.

Auch bei den Unterböden der Acker-BDF gibt es keine VW-Überschreitungen bei den Hauptbodenarten Sand und Lehm/Schluff, jedoch auch bei **BDF 51** mit Hauptbodenart Ton, was die geogene Ursache der erhöhten Gehalte belegt: Beprobung 2007: 4,43 mg Tl (= höchster gemessener Thallium-Wert), Beprobung 2016: 3,81 mg Tl und 3,30 mg Tl kg^{-1} TM Boden bei Beprobung 1986.

Es liegen keine Hinweise vor, dass sich bei den Acker-BDF die Thallium-Gehalte in den Ober- und Unterböden wesentlich unterscheiden.

Bei den Oberböden der Grünland-BDF wurde nur in einem Fall (**BDF 17**, Beprobung 2005) der Vorsorgewert (Hauptbodenart Ton) erreicht.

Entwicklung der Thalliumgehalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

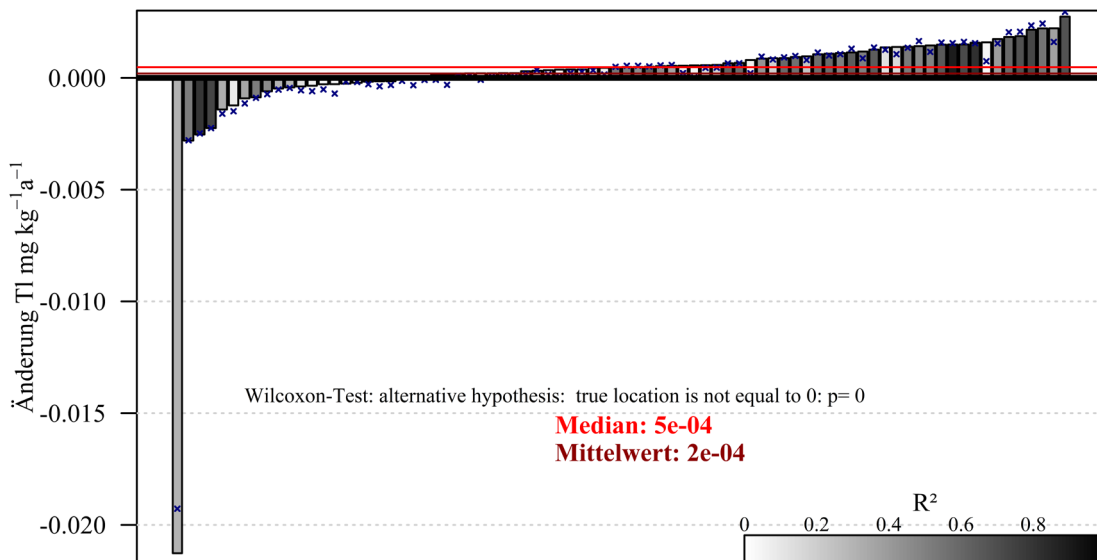


Abb. 70: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 26: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Tl-Abnahme	Tl-Zunahme
Änderung absolut	26 (33%)	54 (67%)
Trend	20 (25%)	60 (75%)
davon mit $R^2 > 0,3$	8	31
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	5	27

In den Oberböden der 80 Acker-BDF haben sich die Thallium-Gehalte im Beobachtungszeitraum lediglich um $0,00048 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Median) geändert. Hochgerechnet auf einen Zeitraum von 30 Jahren entspricht dies etwa 5 % des Mittelwertes für die Acker BDF. Eine vergleichsweise extreme Abnahme wurde für die BDF festgestellt, die als einzige einen etwa um den Faktor 10 höheren Thallium-Gehalt als die übrigen Acker BDF aufwies (**BDF 51** mit geogener Vorbelastung). Wegen dieser BDF wird auch die y-Achsenkalibrierung für die Acker-BDF in Abb. 70 stark verzerrt gegenüber der y-Achse in der analogen Grafik für die Grünland-BDF in Abb. 71. Insgesamt überwogen die geringfügigen Zunahmen des Thallium-Gehaltes (75 %) gegenüber den Abnahmen (25 %). Der gefundene Zusammenhang ist hoch signifikant (Wilcoxon-Test p-Wert: $<0,001$).

Die größte Zunahme des Thallium-Gehaltes um etwa $0,0027 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ fand auf der **BDF 76** im Landkreis Ansbach statt. Hier stiegen die Werte von $0,22 \text{ mg kg}^{-1}$ 1986 über $0,25 \text{ mg kg}^{-1}$ 2006 auf $0,31 \text{ mg kg}^{-1}$ 2016, das Bestimmtheitsmaß lag bei 0,68. Der Standort liegt in BAG-Einheit 42a (Löß, Lößlehm), weist aber die Hauptbodenart Ton auf. Dass Tl in Tonböden gehäuft vorkommt und sich während der Tonbildung vornehmlich im Oberboden aufkonzentriert (siehe Elementsteckbrief zu Tl auf S. 98) dürfte eine hinreichende Erklärung dafür sein.

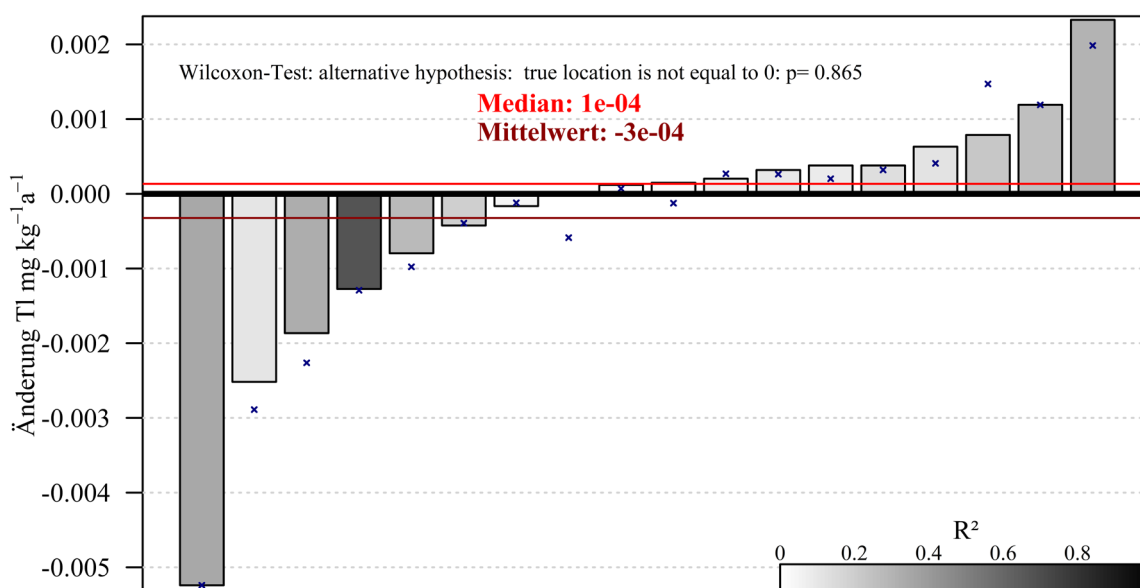
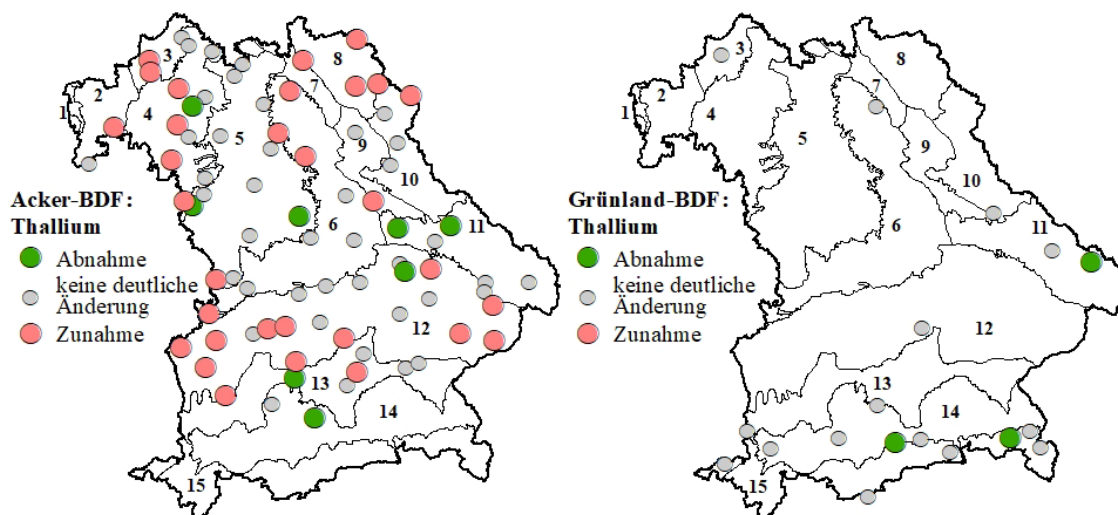


Abb. 71: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 27: Entwicklung der Tl-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	Tl-Abnahme	Tl-Zunahme
Änderung absolut	9 (50%)	9 (50%)
Trend	8 (44%)	10 (56%)
davon mit $R^2 > 0,3$	3	0

In den Oberböden der 18 Grünland-BDF haben sich die Tl-Gehalte im Beobachtungszeitraum praktisch nicht verändert (im Mittel $-0,00031$ und Median $+0,00013$ mg Tl kg^{-1} TM a^{-1}). Relativ zum Mittelwert des Thallium-Gehaltes in Oberböden der Grünland-BDF entspricht dies etwa 3 %. Zunahmen und Abnahmen hielten sich in etwa die Waage, so dass keine gerichtete Entwicklung abgeleitet werden kann. Auf drei BDF konnte ein linearer Trend mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,3 gefunden werden.



Hauptlandschaftseinheiten (Wittmann, 1991):

- | | | |
|---|---|---|
| 1 Rhein-Main-Niederung | 6 Fränkische und Schwäbische Alb | 12 Tertiärhügelland, Iller-Lechplatte und Donautal |
| 2 Spessart-Odenwald | 7 Obermain-Schollenland | 13 Schwäbisch-Bayer. Schotterplatten und Altmoränen |
| 3 Rhön | 8 Frankenwald Fichtelgebirge und Vogtland | 14 Schwäb.-Bayer. Jungmoräne und Molassevorberge |
| 4 Fränkische Platten | 9 Oberpfälzer Becken und Hügelland | 15 Bayerische Alpen |
| 5 Fränkisches und Schwäbisches Keuper-Lias-Land | 10 Oberpfälzer Wald | |
| | 11 Bayerischer Wald | |

Abb. 72: Veränderung der Tl-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend >0 & $R^2>0.3$, grün=Trend <0 & $R^2>0.3$, grau= $R^2<0.3$.

Bei Thallium haben sich die Gehalte der Oberböden im Beobachtungszeitraum vor allem auf Acker-BDF verändert. Es überwiegen dabei die Zunahmen (auf 31 BDF, von $+0,00048$ bis $+0,0027$ mg Tl kg^{-1} a^{-1}); bei 8 BDF haben die Tl-Gehalte im Oberboden zw. $-0,021$ und $-0,0006$ mg Tl kg^{-1} a^{-1} mit einer größeren Spannweite abgenommen. Aus der räumlichen Lage der Acker-BDF mit den Ab- oder Zunahmen beim Tl-Gehalt im Oberboden, lassen sich hinsichtlich der Verteilung über die Hauptlandschaftseinheiten in Bayern keine Rückschlüsse ziehen.

Bei Grünland zeigten 3 BDF Abnahmen – 2 BDF davon liegen in den Alpen und eine BDF im bayerischen Wald. Die Höhe der Ab- und Zunahmen bei den einzelnen Acker- und Grünland-BDF ist den Tab. 60 und Tab. 61 im ANHANG dieser Schrift zu entnehmen.

2.3.3.11 Uran

Kurzsteckbrief Uran [soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg⁻¹]:

Radioaktives, aber auch toxisches Schwermetall aus der Gruppe der Actinide. Ubiquitär vorkommend, natürlicher Bestandteil von Gesteinen (Magmatiten, Sedimentgesteinen - konzentrierter jedoch in intermediären und magmatischen Gesteinen). Uranisotope sind in allen drei natürlichen, radioaktiven Zerfallsreihen enthalten. Besonders hohe Gehalte in diskordant-gebundenen Lagerstätten mit durchschnittlichen Urangehalten von 0,3 bis 20 %. Das lithophile Uran tritt natürlich, nur chemisch gebunden (Wertigkeiten +IV und +VI) auf. Mittlere Uran-Gehalte in der oberen Erdkruste 1,7 - 2,5.

Typische, natürliche Hintergrundwerte in Böden: 1 (0,8) -6 (11) (Ø 3,0) (abhängig vom Bodenausgangsgestein (BAG))

Unter oxidierenden Bedingungen in sauren oder karbonatischen, wässrigen Lösungen weist U⁶⁺ hohe Löslichkeit/Mobilität auf, U⁴⁺ (reduzierende Bedingungen) besitzt hingegen nur geringe Löslichkeit. Die Rückhaltung von Uran in Böden wird wesentlich durch Sorptionsprozesse gesteuert, Lösungs-/Fällungsprozesse spielen unter aeroben Bedingungen eine untergeordnete Rolle. Neben Tonmineralen und Sesquioxiden wird Uran in Böden besonders an die organische Substanz gebunden und sorbiert; es findet sich gehäuft in Oberböden (A-Horizonten). Gerade unter den für landwirtschaftlich genutzten Böden üblichen physiko-chemischen Bedingungen mit pH-Werten im schwach sauren bis neutralen Bereich, können die U-Spezies durch Bildung von gelösten U-Huminsäurekomplexen und U-Karbonatkomplexen in der Lösungsphase stabilisiert und somit im Gegensatz zu vielen anderen Spurenelementen verstärkt (z.B. in den Unterboden und das Grundwasser) verlagert werden.

Verwendung: Kernenergie, Munition, Kernwaffen; im 19. Jahrhundert auch zum Färben von Glas und Keramik verwendet (u.a. Alltagsgegenstände wie Schüsseln und Gläser), um diesen eine gelbgrüne Farbe („annagrün“) zu geben.

Uranverbindungen sind giftig, die Toxizität wird v. a. durch deren Löslichkeit bestimmt. Uran kann biologische Systeme sowohl durch seine Radioaktivität (α -Strahler) als auch seine chemische Toxizität schädigen.

Eintragsquellen: Erzbergbau, P-Dünger sedimentärer P-Lagerstätten, geringere Gehalte auch in Klärschlämmen und meistens auch sehr geringe Gehalte in Wirtschaftsdüngern.

Mobilitäts-/Mobilisierungskriterien: pH abhängige Sorption/Desorption, Redoxpotential

Uran ist für Pflanzen nicht essenziell, es kann aber grundsätzlich über die Wurzeln aufgenommen und dort angereichert werden. Der Transferkoeffizient (Übergang Boden-Pflanze) ist mit 0,0003-0,06 (0,05) sehr niedrig, Uran wird von Pflanzen also nur in vernachlässigbarer Größenordnung aufgenommen [Spross von Sämlingen: 0,1-2,7 (Ø 0,9)]. Bei Uraufnahme durch Pflanzen ist es gegenüber den oberirdischen Pflanzenorganen vornehmlich in den Wurzeln zu finden.

Grenzwerte/Höchstgehalte: -

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermittel: -

(Hintermaier-Erhard, 1997) (Litz, 2004-2016) (Utermann, 2008) (Utermann, 2009).

Urangehalte in Böden der Acker- und Grünland-BDF nach Hauptbodenarten und typischer Hintergrundwert

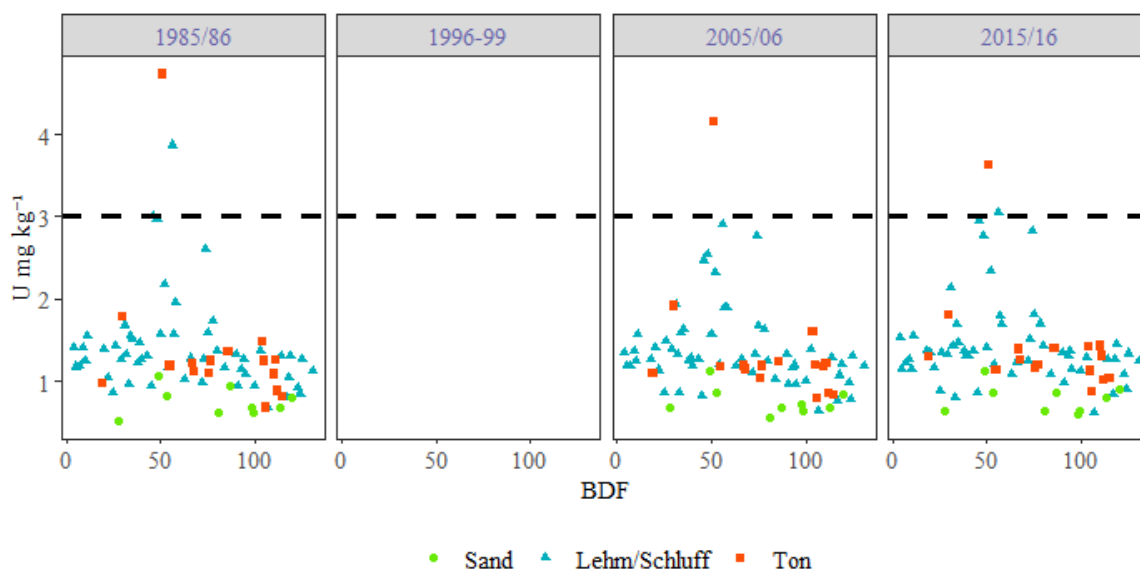


Abb. 73: U-Gehalte im Oberboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (U wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

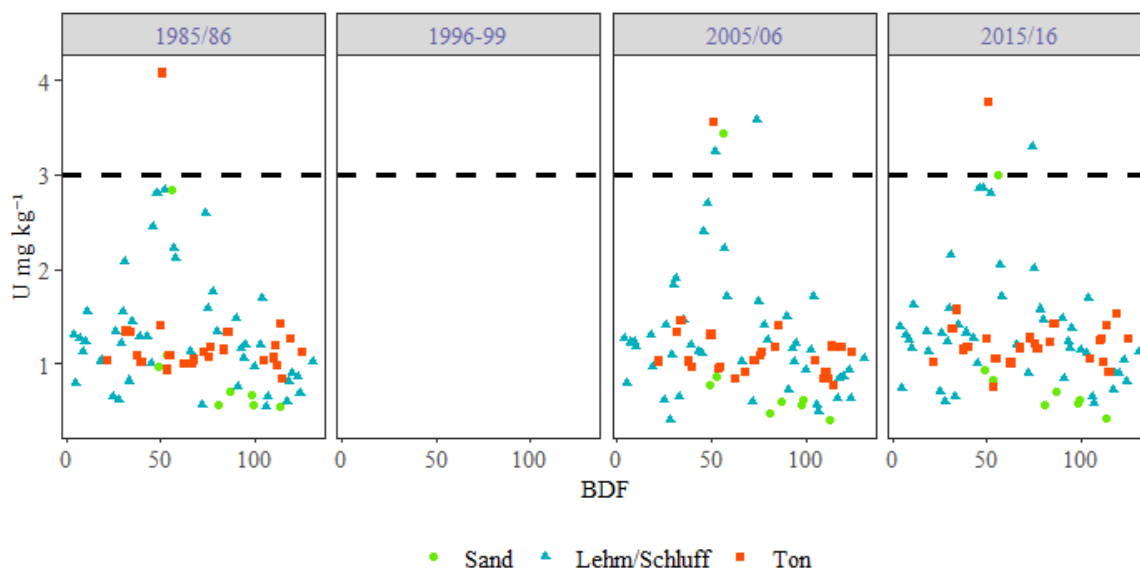


Abb. 74: U-Gehalte im Unterboden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (U wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

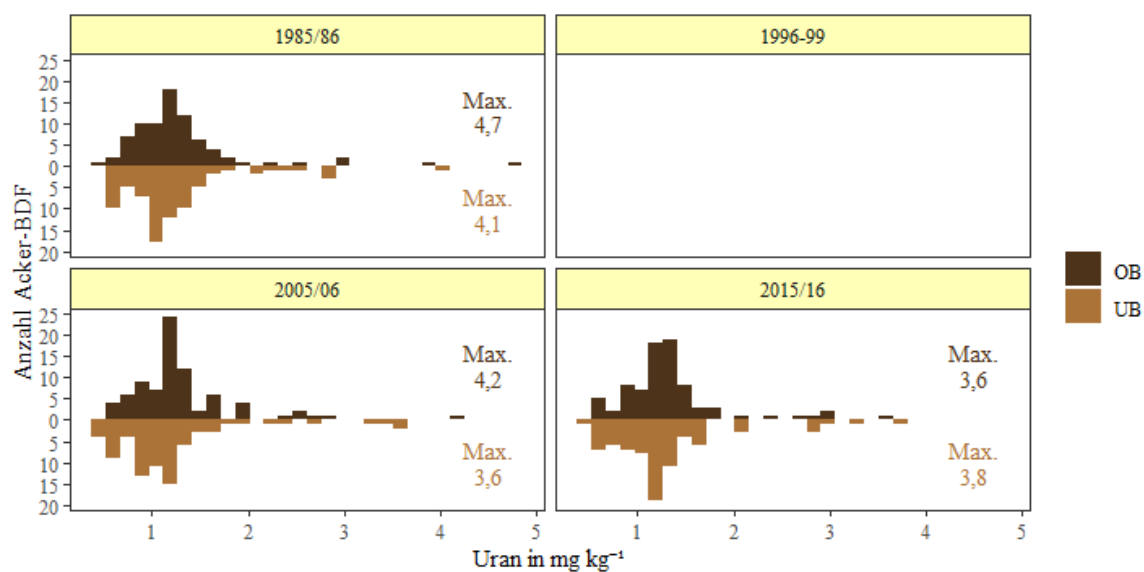


Abb. 75: Verteilung der U-Gehalte in den Ober- und Unterböden der Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt).

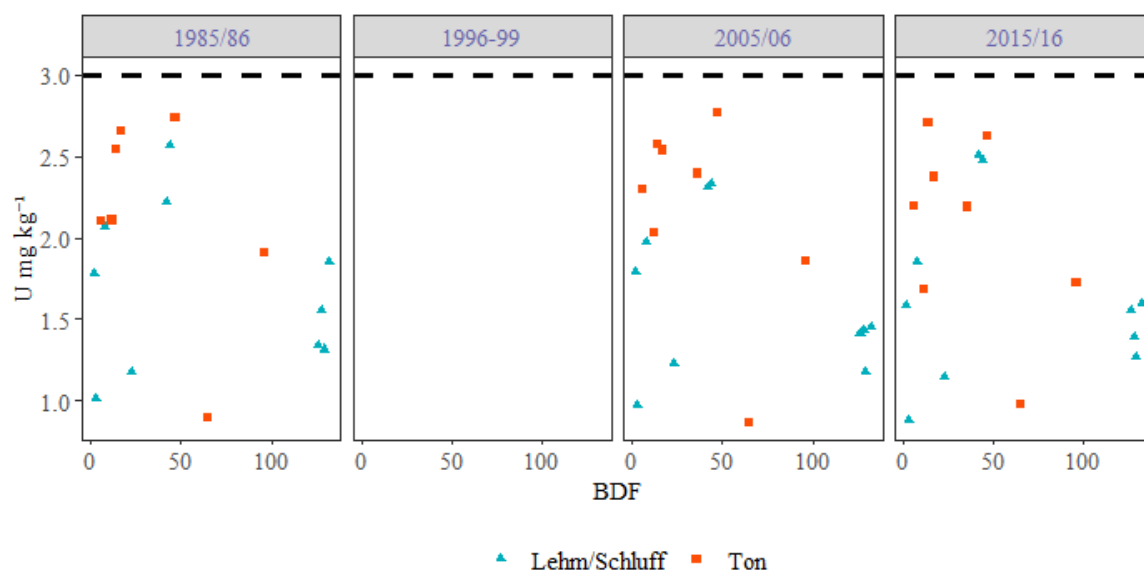


Abb. 76: U-Gehalte im Oberboden der Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum (Königswasserextrakt) im Vergleich zu einem typischen Hintergrundwert (U wurde erst ab 2005 bestimmt – Ergebnisse von 1985/86 stammen aus Nachuntersuchungen von Rückstellproben).

Die mittleren Urangelhalte in den landwirtschaftlich genutzten BDF, Bayerns sind niedrig und liegen meist im unteren Bereich der für Deutschland (s. Elementsteckbrief) angegebenen Hintergrundwerte (1-6 mg U kg⁻¹ TM Boden). Uran wird erst seit 2005 routinemäßig untersucht, von den noch vorhandenen Rückstellproben der Ersterhebung (1985-87) wurde aber eine Nachuntersuchung des Bodens im Königswasserextrakt veranlasst.

Die für die Acker-BDF im Oberboden gemessenen Urangelhalte erreichen bei **BDF 51**, einem Standort mit bekannter, geogener Vorbelastung und Hauptbodenart Ton

(Residualton, fränkische Alb) Werte von $4,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (Erstbeprobung 1987), $4,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (Beprobung 2007) und $3,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (Beprobung 2016). Werte über 3 mg kg^{-1} Boden werden mit $3,9 \text{ mg kg}^{-1}$ auch bei **BDF 56** (Erstbeprobung 1986, **BDF 56** ist ein lehmig-, schluffiger Boden und Beprobung 2015 ($3,1 \text{ mg kg}^{-1}$ TM Oberboden)) erreicht. **BDF 56** befindet sich in den westlichen Ausläufern des bayerischen Waldes und dürfte somit ebenfalls geogen Uran enthalten.

In den Unterböden der Acker-BDF wurde nur in einem Fall ein Wert größer 4 mg kg^{-1} gemessen und zwar ebenfalls bei **BDF 51** und Erstbeprobung 1986: $4,1 \text{ mg kg}^{-1}$ TM Boden. Urangelhalte über 3 mg kg^{-1} aber unter 4 mg kg^{-1} werden bei den **BDF 51** (2016), **BDF 74** (2006 und 2016), **BDF 56** (2007) und **BDF 52** (2007) erreicht. Wie **BDF 51** und **BDF 56**, sind die beiden anderen Standorte höchstwahrscheinlich auch geogen vorbelastet (**BDF 74** liegt im Fichtelgebirge, **BDF 52** im Oberpfälzer Wald).

Nach Abb. 74 und Abb. 75 gibt es leichte Hinweise darauf, dass die Urangelhalte in den Unterböden etwas geringer als in den entsprechenden Oberböden sind. Ob dies auf einen Eintrag von Uran beispielsweise der Applikation uranhaltiger Phosphatdünger sedimentärer Lagerstätten zurückzuführen ist, darf angenommen werden (Utermann, 2008 und Schnug, 2014). Im Mittel der Acker-BDF über alle Beprobungen zeigen sich aber keine Gehaltsunterschiede zwischen Ober- und Unterböden wie in Tab. 4 ersichtlich.

In den Oberböden der Grünland-BDF wurden Urangelhalte bis $2,77 \text{ mg U}$ (**BDF 47**, Beprobung 2005) gemessen, gefolgt von der Erstbeprobung 1986 dieser BDF ($2,74 \text{ mg U}$) (die **BDF 47** liegt an der Grenze Oberpfälzer zum Bayerischen Wald) und von **BDF 14** (südlich Rosenheim), Beprobung 2015 ($2,71 \text{ mg U}$). In beiden Fällen handelt es sich um Tonböden und zumindest für **BDF 47** darf eine geogene Belastung ebenfalls angenommen werden.

Entwicklung der Urangelhalte im Beobachtungszeitraum im Oberboden der Acker- und Grünland-BDF

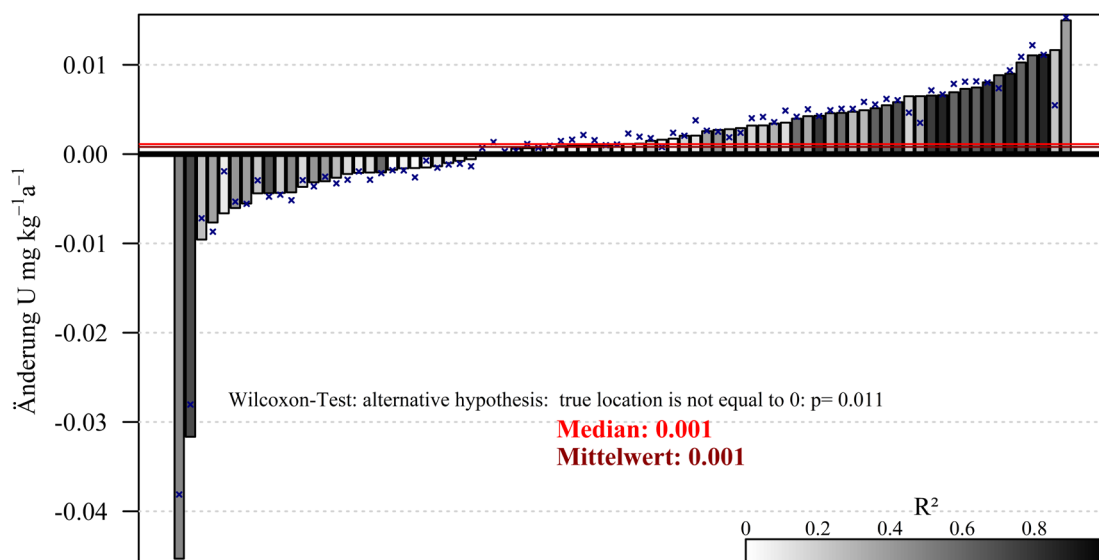


Abb. 77: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Acker-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 28: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	U-Abnahme	U-Zunahme
Änderung absolut	27 (34%)	53 (66%)
Trend	27 (34%)	53 (66%)
davon mit $R^2 > 0,3$	10	24
davon ohne Änder. d. Bodenbearbeitung	7	22

In den Oberböden der 80 Acker-BDF haben sich die Urangelhalte im Beobachtungszeitraum im Mittel um nur $0,001 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ verändert. Relativ zum Mittelwert entspricht diese Änderung nur in etwa 1,8 % in 30 Jahren. Auffällig ist die Verteilung der Änderungen auf zwei BDF, dort wurde ein, verhältnismäßig starker Rückgang beobachtet, insgesamt überwiegen allerdings die Zunahmen der Uran-Gehalte. Dies schlägt sich auch in der Test-Statistik nieder, die eine signifikante Abweichung von einer Verteilung um den Null Punkt bestätigt. Auch bei den Trends mit einer guten Erklärung ($R^2 > 0,3$) und auch bei denen ohne eine Änderung der Bodenbearbeitung zeigt sich eine deutliche Verschiebung hin zu den Zunahmen. Die hohen Abnahmen fanden auf den geogen vorbelasteten **BDF 51** und **BDF 56** mit sehr hohen Ausgangsgehalten von über 3 mg kg^{-1} statt. Die größte Zunahme der Uran-Gehalte wurde für **BDF 31** berechnet, hier waren allerdings die Schwankungen bei der ersten Probenahme 1986 relativ hoch. Dennoch erhöhten sich die Gehalte von $1,68 \text{ mg kg}^{-1}$ auf $2,14 \text{ mg kg}^{-1}$ innerhalb von 30 Jahren.

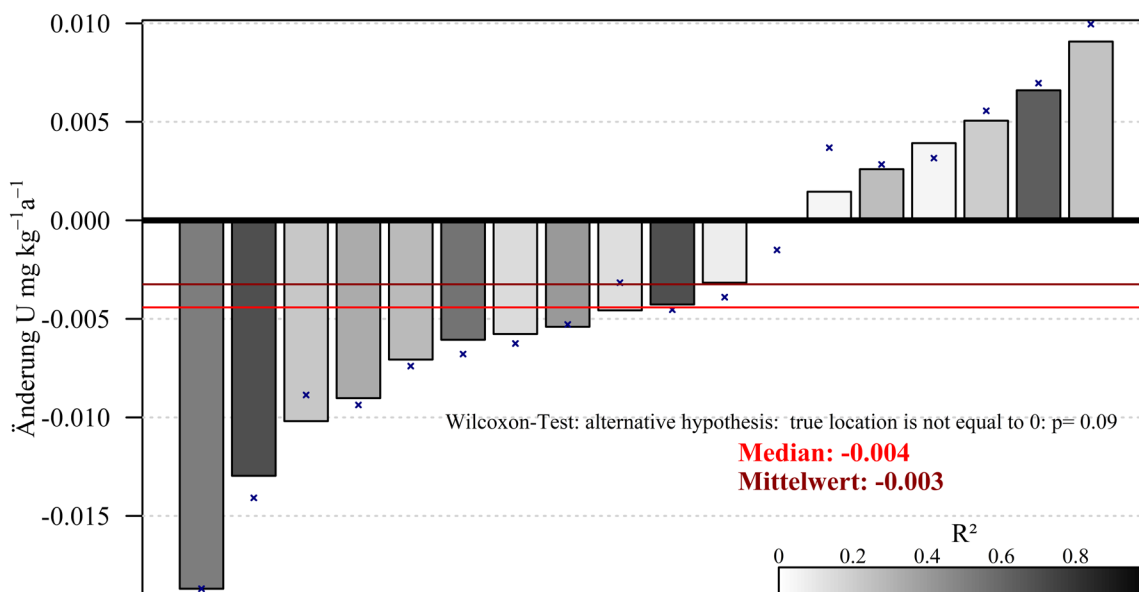


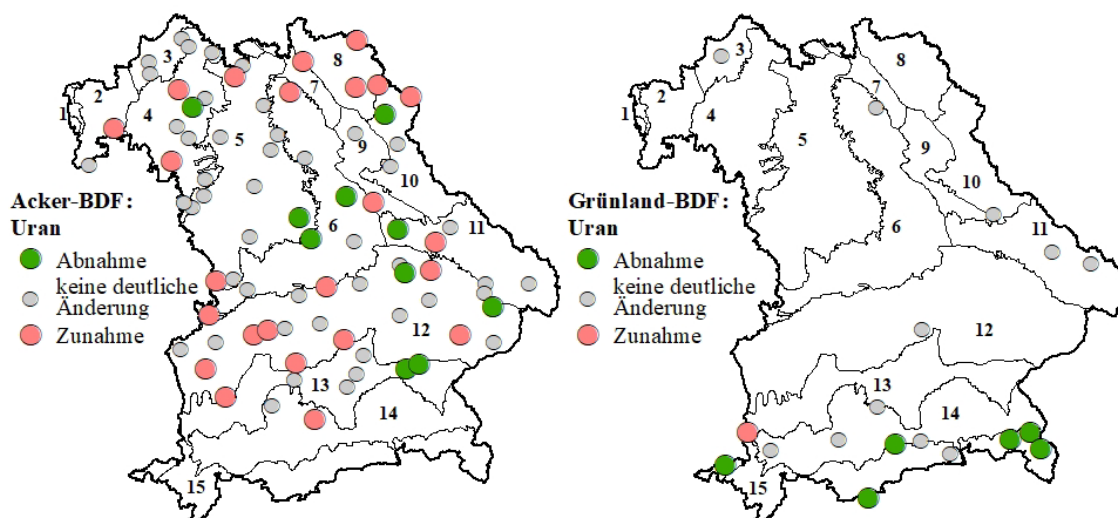
Abb. 78: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden als lineare Trends je Grünland-BDF über den Beobachtungszeitraum in $\text{mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Unterschiedliche Graustufen geben das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Regression an, x gibt die Differenz Endwert-Anfangswert an.

Tab. 29: Entwicklung der U-Gehalte im Oberboden der 18 Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum, tabellarisch.

	U-Abnahme	U-Zunahme
Änderung absolut	12 (67%)	6 (33%)
Trend	11 (61%)	7 (39%)
davon mit $R^2 > 0,3$	6	1

Die Uran-Gehalte in den Oberböden der 18 Grünland-BDF gingen auf 11 Flächen zurück und nahmen auf 7 Flächen zu. Für sieben BDF war der angepasste lineare Trend in der Lage, mehr als 30 % der Varianz der Proben zu erklären. Im Mittel der Grünland BDF ergibt sich anders als auf den Ackerflächen eine leicht abnehmende (Mittel: $-0,003 \text{ mg U kg}^{-1} \text{ TS}$; Median: $-0,004 \text{ mg U kg}^{-1} \text{ TS}$ pro Jahr) Tendenz. Über die Dauer des Beobachtungszeitraums (30 Jahre) ergibt sich rechnerisch für die Stichprobe der Grünland BDF eine Abnahme von etwa $0,064 \text{ mg kg}^{-1}$, was relativ zu den mittleren Gehalten der Grünland BDF 6% entspricht. Die Abnahmen überwogen signifikant die Zunahmen (Wilcoxon-Test: $p=0,009$).

Ein starker Rückgang trat bei **BDF 12** auf, wobei hier der stärkste Rückgang mit etwa $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$ zwischen 2005 auf 2016 stattfand. Eine Zunahme der Uran-Gehalte mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,3 ergab sich für **BDF 126** im Unterallgäu. Hier stiegen die Werte von $1,34 \text{ mg kg}^{-1}$ 1986 auf $1,55 \text{ mg kg}^{-1}$ 2016.



Hauptlandschaftseinheiten (Wittmann, 1991):

- | | | |
|---|---|---|
| 1 Rhein-Main-Niederung | 6 Fränkische und Schwäbische Alb | 12 Tertiärhügelland, Iller-Lechplatte und Donautal |
| 2 Spessart-Odenwald | 7 Obermain-Schollenland | 13 Schwäbisch-Bayer. Schotterplatten und Altmoränen |
| 3 Rhön | 8 Frankenwald Fichtelgebirge und Vogtland | 14 Schwäb.-Bayer. Jungmoräne und Molassevorberge |
| 4 Fränkische Platten | 9 Oberpfälzer Becken und Hügelland | 15 Bayerische Alpen |
| 5 Fränkisches und Schwäbisches Keuper-Lias-Land | 10 Oberpfälzer Wald | |
| | 11 Bayerischer Wald | |

Abb. 79: Veränderung der U-Gehalte im Beobachtungszeitraum in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF, rot=Trend >0 & $R^2>0,3$, grün=Trend <0 & $R^2>0,3$, grau= $R^2<0,3$.

Wie bei Cr, Ni, Tl und Zn haben sich bei Uran die Gehalte in den Oberböden der Acker-BDF innerhalb des Beobachtungszeitraums auf mehr BDF deutlich verändert als bei den

übrigen Elementen (10 Abnahmen mit einer Spanne von -0,045 bis -0,002 mg U und 24 Zunahmen mit einer Spanne von +0,0026 bis +0,015 mg U pro Jahr). Eine räumliche Differenzierung der Lage innerhalb der Acker-BDF in Bayern hinsichtlich bestimmter Hauptlandschaftseinheiten lässt sich nicht feststellen, wie es gut auf der linken der beiden Bayernkarten in Abb. 79 zu erkennen ist.

Bei den Grünland-BDF zeigten 6 BDF Abnahmen beim Urangelgehalt im Oberboden (Spanne: -0,0187 bis -0,0043 mg U a⁻¹) und eine BDF eine Zunahme (+0,0066 mg U a⁻¹, **BDF 126**), alle dieser BDF liegen in den Alpen oder dem Alpenvorland.

2.3.3.12 Zusammenschau Gesamtgehalte der ausgewählten chemischen Elemente und deren Entwicklung im 35-jährigen Beobachtungszeitraum

Zur besseren Illustration werden im folgenden Kapitel die in Kap. 2.3.3 und für die einzelnen Elemente in Kap. 2.3.3.1 bis Kap. 2.3.3.11 ausführlich beschriebenen Ergebnisse in einer Zusammenschau dargestellt. Es wird aber nicht mehr auf die einzelnen Ergebnisse und Gehaltsentwicklungen eingegangen, da sie bereits in den vorangegangenen Kapiteln umfangreich beschrieben sind.

Im Kapitel 2.3.4 wird auch auf die weiteren, im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung im Boden untersuchten und nicht ausführlich beschriebenen chemischen Elemente kurz eingegangen (siehe dort) und Ergebnisse dargestellt.

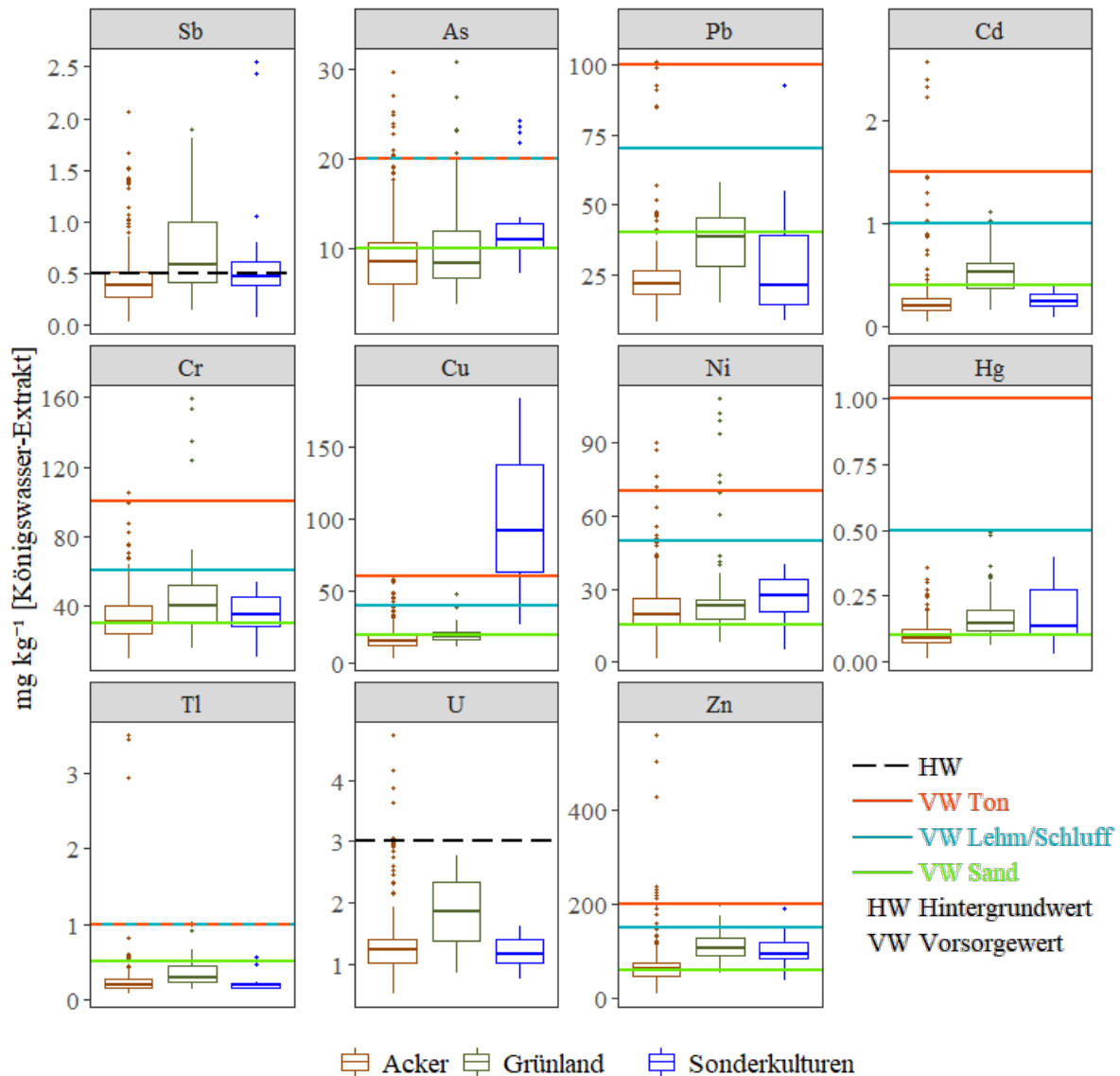


Abb. 80: Spannen der Gesamtgehalte ausgewählter Elemente in BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen – gesamter Beobachtungszeitraum (1985-2016).

Abb. 80 zeigt die Spanne der Gesamtgehalte der oben (Kap. 2.3.3.1 bis Kap. 2.3.3.11) ausführlich beschriebenen chemischen Elemente in den Oberböden der BDF als Boxplots, für die verschiedenen Nutzungen (80 Acker-BDF, 18 Grünland-BDF und 7 BDF mit Sonderkulturen) über den gesamten Beobachtungszeitraum. Es sind jedoch die Vorsorgewerte der BBodSchV für die jeweiligen Hauptbodenarten als Beurteilungsmaßstab eingezeichnet. Für Antimon und Uran sind in der BBodSchV keine Vorsorgewerte festgelegt, als Beurteilungsmaßstab sind in Abb. 80 deshalb typische Hintergrundwerte eingezeichnet.

Tab. 30: Anzahl BDF mit/ohne Vorsorgewert(VW)-Überschreitungen im Oberboden.

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
Arsen	5	3	0	72	2	1	-	15	-	1	0	6
Blei	1	1	0	78	0	0	0	18	-	1	0	6
Cadmium	1	0	4	75	0	0	5	13	-	0	0	7
Chrom	0	4	0	76	1	0	-	17	-	0	0	7
Kupfer	0	2	0	78	0	1	-	17	-	6	1	0
Nickel	1	1	14	64	0	2	7	9	-	0	1	6
Quecksilber	0	0	4	76	0	0	-	18	-	0	0	7
Thallium	1	0	0	79	1	0	-	17	-	0	0	7
Zink	2	2	11	65	0	3	7	8	-	2	2	3

- Bodenart für Nutzung nicht besetzt

Tab. 30 zeigt für diejenigen 9 Elemente, für die in der BBodSchV oder der Novelle dazu (MantelV, 2021) Vorsorgewerte(VW) festgelegt sind, die Anzahl der VW-Überschreitungen bei BDF für die jeweiligen Nutzungen und Hauptbodenarten im gesamten Beobachtungszeitraum, noch einmal als Gesamttabelle auf.

Die Nickel- und Zink-Gehalte weisen für Acker- und Grünland BDF den höchsten Anteil an BDF mit Vorsorgewertüberschreitungen auf.

Bei den Sonderkulturen war auf allen BDF zu mindestens einem Beprobungstermin eine Überschreitung der Vorsorgewerte für Kupfer festzustellen.

Werden Vorsorgewerte überschritten, besteht nach §9 BBodSchV die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung. Bestätigt hingegen ist eine solche nicht, ggf. bedarf es dazu weiterer Prüfungen; die höheren Bodengehalte lassen sich häufig aber auch aus dem geogenen (natürlichen) Grundgehalt eines Bodens begründen.

Vorsorgewert-Überschreitungen bei Böden mit naturbedingt und großflächig siedlungsbedingt erhöhten Hintergrundgehalten sind unbedenklich, soweit eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen (z.B. Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung) erwarten lassen.

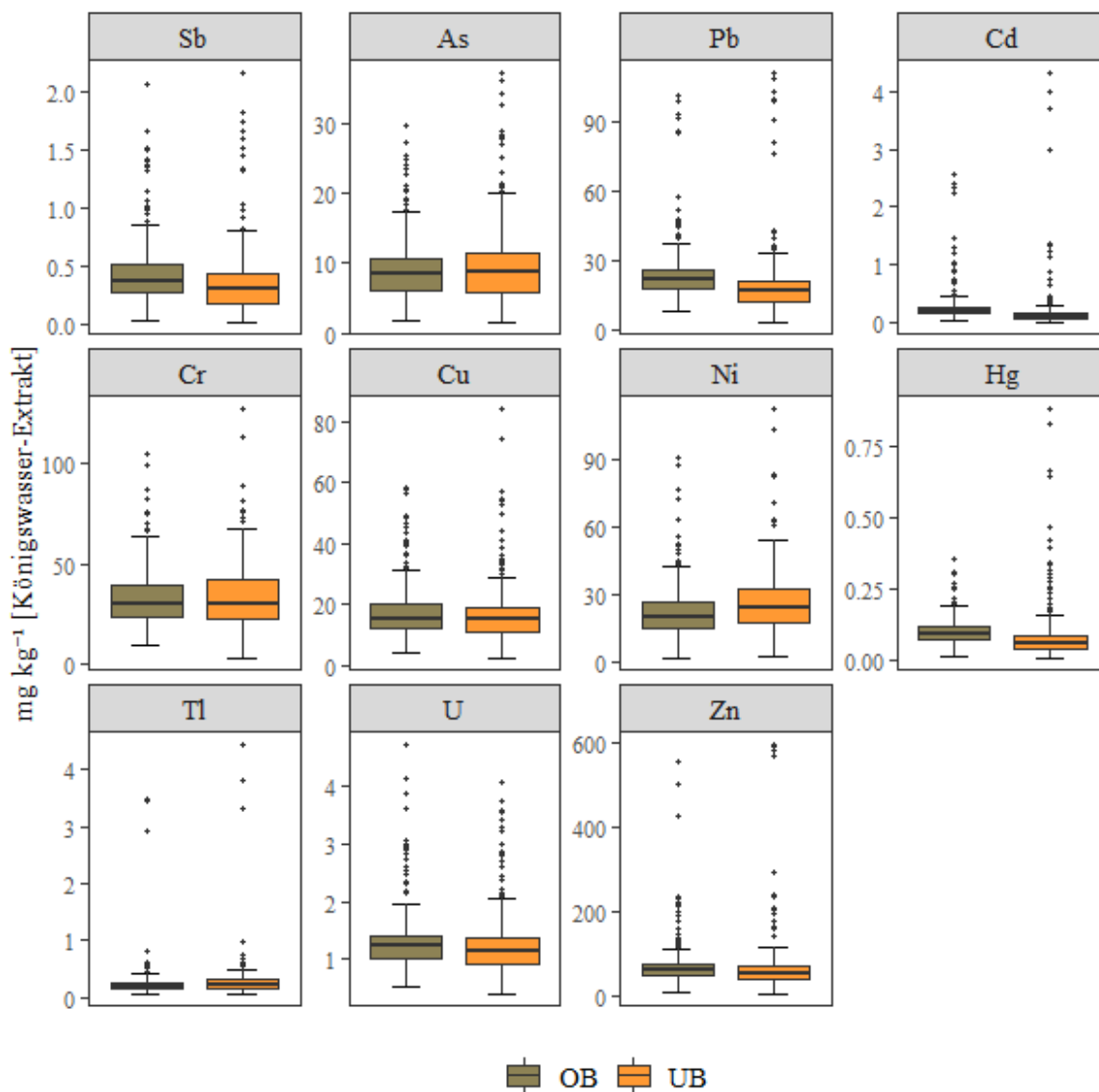


Abb. 81: Gesamtgehalte ausgewählter Elemente in Böden der 80 Acker-BDF (Vergleich Ober- und Unterböden) – gesamter Beobachtungszeitraum (1985-2016).

Wie hoch im Beobachtungszeitraum die Gehalte bei Acker-BDF im Vergleich der Ober- und Unterböden insgesamt im Durchschnitt sind, zeigt Abb. 81 nochmals. Für die einzelnen Elemente und Serien wurden die Unterschiede ausführlich bereits in den vorhergehenden Kapiteln 2.3.3.1 bis 2.3.3.11 beschrieben und diskutiert (siehe dort).

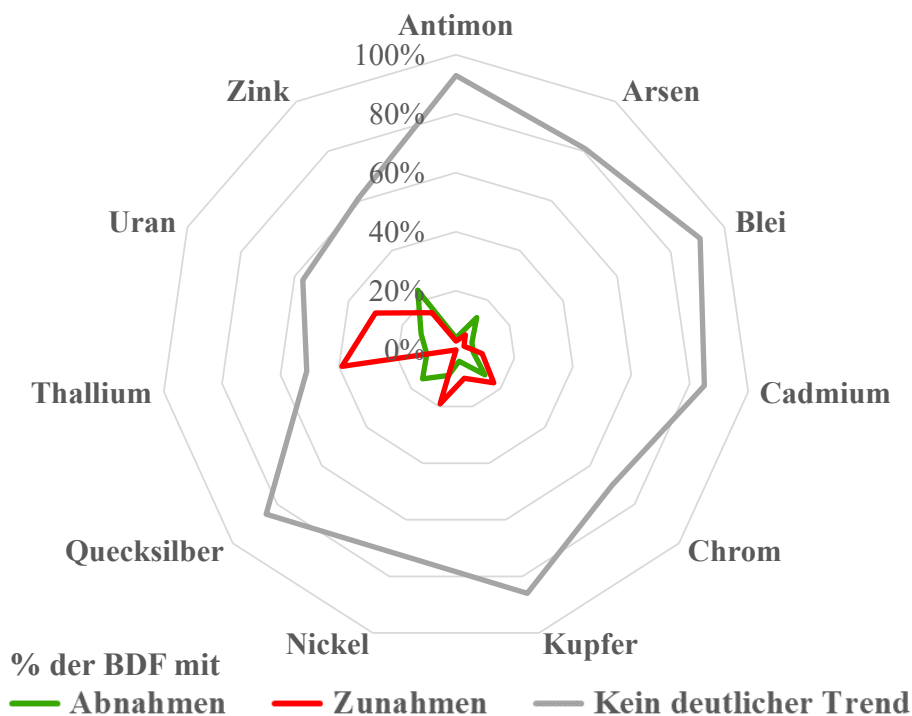


Abb. 82: Entwicklung der Gesamt-Gehalte ausgewählter anorganischer Stoffe im Oberboden der 80 Acker-BDF seit 1985.

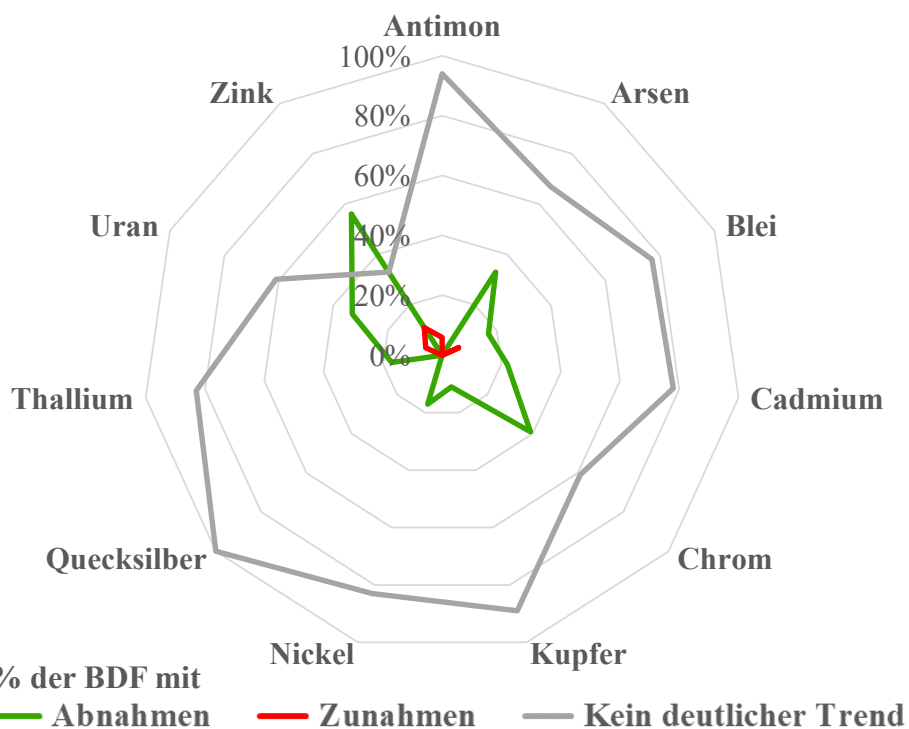


Abb. 83: Entwicklung der Gesamt-Gehalte ausgewählter anorganischer Stoffe im Oberboden der 18 Grünland-BDF seit 1985.

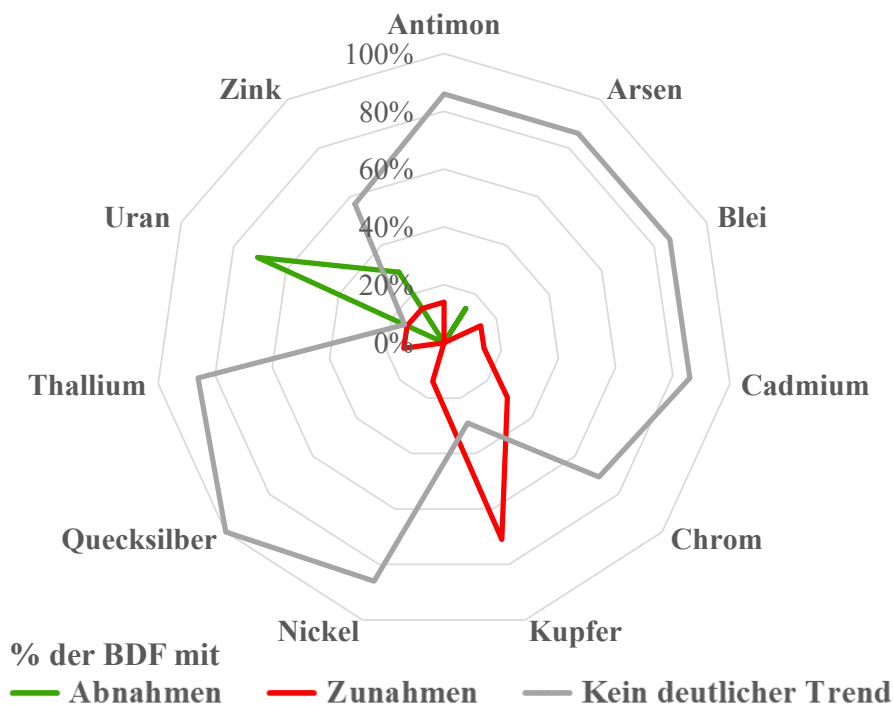


Abb. 84: Entwicklung der Gesamt-Gehalte ausgewählter anorganischer Stoffe im Oberboden der 7 Sonderkultur-BDF (3 Hopfen-, 1 Obst-, 3 Wein-BDF) seit 1985.

Die Abb. 82 bis Abb. 84 zeigen die Entwicklungen (Veränderungen) der Gehalte in den Oberböden während des 35-jährigen Beobachtungszeitraum noch einmal in einer etwas anderen grafischen Darstellung und als Zusammenschau für die einzelnen Nutzungen der BDF (Acker, Grünland, Sonderkulturen). Ausführlich wird in den Kapiteln 2.3.3.1 bis 2.3.3.11 auf die Gehaltsentwicklungen eingegangen. Abb. 84 stellt die besondere Bedeutung des Kupfers bei Sonderkulturen heraus, wo im Beobachtungszeitraum infolge regelmäßiger Kupferspritzungen bei 5 von den 7 Sonderkultur-Flächen Gehaltzunahmen (=71 % der BDF) zu beobachten waren.

2.3.3.13 Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Gesamtgehalte der ausführlich beschriebenen Elemente in Oberböden der Acker-BDF

Für eine Analyse der Ursachen, die für die beobachteten Veränderungen der Gesamtgehalte der in Kap. 2.3.3, ausführlich beschriebenen 11 Elemente im Oberboden der Acker-BDF verantwortlich sind oder diese beeinflussen, wurden zahlreiche Bewirtschaftungsfaktoren herangezogen und ausgewertet (siehe Band 1).

Als wichtiger Faktor, der Gehaltsveränderungen von Stoffen im Boden verursachen kann, ist v.a. die Änderung der Bodenbearbeitung zu nennen. Die Durchmischung von Bodenhorizonten, also mehr Unterbodenmaterial wird bei tieferer Bodenbearbeitung in den Oberböden eingebracht oder weniger Einmischung erfolgt bei pflugloser Bewirtschaftung, führt je nach Gehalt im Ober- oder Unterboden zu einer Verdünnung oder einer Erhöhung der Stoffgehalte im Oberboden. Die Gesamtmengen im Boden können hierbei unverändert bleiben. Bei 16 statistisch ausgewählten Acker-BDF (Methode ist in Kap. 4 von Band 1 ausführlich beschrieben), das sind die BDF 26, 30, 31, 35, 40, 51, 53, 56, 66, 80, 87, 91, 94, 107, 124 und 125, wurde im Beobachtungszeitraum (1985-2018) verstärkt auf wendende Bodenbearbeitung verzichtet und auf reduzierte/konservierende Bodenbearbeitung oder vermehrten Grasanbau umgestellt (s. Abb. 85).

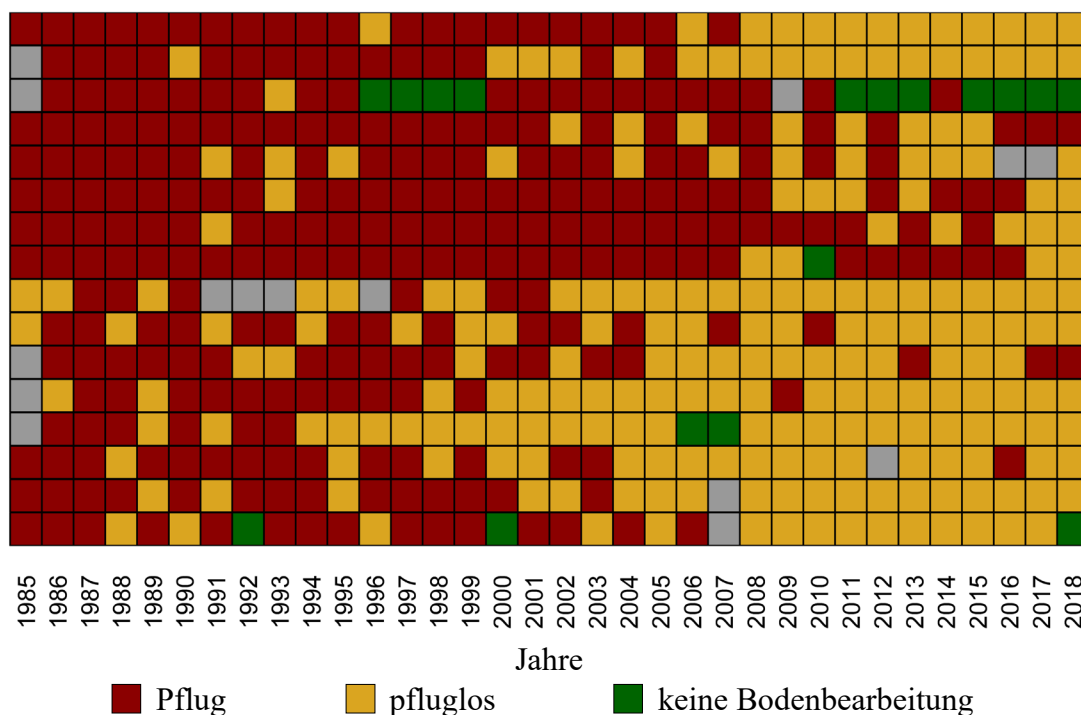


Abb. 85: 16 statistisch ausgewählte Acker-BDF mit im Beobachtungszeitraum geänderter Bodenbearbeitung

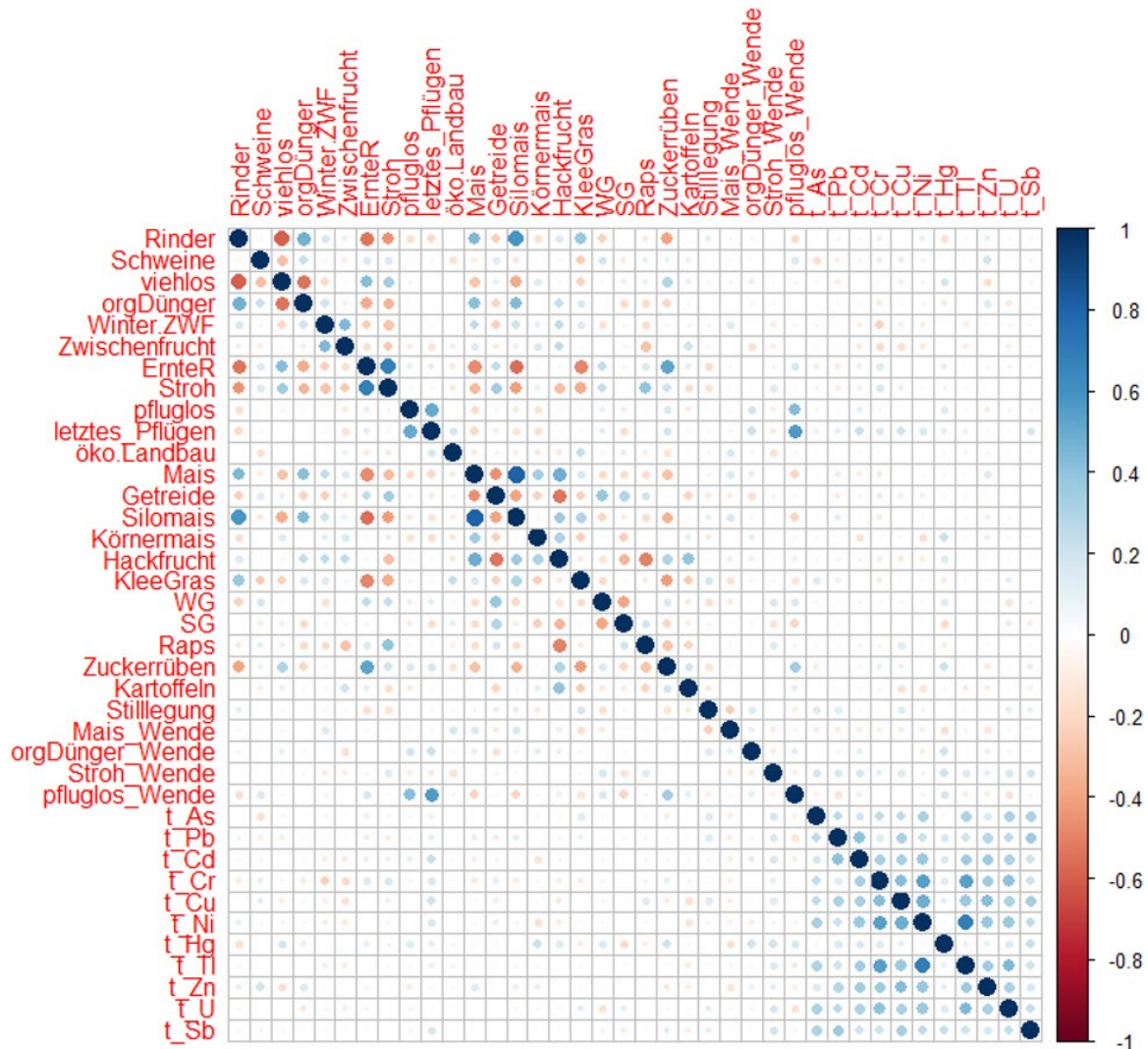


Abb. 86: Korrelationsmatrix verschiedener Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Gesamtgehalte 11 ausgewählter Elemente in den Oberböden der 80 Acker-BDF im Beobachtungszeitraum (angegeben ist der jeweilige Rangkorrelationskoeffizient nach Kendall-Tau).

Die Korrelationen wurden mittels des Rangkorrelationskoeffizienten Kendall-Tau berechnet, da er für nicht normalverteilte Werte verwendet werden kann und bei auftretenden Bindungen (identische Werte bei der Bildung von Rängen) eine robustere Methode darstellt.

Wie aus Abb. 86 und Abb. 87 ersichtlich, hat die verstrichene Zeit nach dem letzten Pflugeinsatz (Faktor „pfluglos_Wende“) keinen großen Einfluss auf die Entwicklung der Gehalte der 11 Schadstoffe in den Oberböden der Acker-BDF. Das trifft auch für den Anteil an Jahren ohne Pflügen (Faktor „pfluglos“) zu. Insgesamt konnte kein relevanter Zusammenhang zwischen Bewirtschaftungsparametern und der Entwicklung der anorganischen Schadstoffgehalte im Oberboden der 80 Acker-BDF festgestellt werden.

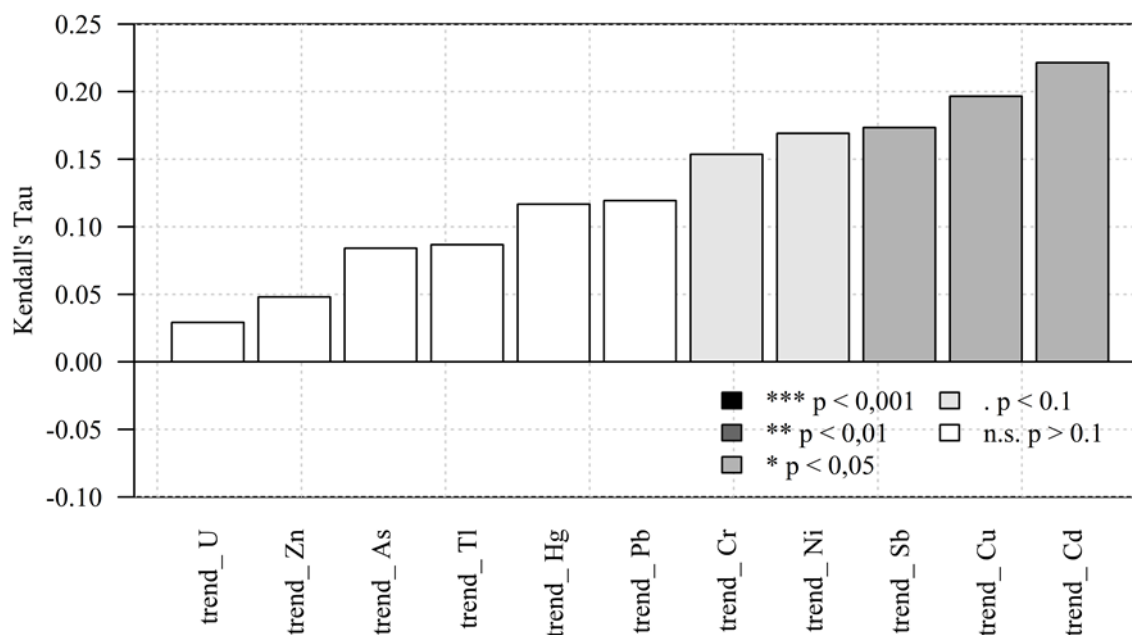


Abb. 87: Korrelation der Entwicklung der Schadstoffgehalte im Oberboden der Acker-BDF mit der verstrichenen Zeit seit dem letzten Pflugeinsatz (bis zur letzten Probenahme) (Korrelationsmaß Kendall-Tau, eingefärbt nach Signifikanz).

Für die verstrichene Zeit nach dem letzten Pflugeinsatz gibt es keinerlei Hinweise, dass sich bei langjährigem Pflugverzicht die Gehalte im Oberboden verringern würden (z.B. durch verringerte Einmischung von Unterbodenmaterial). 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 Pflugverzichts 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 Ap homogen verteilte Corg reichert sich nach Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitungstiefen im oberen Bereich der Ackerkrume (0-10 cm) an (s. a. Kap. 3.3.1.2 in Band 4). Sowohl Sb und Cd als auch Cu weisen eine starke Affinität zur organischen Substanz im Boden auf, was obigen Zusammenhang erklären könnte.

Einfluss der organischen Düngung mit tierischen Wirtschaftsdüngern von Rind oder Schwein auf die Kupfer- und Zinkgehalte in Oberböden ausgewählter Acker-BDF

Weil Kupfer dem Tierfutter von Rind und Schwein als antibiotisch wirkender Futtermittelzusatz gezielt zugefügt wird (s. a. Kap. 3.1), wurde der Frage nachgegangen, ob sich durch org. Düngung mit Ausscheidungsprodukten von Rind und Schwein (Gülle bzw. Mist/Jauche), die Gehalte an Kupfer in den Oberböden der BDF gegenüber nicht mit org.-tierisch gedüngten Flächen im Beobachtungszeitraum erhöhen würden (s. Abb. 88 und Tab. 31).

Dazu wurden von den 80 Acker-BDF, diejenigen Acker-BDF ausgewählt, wo aus den Schlagdaten klar ersichtlich war, dass im Beobachtungszeitraum mindestens 4 Jahre überwiegend mit Schweinedüngung (Gülle oder Mist/Jauche) (n=6 BDF) bzw. überwiegend mit Rinderdung (n=28 BDF) organisch gedüngt wurde und wo im Beobachtungszeitraum überhaupt keine organische Düngung mit tierischen Ausscheidungsprodukten stattfand (n=14 BDF).

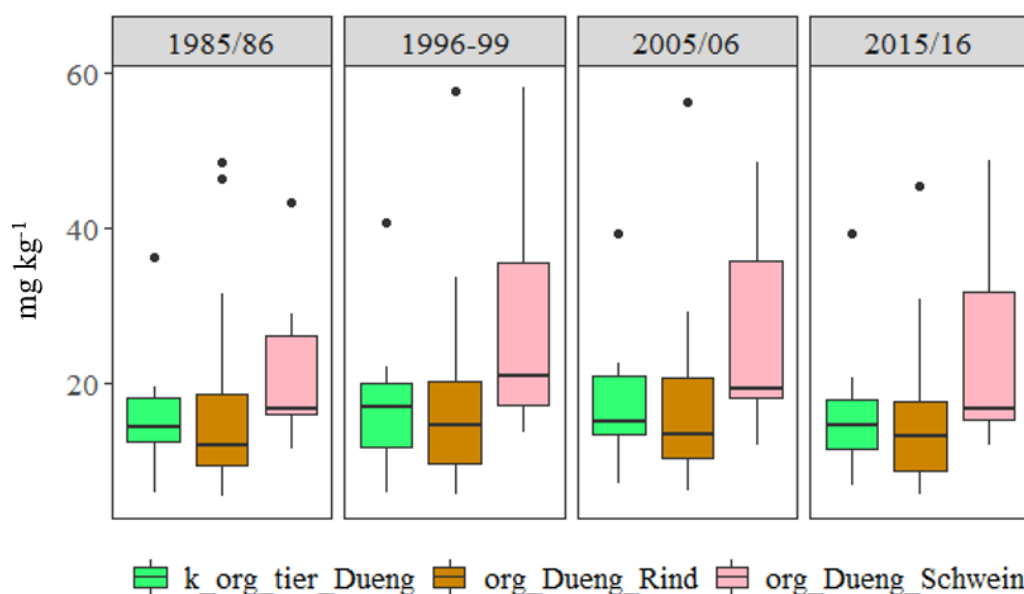


Abb. 88: Cu-Gehalte in BDF-Oberböden ausgewählter Acker-BDF ohne (grüne Boxplots, $n=14$ BDF) und mit organischer Düngung von Rind ($n=28$) oder Schwein ($n=6$).

Tab. 31: Medianwerte Kupfer in BDF-Oberböden von Acker-BDF mit und ohne organische Düngung von Rind oder Schwein [mg kg^{-1}].

Beprobung	Keine organisch-tierische Düngung ($n=14$ Acker-BDF)	Mindestens 4 Jahre organische Düngung vom Rind ($n=28$ Acker-BDF)	Mindestens 4 Jahre organische Düngung vom Schwein ($n=6$ Acker-BDF)
1985/86	14,4	12,0	16,7
1996-99	17,0	14,8	21,1
2005/06	15,1	13,4	19,4
2015/2016	14,7	13,2	16,8

Wie in Abb. 88 und Tab. 31 ersichtlich, sind die Kupfergehalte in Oberböden von Acker-BDF, auf denen im Beobachtungszeitraum mindestens für 4 Jahre überwiegend mit Schweinedüngung (Gülle oder Mist/Jauche) organisch gedüngt wurde, durchschnittlich höher als bei Acker-BDF ohne organische Düngung mit tierischem Dung. Dies trifft für Acker-BDF mit organischer Düngung überwiegend vom Rind (Rindergülle, Rindermist oder -jauche) jedoch nicht zu. Weiter ist zu beobachten, dass im Beobachtungszeitraum, die Cu-Gehalte im Oberboden der 6 Acker-BDF mit organischer Düngung überwiegend vom Schwein, nicht zugenommen haben und um einen Medianwert von rd. 18 mg Cu kg^{-1} Boden herum pendeln.

Weil auch Zink dem Tierfutter von Rind- und Schwein zugesetzt wird, findet es sich auch gehäuft im Oberboden von Acker-BDF wieder, die organisch mit Ausscheidungsprodukten von Rind oder Schwein (Gülle, Mist und Jauche) gedüngt wurden, wie Abb. 89 und Tab. 30 zeigen.

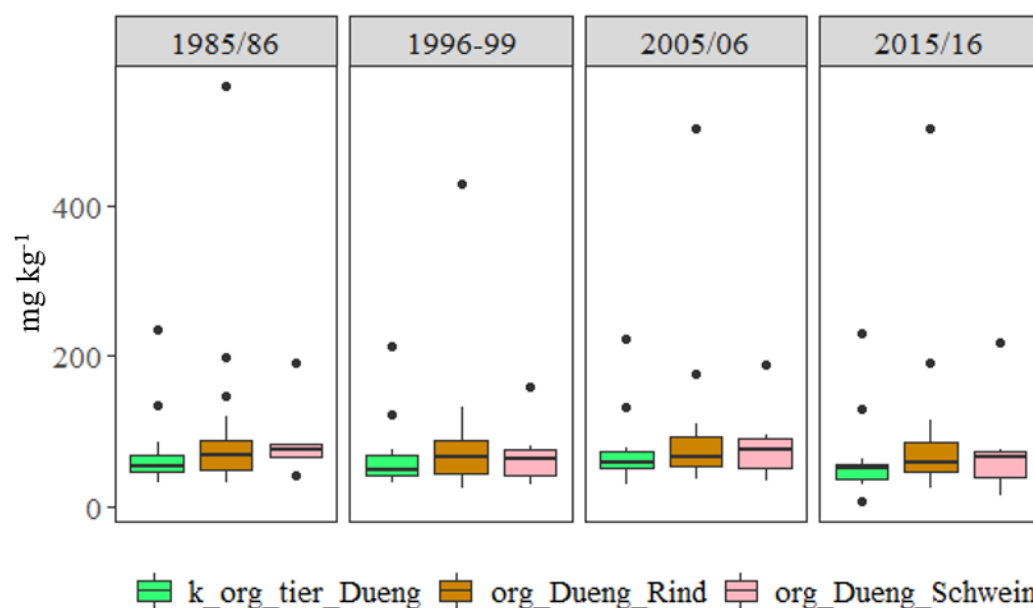


Abb. 89: Zn-Gehalte in BDF-Oberböden ausgewählter Acker-BDF ohne (grüne Boxplots, $n=14$ BDF) und mit organischer Düngung von Rind ($n=28$) oder Schwein ($n=6$).

Tab. 32: Medianwerte Zink in BDF-Oberböden von Acker-BDF mit und ohne organische Düngung von Rind oder Schwein [mg kg^{-1}].

Beprobung	Keine organisch-tierische Düngung ($n=14$ Acker-BDF)	Mindestens 4 Jahre organische Düngung vom Rind ($n=28$ Acker-BDF)	Mindestens 4 Jahre organische Düngung vom Schwein ($n=6$ Acker-BDF)
1985/86	55,3	68,2	75,0
1996-99	49,9	66,9	64,0
2005/06	58,3	65,6	76,7
2015/2016	51,2	60,0	66,3

Wie Tab. 32 zeigt, weisen BDF ohne organische Düngung mit Wirtschaftsdüngern von Rind oder Schwein im Median niedrigere Zinkgehalte im Oberboden auf als BDF, wo im Beobachtungszeitraum mindestens für 4 Jahre organisch mit Rindergülle/-mist/-jauche oder Schweinegülle/-mist/-jauche gedüngt wurde.

Einen schwach positiven Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Zinkgehalte und der Haltung von Schweinen zeigt auch die Korrelationsmatrix in Abb. 86. Für Kupfer oder die Rinderhaltung zeigt sich ein solcher Zusammenhang jedoch nicht oder nicht so ausgeprägt. Insgesamt auch scheinen die verschiedenen Bewirtschaftungsparameter nur einen geringen Einfluss auf die Entwicklung der Gehalte in den Oberböden der Acker-BDF zu haben (s. Abb. 86).

Auch die Änderung der organischen Düngung im Beobachtungszeitraum (Faktor „orgDünger_Wende“) scheint nur einen geringen Einfluss auf die Entwicklung der Gesamtgehalte der 11 ausgewählten Elemente im Oberboden der Acker-BDF zu haben (s. Abb. 1).

Der Anteil an Jahren mit ökologischem Landbau (Faktor öko.Landbau) hat ebenfalls nur einen sehr geringen Einfluss auf die Entwicklung der Schadstoffgehalte der 11 Elemente im Oberboden der Acker-BDF wie Abb. 86 zeigt.

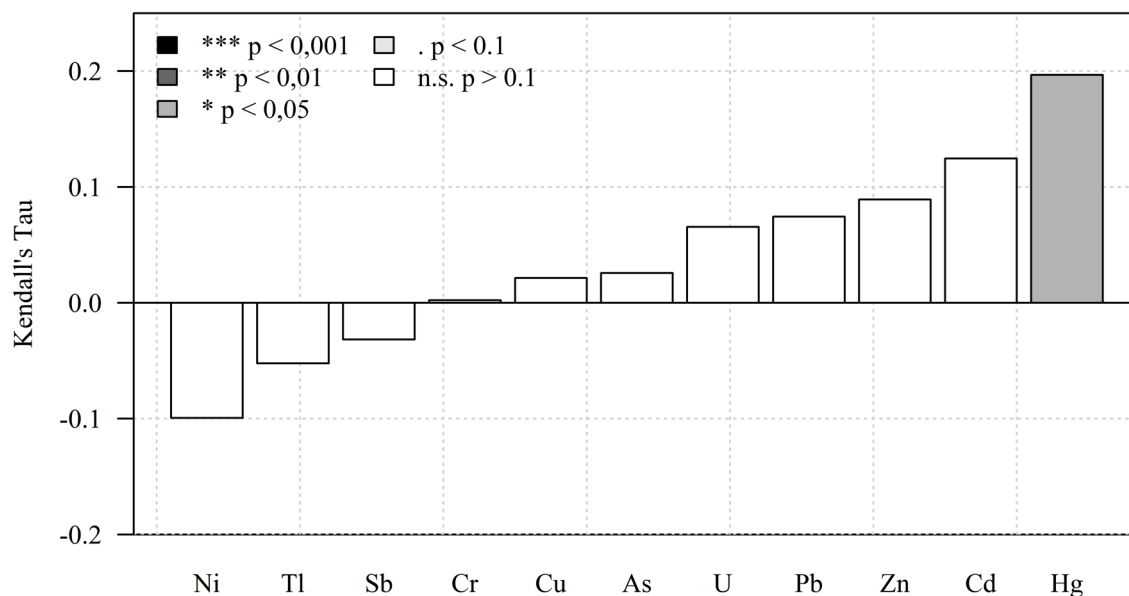


Abb. 90: Korrelation „orgDünger_Wende“ (Korrelationsmaß Kendall-Tau) für die verschiedenen Elemente eingefärbt nach Signifikanz (Graufärbung) für einen Wechsel bei der organischen Düngung im Beobachtungszeitraum.

Nach Abb. 90 bedeutet das, dass die Hg-Gehalte weniger stark auf Flächen zurückgehen, auf denen die organische Düngung im Untersuchungszeitraum verstärkt wurde.

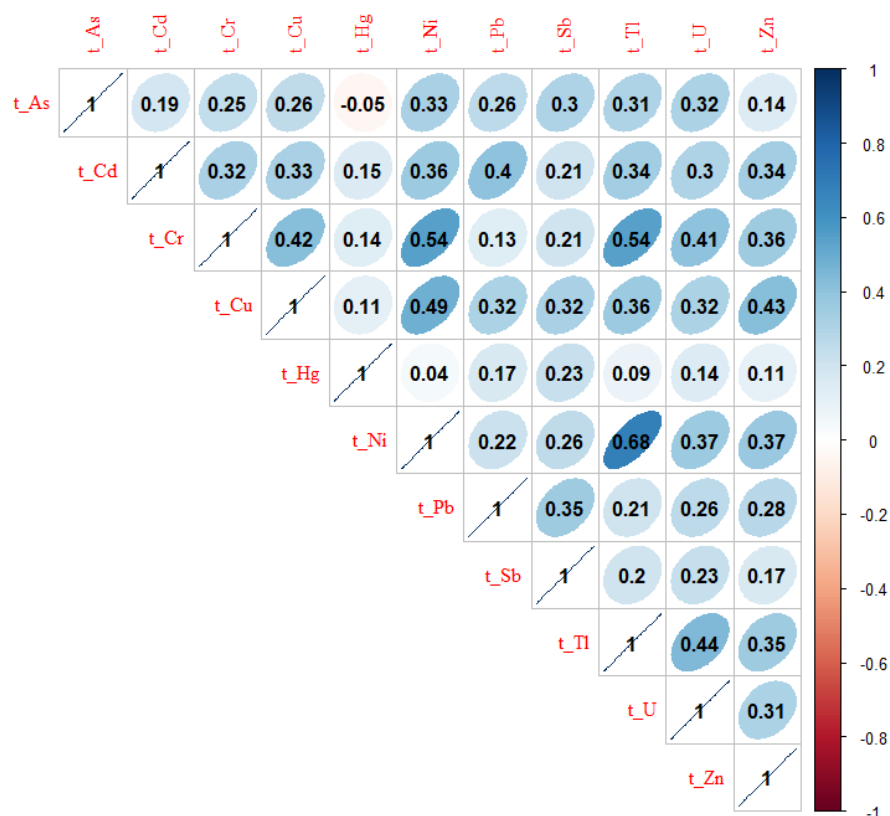


Abb. 91: Korrelationsmaße (Kendall-Tau) für die Interkorrelation der Entwicklung der Elementgesamtgehalte (Trends) im Beobachtungszeitraum für 11 ausgewählte chemische Elemente in den Oberböden der 80 Acker-BDF.

Wie Abb. 91 aber zeigt, sind die zeitlichen Entwicklungen der linearen Trends für die 11 ausgewählten Elemente in den Oberböden der 80 Acker-BDF zueinander (Interkorrelation) durchwegs positiv korreliert (jede Ellipse zeigt von links unten nach rechts oben und jede ist blau (=positiver Wert) eingefärbt). Jedoch ist die Stärke der positiven Korrelationen unterschiedlich, wie der in Abb. 91 angegebene r-Wert und die Breite der dargestellten Ellipse zeigen.

Besonders stark positiv korreliert sind die zeitliche Entwicklung der Nickelgehalte mit der Entwicklung der Thallium- ($r = +0,68$) und Chrom-Gehalte ($r = +0,54$), sowie die Entwicklung der Chrom- mit der Entwicklung der Thalliumgehalte ($r = +0,54$).

Die positive Korrelation der Entwicklung der Gesamtgehalte von Chrom und Nickel deutet auf deren Vergesellschaftung in den Mineralien des Bodens hin. Weil Thallium zu den lithophilen Elementen gehört, darf eine Vergesellschaftung mit Cr- und Ni-enthaltenden Mineralien ebenfalls angenommen werden.

Den geringsten Zusammenhang mit der Entwicklung anderer Schadstoffe im Boden konnte für die Quecksilber-Gehalte im Oberboden festgestellt werden, wie Abb. 91 zeigt.

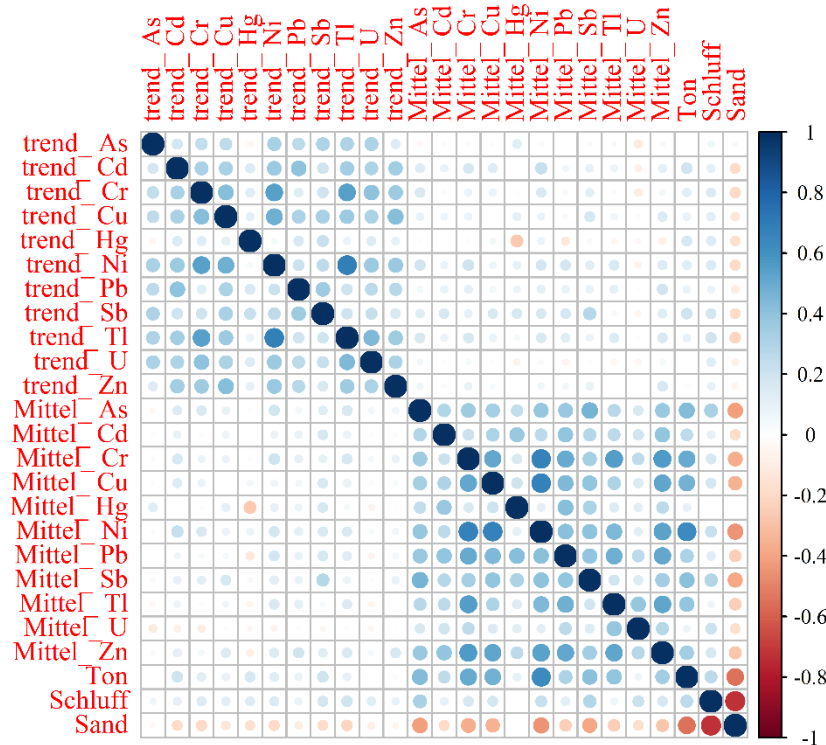


Abb. 92: Korrelationsmatrix (Kendall-Tau) für die Korrelation der Trends und Mittelwerte und der Bodenart (11 ausgewählte chemische Elemente in Oberböden der Acker-BDF).

Abb. 92 zeigt für die mittleren Gesamtgehalte von 11 ausgewählten chemischen Elemente im Königswasserextrakt der Oberböden der 80 Acker-BDF eine negative Korrelation zum Sandgehalt des Bodens. Am schwächsten ausgeprägt ist diese Korrelation bei Quecksilber. Für die Hauptbodenarten Lehm/Schluff und noch stärker für Tonböden, besteht jedoch eine positive Korrelation.

Insgesamt viel schwächer als im ersten Fall ausgeprägt aber in dieselbe Richtung weisend, ist die Korrelation zwischen der Entwicklung (Trends) der Gesamtgehalte zum Sand- bzw. Tongehalt des Bodens.

2.3.4 Gehalte sonstiger chemischer Elemente im Boden

Im folgenden Kapitel werden die Gesamtgehalte (bestimmt im Königswasserextrakt des Bodens) der weiteren, im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung im Boden untersuchten und nicht ausführlich und näher beschriebenen chemischen Elemente kurz dargestellt. Eine weitere Auswertung oder ausführliche Beschreibung der Ergebnisse oder der Gehaltsentwicklungen bzw. eine Interpretation der Ergebnisse erschien uns nicht sinnvoll. Das liegt zum einen an der geringeren Relevanz dieser Elemente aus Sicht des Bodenschutzes aber auch daran, dass von bestimmten Untersuchungsparametern bzw. chemischen Elementen nur von einzelnen Beprobungen Messwerte vorliegen und zeitliche Entwicklungen und Veränderungen sich so noch nicht ablesen lassen.

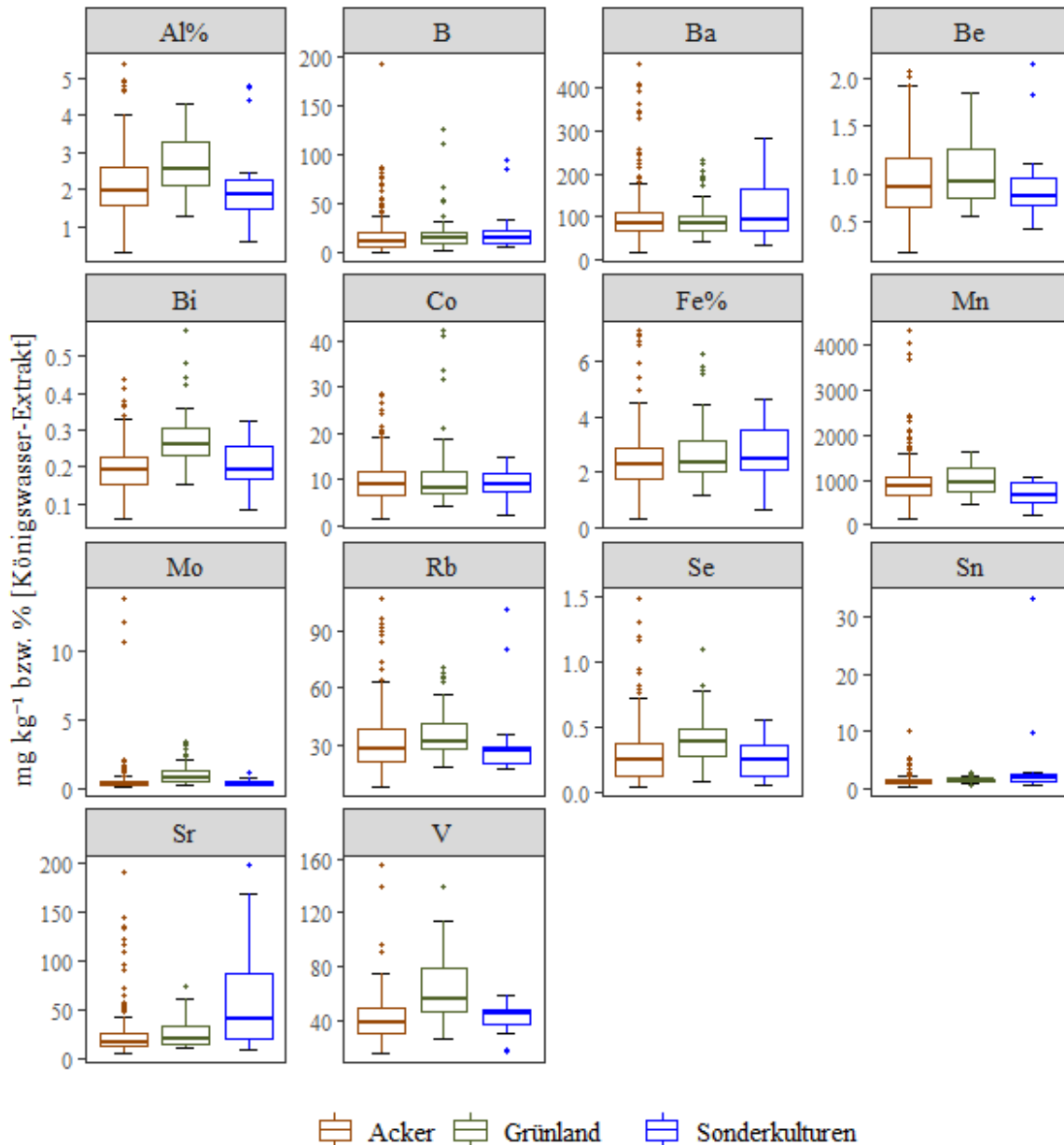


Abb. 93: Gesamtgehalte weiterer Elemente in BDF-Oberböden für verschiedene Nutzungen im Beobachtungszeitraum (1985-2016).

Abb. 93 gibt einen Überblick der Gesamtgehalte (Spannweite) der weiteren 14 chemischen Elemente in Oberböden der BDF für die einzelnen Nutzungen im gesamten Beobachtungszeitraum.

Wie hoch die Gesamtgehalte dieser Elemente jeweils in den Ober- und Unterböden bei den 80 Acker-BDF im gesamten Beobachtungszeitraum sind, gibt Abb. 94 wieder.

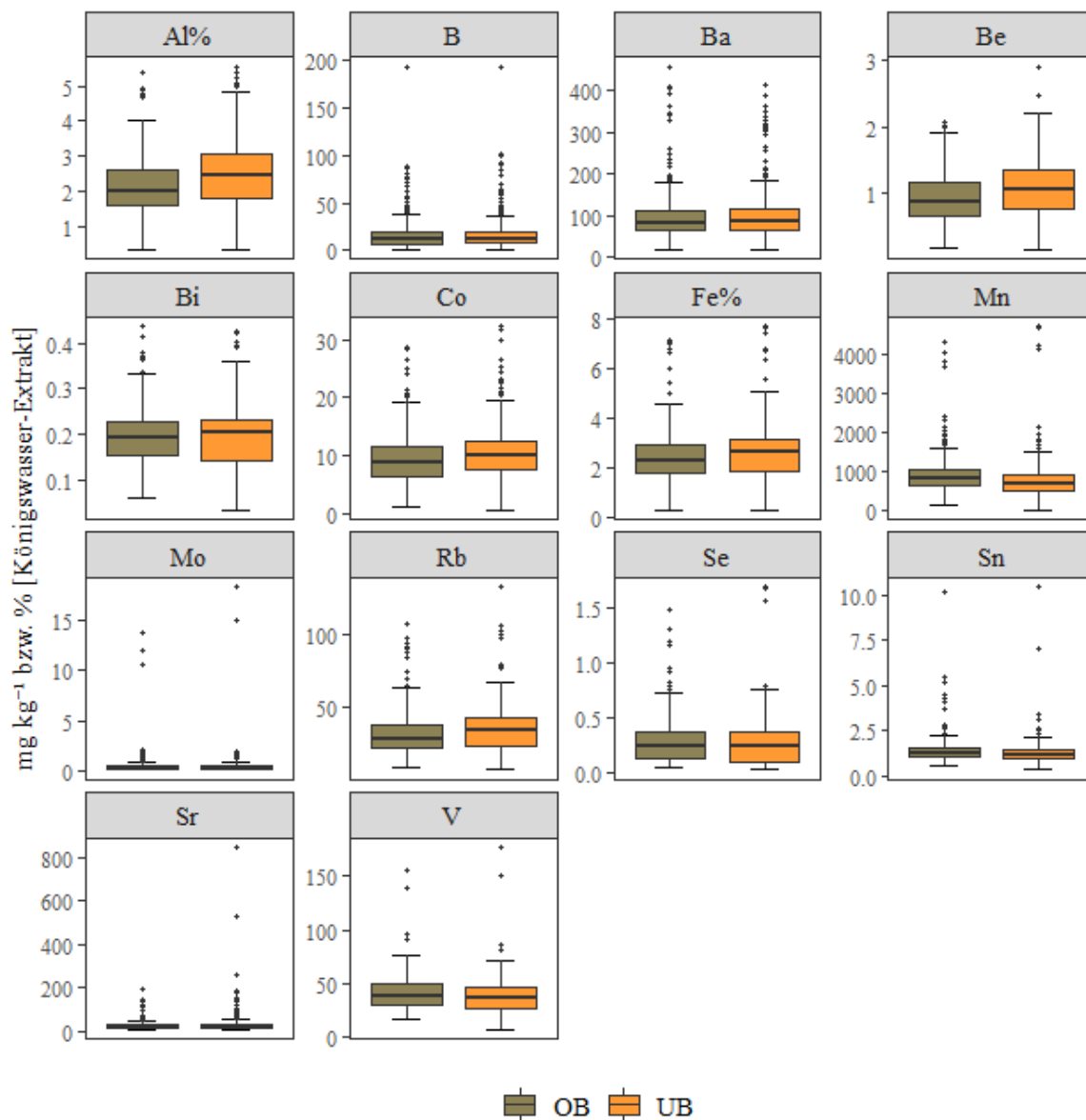


Abb. 94: Gesamtgehalte weiterer Elemente in Böden der 80 Acker-BDF (Vergleich Ober- und Unterböden) – gesamter Beobachtungszeitraum (1985-2016).

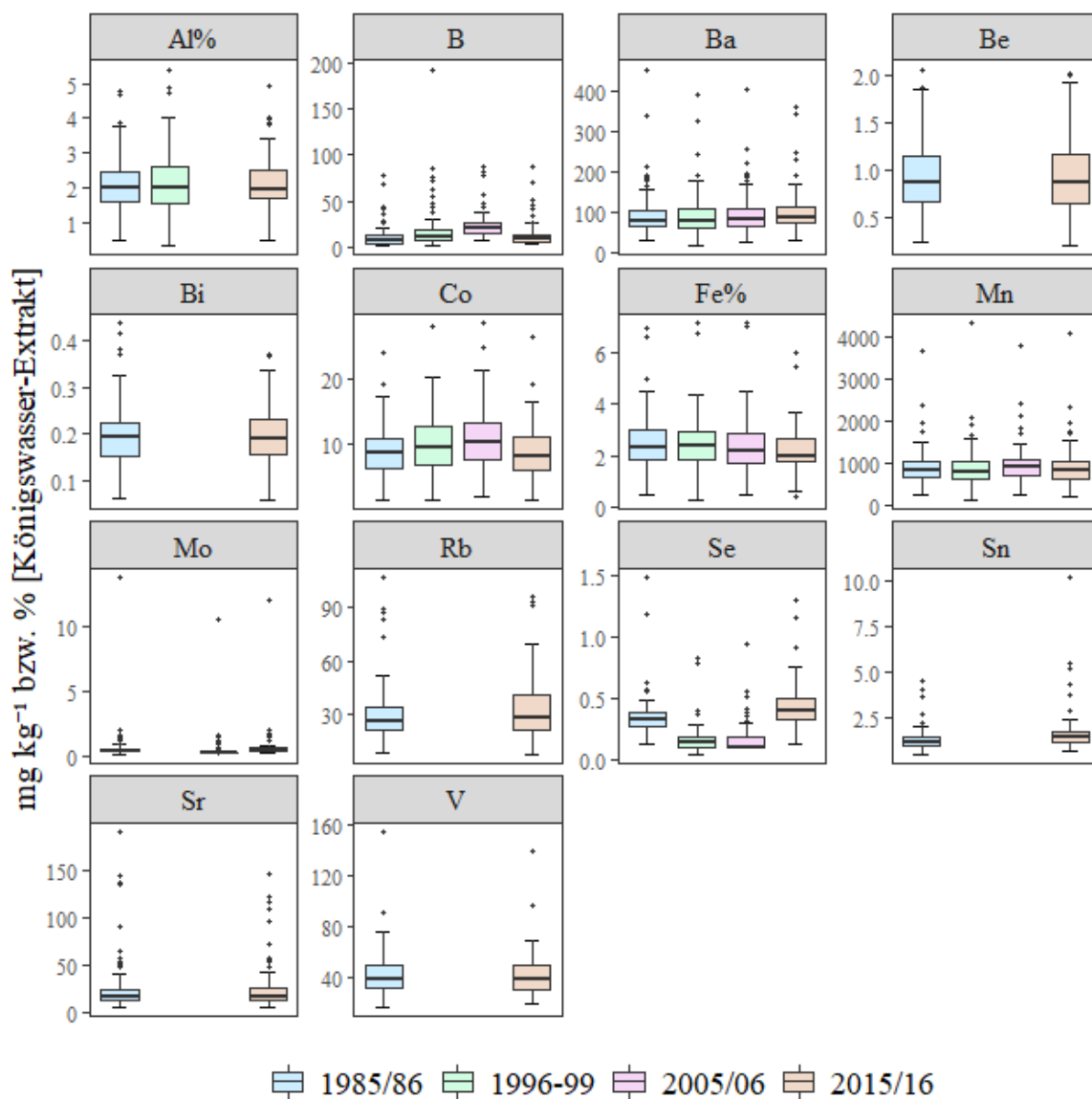


Abb. 95: Gesamtgehalte weiterer Elemente in Oberböden der 80 Acker-BDF während des Beobachtungszeitraums (1985-2016).

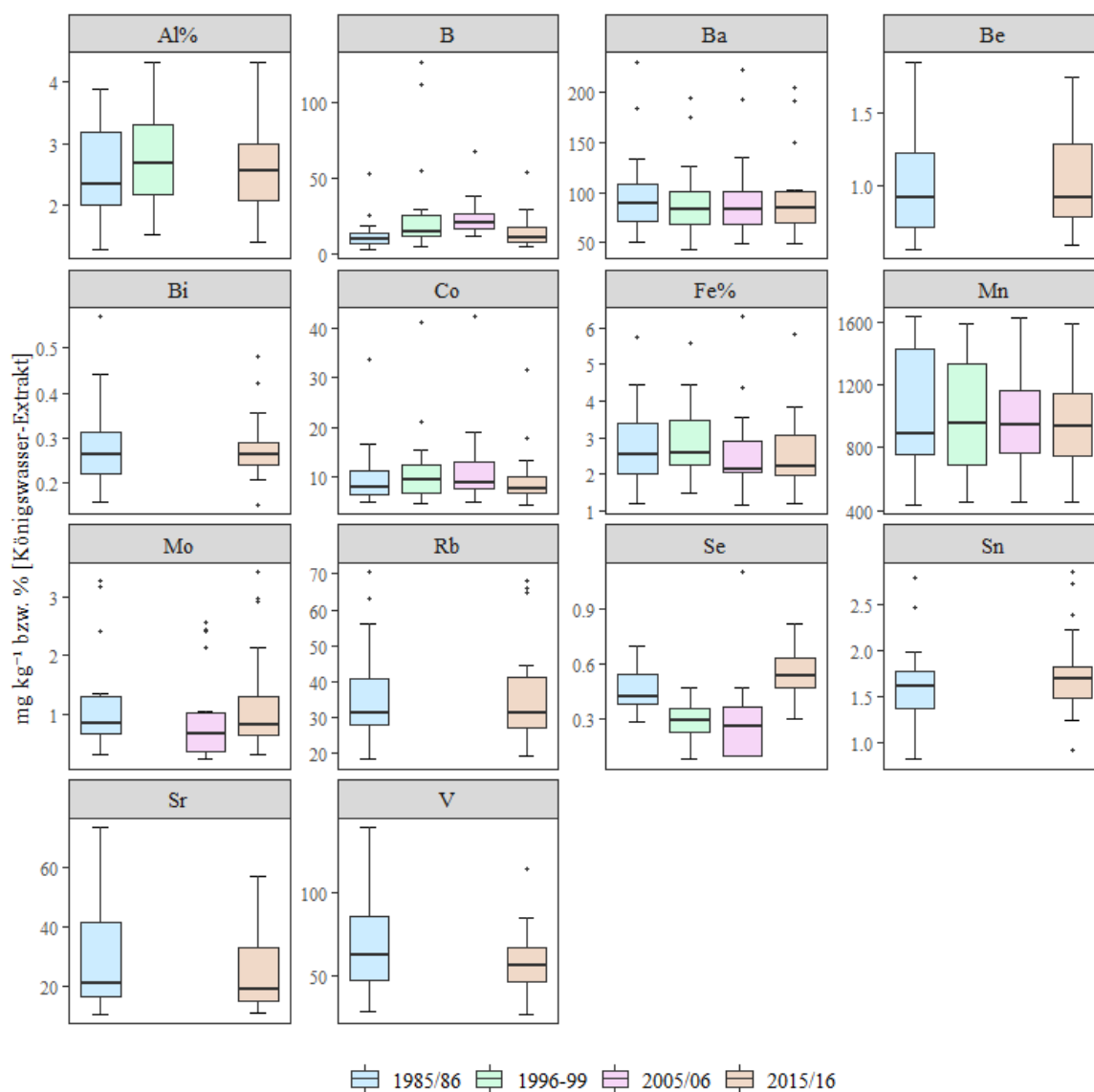


Abb. 96: Gesamtgehalte weiterer Elemente in Oberböden der 18 Grünland-BDF während des Beobachtungszeitraums (1985-2016).

Die Abb. 95 und Abb. 96 zeigen die Gehaltsspannen der im Königswasser-Extrakt des Bodens bestimmten Gesamtgehalte für die weiteren 14 chemischen Elemente in den Oberböden der 80 Acker- und 18 Grünland-BDF zu den einzelnen Beprobungs- und Untersuchungszeitpunkten.

2.3.5 Verfügbare Gehalte

In den Kapiteln 2.3.3 und 2.3.4 wurden die im Königswasserextrakt des Bodens bestimmten Gesamtgehalte anorganischer Schad- und Spurenstoffe der landwirtschaftlich genutzten Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern ausführlich dargestellt. Die im Boden enthaltenen anorganischen Schad- und Spurenstoffe können von Pflanzen entweder über die Pflanzenwurzeln aufgenommen und anschließend innerhalb der Pflanze transportiert/verlagert werden (=systemischer Aufnahmepfad). Andererseits kann eine äußerliche Verschmutzung mit kontaminiertem Bodenmaterial eine Kontamination von Pflanzen hervorrufen, die im Falle von Nahrungspflanzen auch durch Waschen und küchentechnische Aufbereitung, nicht vollständig entfernt werden kann (=Verschmutzungspfad) (BMUV, 1998).

Die Verfügbarkeit anorganischer Schad- und Spurenstoffe für verschiedene Pflanzenarten und Stoffe lässt sich nicht direkt messen. Allerdings kann die für die systemische Aufnahme relevante Schwermetallfraktion im Boden indirekt auf Basis der die annähernden Schwermetallgesamtgehalte charakterisierenden Bodenuntersuchungsmethode (z. B. Königswasser-Extraktion) unter zusätzlicher Berücksichtigung verfügbarkeitsbestimmender Bodenparameter (wie z. B. pH, C_{org} , Tongehalt) geschätzt werden (BMUV, 1998). Bei der systemischen Aufnahme anorganischer Schad- und Spurenstoffe ist jedoch nur ein geringer Anteil der Element-Gesamtgehalte im Boden für Pflanzen verfügbar.

Aus agrikulturchemischer/bodenkundlicher Sicht wird zur Prognose des Schwermetalltransfers Boden/Pflanze über den systemischen Aufnahmepfad in der Regel eine Bodenuntersuchungsmethode gewählt, die eine geeignete Schätzgröße für die für eine Wurzelaufnahme bedeutsame Schwermetallfraktion im Boden liefert. Nach allen bisherigen Erfahrungen kommt dafür am ehesten eine Bodenextraktion mit verdünnten Salzlösungen in Frage. Zur Ermittlung dieser „pflanzenverfügbaren“ Gehalte auf betriebsüblich bewirtschafteten Ackerflächen sieht das Bodenschutzrecht deshalb eine Untersuchung im Ammoniumnitrat(NH_4NO_3)-Extrakt des Bodens vor (Methode s. Kap. 2.2.2 und BMUV, 1998).

2005/06 wurde daher der Ammonium-Nitrat-Extrakt der Ober- und Unterböden aller Acker-BDF untersucht.

2.3.5.1 Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für verfügbare Gehalte im Boden, Prüf- und Maßnahmenwerte der Bundesbodenschutzverordnung

In der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV, 1999) wurden zur Beurteilung von schädlichen Bodenveränderungen für Ackerflächen und Nutzgärten, Prüf- und Maßnahmenwerte für (pflanzen-)verfügbare Gehalte einiger anorganischer Stoffe im Ammonium-Nitrat-Extrakt des Bodens festgelegt - und zwar im Hinblick auf Verschlechterung der Pflanzenqualität (Beeinträchtigung von Verzehr oder Verfütterung aufgrund von toxischen Wirkungen) und Wachstumsbeeinträchtigungen (bereits vor Verschlechterung der Pflanzenqualität treten Wachstumsbeeinträchtigungen (Ertragseinbußen) auf). Für Unterböden gelten die 1,5-fachen Werte der jeweils für Oberböden festgelegten Prüf- und Maßnahmenwerte (s. Tab. 33 und Tab. 34).

Nach § 8 Abs. 1 des Bundes-Bodenschutz-Gesetzes (BBodSchG, 1998) werden Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt als Prüfwerte bezeichnet. 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 werden als Maßnahmenwerte bezeichnet.

Tab. 33: Prüf(PW)- und Maßnahmenwerte(MW) hinsichtlich Pflanzenqualität auf Ackerbauflächen und Nutzgärten für im Ammonium-Nitrat-Extrakt ermittelte, (pflanzen-)verfügbare Bodengehalte [Oberböden (0-30 cm), Unterböden (30-60 cm)].

Stoff	Prüfwert [$\mu\text{g kg}^{-1}$ TM]		Maßnahmenwert [$\mu\text{g kg}^{-1}$ TM]	
	Oberböden	Unterböden	Oberböden	Unterböden
Blei (Pb)	100	150		
Cadmium (Cd)			100 40*	150 60*
Thallium (Tl)	100	150		

* Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cadmium-anreichernder Gemüsearten

Tab. 34: Prüfwerte (PW) hinsichtlich Wachstumsbeeinträchtigungen auf Ackerbauflächen für im Ammonium-Nitrat-Extrakt ermittelte, (pflanzen-)verfügbare Bodengehalte [Oberböden (0-30 cm), Unterböden (30-60 cm)].

Stoff	Prüfwert [$\mu\text{g kg}^{-1}$ TM]	
	Oberböden	Unterböden
Arsen (As)	400	600
Kupfer (Cu)	1000	1500
Nickel (Ni)	1500	2250
Zink (Zn)	2000	3000

2.3.5.2 Ergebnisse – verfügbare Gehalte

Tab. 35: Verfügbare Gehalte anorganischer Schad- und Spurenstoffe in den Böden der 80 Acker-BDF in $\mu\text{g kg}^{-1}$ TM für Elemente, für die in der BBodSchV Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt sind (Beprobung 2005/06, OB = Oberböden, UB = Unterböden).

Tiefe	STAT	Pb	Cd	Tl	As	Cu	Ni	Zn
OB	Mittelwert	0,6	3,1	5,6	7,0	51	40	98
UB	Mittelwert	10,0	2,0	5,3	3,0	20	32	66
OB	Median	0,3	2,2	4,4	6,5	45	35	29
UB	Median	0,2	1,4	3,5	2,6	13	19	24
OB	90 % der Werte	0,1-1,7	0,8-7,9	1,5-14,3	4-12	21-101	17-67	7-338
UB	90 % der Werte	0,1-11,3	0,3-5,3	1,2-8,6	0,8-5,8	2-71	6-81	4-412
OB	Min	0,1	0,5	0,9	2,8	17	13	3
UB	Min	0,04	0,1	0,8	0,6	1	1	3
OB	Max	5,1	28,8	43,5	21,2	115	233	1781
UB	Max	578	9,3	103	13,0	119	490	710

Tab. 36: *Verfügbare Gehalte der übrigen anorganischen Schad- und Spurenstoffe in den Böden der 80 Acker-BDF in $\mu\text{g kg}^{-1}$ TM, für die keine Prüf- und Maßnahmenwerte in der BBodSchV festgelegt sind (Beprobung 2005/06, OB = Oberböden, UB = Unterböden).*

Tiefe	STAT	Sb	Ba	B	Cr	Fe	Co	Mn	Mo	Hg	Se	U
OB	Mittelwert	1,3	22411	79	4,9	12440	10,4	13350	5,3	0,11	3,5	0,58
UB	Mittelwert	0,6	33451	54	3,5	7581	13,0	4839	2,2		1,5	1,09
OB	Median	1,1	16715	70	4,9	11846	7,1	7412	3,4	0,06	2,6	0,24
UB	Median	0,4	26247	47	3,2	6107	5,1	3146	0,8		0,8	0,10
OB	90 % der Werte	0,6-2,4	7111-46652	35-160	2,7-7,7	4550-23026	4,1-18,4	1091-36214	1,4-17,1	0,03-0,31	1-9,5	0,06-2,04
UB	90 % der Werte	0,1-2,1	9942-72573	24-100	1,2-7,6	1318-16991	1,7-42,1	279-14823	0,2-9,2		0,3-4,3	0,01-4,46
OB	Min	0,6	4237	22	1,2	2627	2,8	658	0,7	0,03	0,7	0,03
UB	Min	0,1	6107	20	0,7	811	1,3	63	0,2		0,2	0,01
OB	Max	4,1	91119	205	11,5	34031	135	103684	20,5	0,38	16,3	6,0
UB	Max	3,4	156644	219	10,9	32533	338	26467	18,1		6,0	8,5

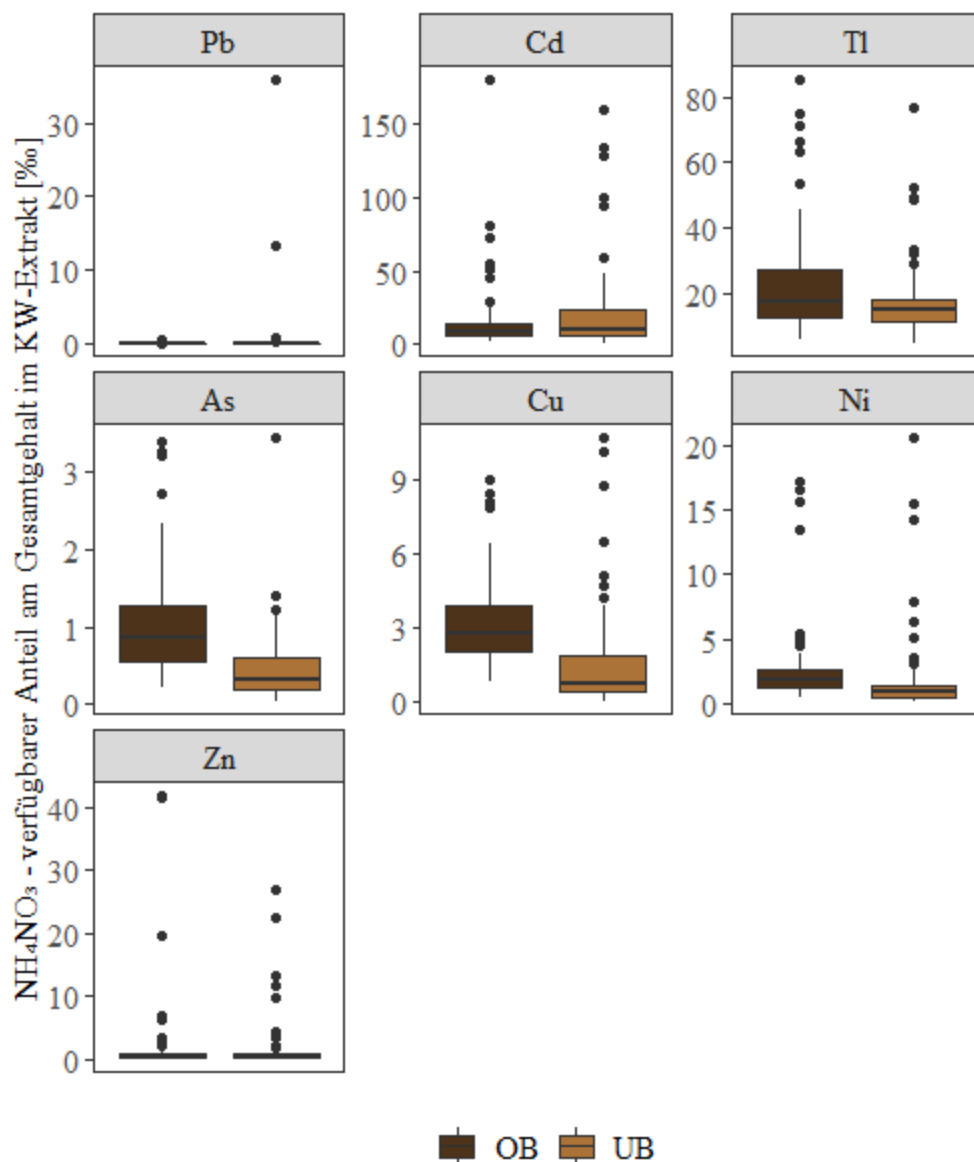


Abb. 97: Anteile pflanzen verfügbarer Gehalte (NH_4NO_3 -Extrakt) am Gesamtgehalt (Königswasser-Extrakt) für Elemente, für die in der BBodSchV Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt sind (Ober(OB)- und Unterböden(UB) der Acker-BDF, Untersuchung 2005/2006).

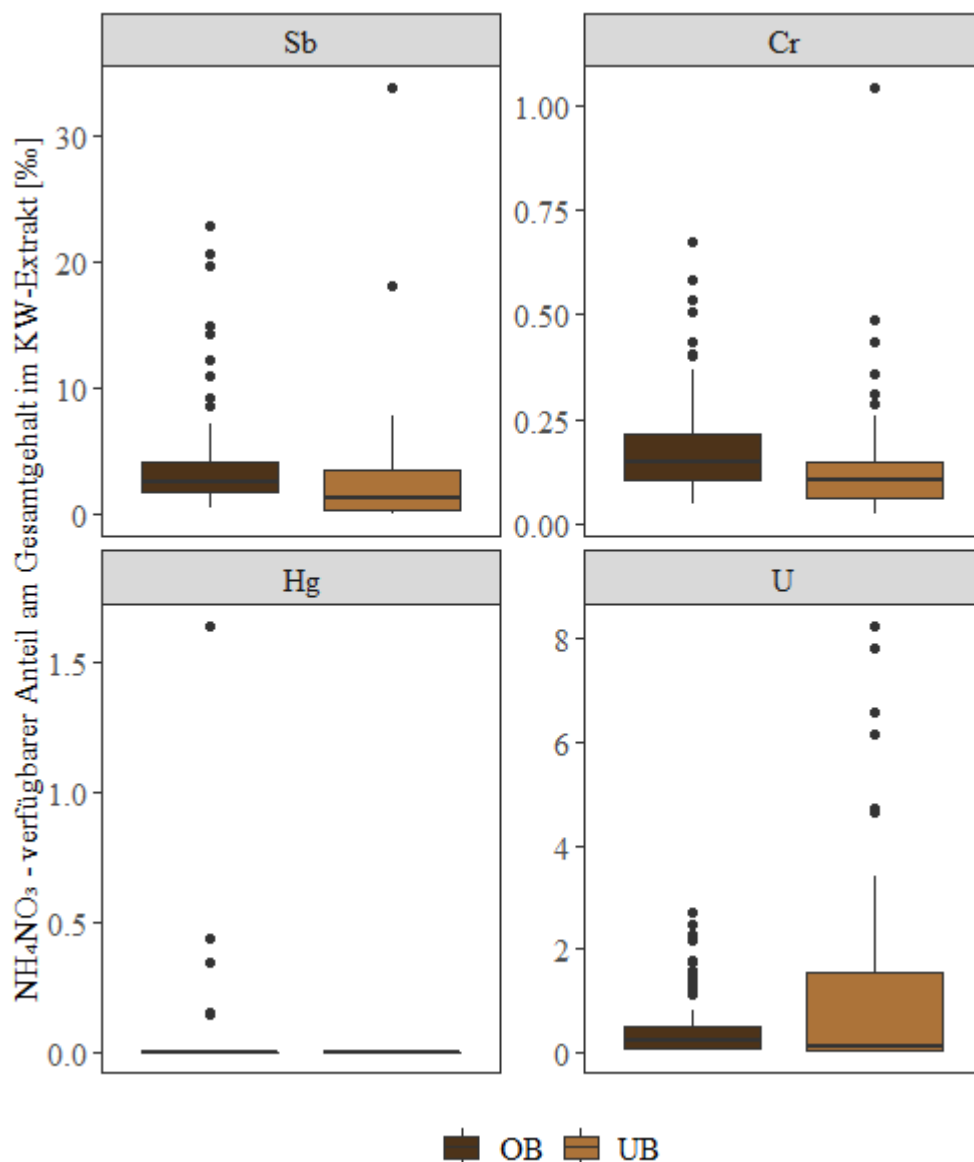


Abb. 98: Anteile pflanzenverfügbarer Gehalte (NH₄NO₃-Extrakt) am Gesamtgehalt (Königswasser-Extrakt) für die übrigen in Kap. 2.3.3 ausführlich beschriebenen Elemente (Ober(OB)- und Unterböden(UB) der Acker-BDF, Untersuchung 2005/2006).

Wie Tab. 35 und Tab. 36 sowie Abb. 97 und Abb. 98 zeigen, sind die gemessenen Stoffgehalte im Ammonium-Nitrat-Extrakt des Bodens und deren Anteile (pflanzenverfügbarer Anteil) am mittels Königswasserextrakt bestimmten Gesamtgehalt bei den verschiedenen Elementen sehr unterschiedlich hoch und reichen von nahezu null (\ll 1‰) bis zu einigen Prozent. Auch ist die Variationsbreite innerhalb der Ober- und Unterböden aber auch zwischen Ober- und Unterböden, bei den Acker-BDF zum Teil sehr groß.

Die Verfügbarkeit anorganischer Schad- und Spurenstoffe im Boden für (Nutz-)Pflanzen ist von verschiedensten Einflussfaktoren wie pH-Wert, Bodenausgangsgestein und Mineralzusammensetzung des Bodens, Hauptbodenart, Humusgehalt, Gehalt an Sesquioxiden, Vorhandensein anorg. und organischer Komplexbildner und dem Redoxpotential des Bodens abhängig, die zu einer unterschiedlich starken Festlegung der Schad- und Spurenstoffe im Boden führen. Für den Transfer Boden-Pflanze sind insbesondere pH-Wert und Bodenart

von Bedeutung, wie Abb. 99 zeigt. Bei Arsen und Antimon spielt auch das Redoxpotential des Bodens (auf BDF nicht gemessen!) eine wichtige Rolle.

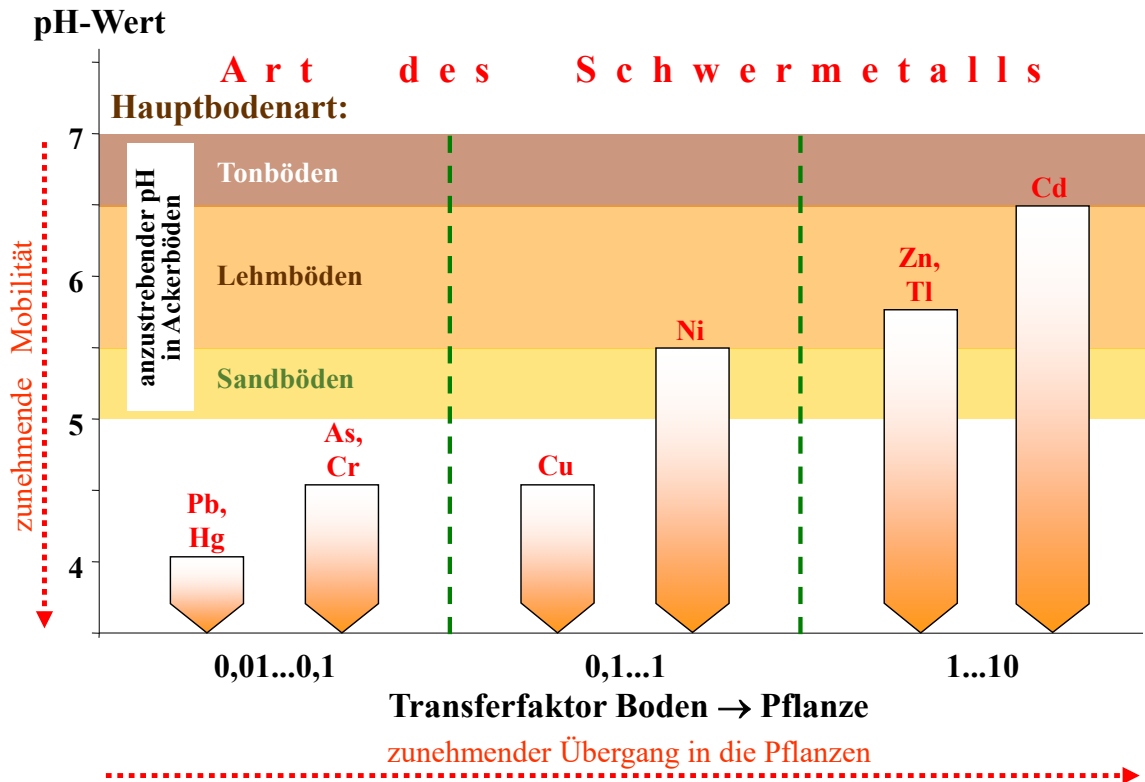


Abb. 99: Einfluss des pH-Wertes auf die Mobilität von Schwermetallen und deren Transfer in Pflanzen (verändert nach Hintermaier-Erhard & Zech, 1997).

Die im Ammonium-Nitrat-Extrakt des Bodens gemessenen Gehalte sollen den pflanzenverfügbaren Anteil an den ungefähren Gesamtgehalten eines Elements im Boden (z.B. den im Königswasserextrakt gemessenen Gesamtgehalten) näherungsweise abbilden. Von den im Königswasserextrakt gemessenen Boden(gesamt)gehalten kann aber nicht ohne weiteres auf die mittels Ammonium-Nitrat-Extraktion verfügbaren Bodengehalte geschlossen werden (s. Prüss, 1992 und 1994). Auch ist der Ammonium-Nitrat-Extrakt nicht für alle Elemente gleichermaßen geeignet

Für diejenigen Elemente, für die in BBodSchV Prüf- und Maßnahmenwerte pflanzenverfügbarer Gehalte im NH_4NO_3 -Extrakt festgelegt sind (s. Abb. 97), weisen besonders Cadmium (bis 15 %) und Thallium (bis 8 %) aber auch Zink (bis 4 %) z.T. hohe, mobilisierbare Anteile am Elementgesamtgehalt (bestimmt im Königswasser-Extrakt des Bodens) auf. Geringer im Vergleich zum Gesamtgehalt sind hingegen die im Ammonium-Nitrat-Extrakt gemessenen Werte für Arsen (max. 3 ‰) und meistens für Blei. Für weitere in Kap. 2.3.3 ausführlich beschriebene Elemente (s. Abb. 98) weist auch Antimon z.T. höhere Anteile an im Ammonium-Nitrat-Extrakt messbaren Gehalten am Gesamtgehalt (bis 3 ‰) auf. Kaum pflanzenverfügbar sind hingegen Chrom und Quecksilber (meist $\ll 1\%$); gering sind auch die im Ammonium-Nitrat-Extrakt des Bodens im Vergleich zum Gesamtgehalt (Königswasser-Extrakt des Bodens) gemessenen Gehalte für Uran (bis max. 8‰).

Weil die BDF-Unterböden im allgemeinen höhere Boden-pH-Werte (mittlerer pH-Wert bei Acker-BDF: 6,7, Beprobung 2005-2007) als die entsprechenden Oberböden (mittlerer pH-Wert bei Acker-BDF: 6,5, Beprobung 2005-2007) aufweisen und für die meisten Schad-

und Spurenstoffe die Mobilisierung mit sinkendem pH-Wert im Boden ansteigt, sind auch die mittels Ammonium-Nitrat-Extrakt in Unterböden mobilisierbaren Anteile am Gesamtgehalt meist geringer als in den jeweiligen Oberböden (s. Abb. 97 und Abb. 98).

Hohe Stoffkonzentrationen ($>1 \text{ mg kg}^{-1}$) im Ammonium-Nitrat-Extrakt der Ober- und Unterböden von Acker-BDF wurden für Barium ($7\text{-}47 \text{ mg kg}^{-1}$ in Oberböden), Eisen und Mangan gemessen (s. Tab. 36). Diese Elemente kommen aber auch in Böden meist in höheren Konzentrationen (Gesamtgehalte – bestimmt im Königswasser-Extrakt des Bodens) vor (s. Tab. 5 und ANHANG, Tab. 59).

Weil die Verfügbarkeit der anorganischen Schad- und Spurenstoffe für Pflanzen sehr stark vom pH-Wert und der jeweiligen Bodenart (Sandgehalt bzw. Tongehalt eines Bodens) abhängt, beeinflussen beide Faktoren auch die im Ammonium-Nitrat-Extrakt messbaren Konzentrationen z.T. recht deutlich, wie Abb. 100 für die BDF-Oberböden zeigt.

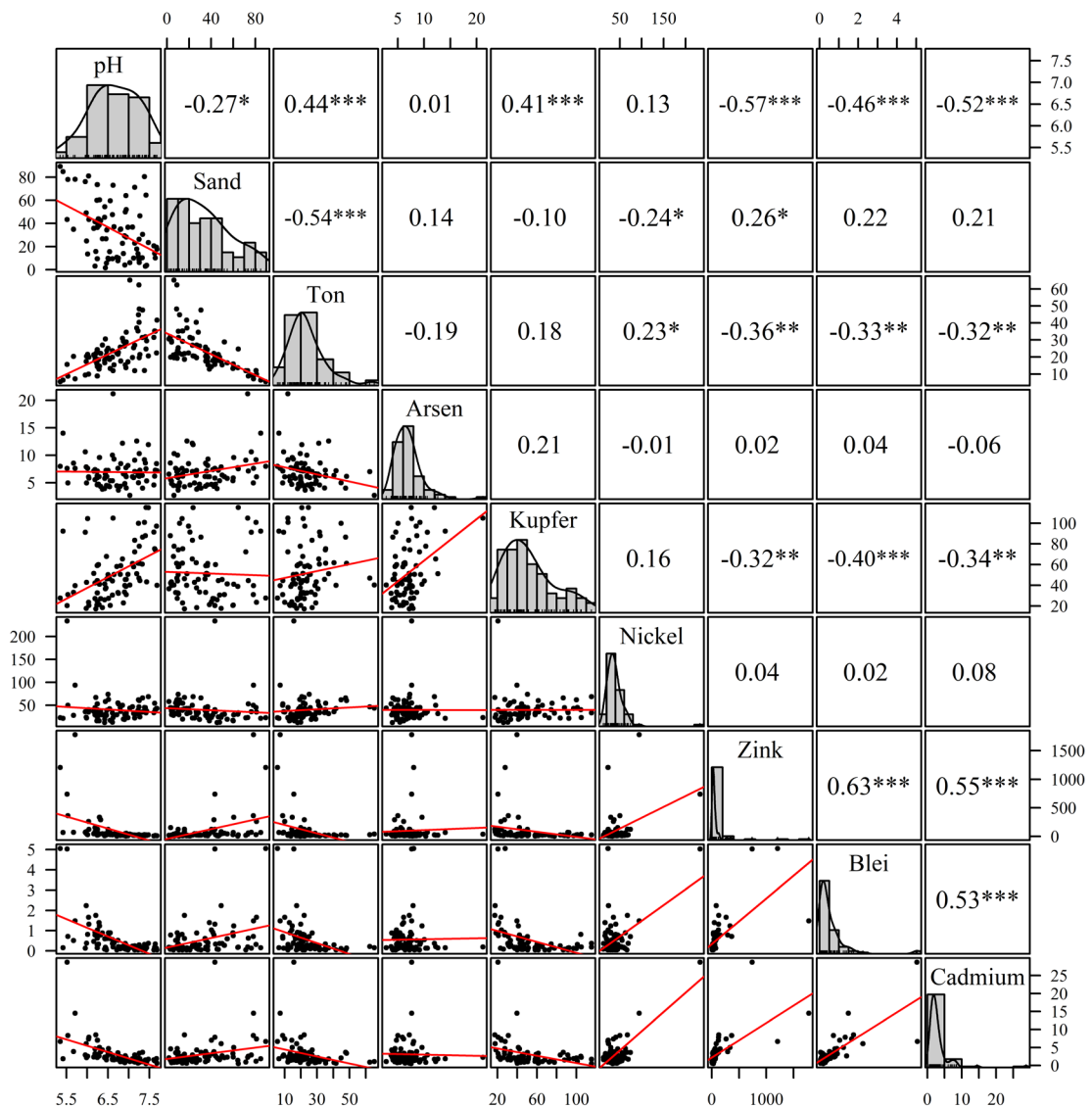


Abb. 100: Korrelationsmatrix aus pH-Wert, Sand- und Tongehalt sowie der im Ammoniumnitratextrakt des Bodens löslichen Elementgehalte für As, Cu, Ni, Zn, Pb und Cd in Oberböden der Acker-BDF mit Angabe des Kendall-Tau Korrelationskoeffizienten und des Signifikanzniveaus (Signifikanzsternchen).

Nach Abb. 100 weisen Sandböden in der Regel tiefere pH-Werte (signifikante, leicht negative Korrelation) und tonigere Böden meist höhere pH-Werte (hoch signifikante, positive Korrelation, Kendall-Tau 0,44***) auf. Besonders stark beeinflusst ein tiefer pH-Wert die Löslichkeit im Ammoniumnitratextrakt des Bodens bei den Elementen Cd, Pb und Zn (hoch signifikante, negative Korrelationen, Kendall-Tau -0,52***, -0,46*** bzw. -0,57***). Entsprechend korrelieren die Gehalte von Cd, Pb und Zn im Ammoniumnitratextrakt des Bodens auch leicht positiv mit dem Sandgehalt (wenig signifikant!) und signifikant negativ mit dem Tongehalt (stärkere Sorption an Tonmineralien führt zu verminderter Löslichkeit im wässrigen Ammonium-Nitrat-Extrakt). Für Ni und besonders für As konnte hingegen nur ein sehr geringer Einfluss des pH-Wertes auf die Gehalte im Ammoniumnitratextrakt des Bodens festgestellt werden. Bei Cu konnte sogar eine hoch signifikant positive Korrelation der Ammonium-Nitrat-Extrakt-Gehalte des Bodens mit ansteigenden pH-Werten gemessen werden (Kendall-Tau 0,41***). Weil bei den meisten anorganischen Schad- und Spurenstoffen mit sinkendem pH-Wert mehr vom Element-Gesamtgehalt eines Bodens in den Ammonium-Nitrat-Extrakt übergeht und der Beginn des in Lösung Gehens für verschiedene Elemente bei unterschiedlichen pH-Werten einsetzt, lassen sich die geringen Korrelationen bei As und Ni bzw. die entgegengesetzt, positive Korrelation für Cu nur damit erklären, dass auf BDF-Ackerflächen nicht derart tiefe pH-Werte messbar sind, die zu einer stärkeren Mobilisierung dieser Elemente führen würde (s. Abb. 99). Weil Grünland-BDF aber häufig sandigere Böden sind und tiefere pH-Werte (mittlerer pH-Wert 2005/06 im Oberboden: 5,8) als Ackerflächen (mittlerer pH-Wert 2005/06 im Oberboden: 6,7) aufweisen, ist dort mit anderen Zusammenhängen von pH-Werten und Bodenart zu den in NH_4NO_3 -Lösung mobilisierbaren Stoffgehalten im Boden zu rechnen.

Wie Abb. 99 und Abb. 100 auch zeigt, ist Cadmium ein vergleichbar mobiles, leicht lösliches und für Pflanzen gut verfügbares Element, Blei hingegen löst sich nur wenig in der Ammonium-Nitrat-Extrakt Lösung des Bodens. Es ist im Boden in der Regel nur in geringem Umfang mobilisierbar und pflanzenverfügbar. Für beide Elemente gilt jedoch den pH-Wert des Bodens im Auge zu behalten, da Cadmium bereits bei pH-Werten < 6,5 und Blei bei pH-Werten unter pH 4-5 verstärkt in Lösung geht, dabei zu höheren Messwerten im Ammonium-Nitrat-Extrakt des Bodens führt und leicht für Pflanzenwurzeln verfügbar wird und so auch in oberirdische Pflanzenorgane transportiert werden kann. Die Ergebnisse decken sich recht gut mit ähnlichen Untersuchungen in der einschlägigen Fachliteratur (BMUV, 1998) und den Aussagen zur Mobilität und Element-Verfügbarkeit der jeweiligen Stoffe für Pflanzen laut den Element-Steckbriefen in Kap. 2.3.3.

Vergleich der 2005-2007 in Ober- und Unterböden der 80 Acker-BDF im Ammonium-Nitrat-Extrakt gemessene Gehalte mit den Prüf- und Maßnahmenwerten der BBodSchV:

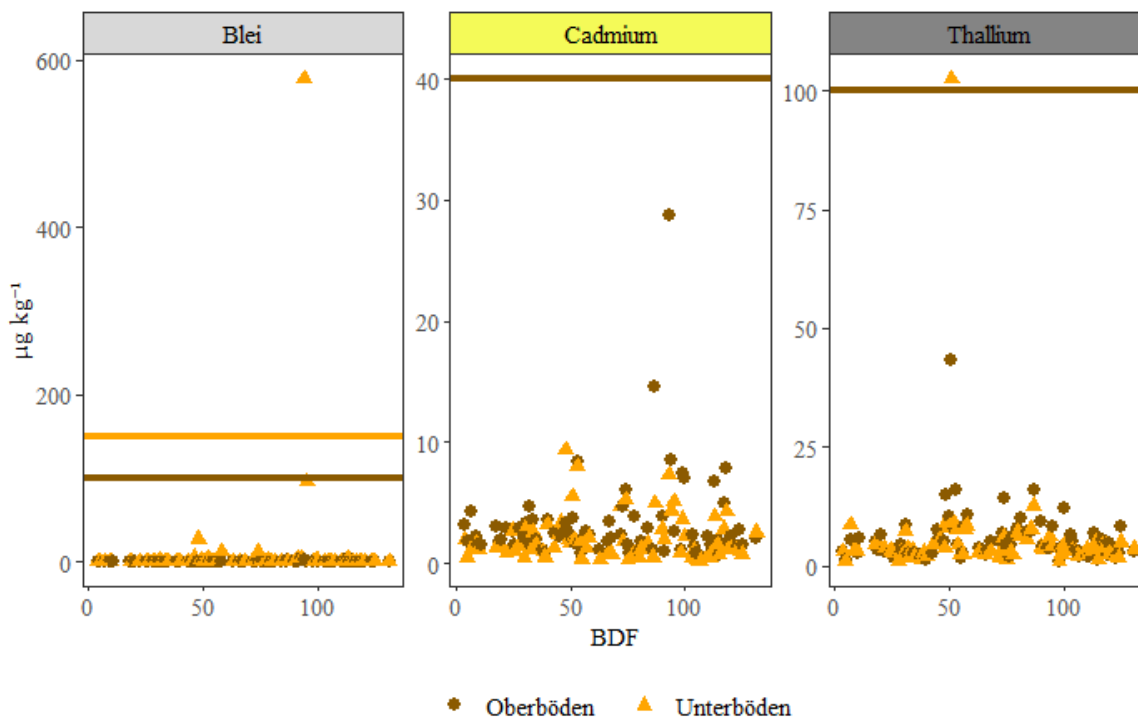


Abb. 101: Verfügbare Gehalte an Schwermetallen auf Acker-BDF und Vergleich mit Prüf(PW - Pb, Tl)- und Maßnahmenwerten(MW - Cd für Brotweizenanbau oder Anbau stark Cd-anreichernder Gemüsearten) hinsichtlich Pflanzenqualität (Beprobung: 2005/2006 - für Unterböden gelten die 1,5-fachen PW und MW, PW und MW für Ober- und Unterböden sind nur eingezeichnet, wenn die y-Achsenkalibrierung dies zuließ).

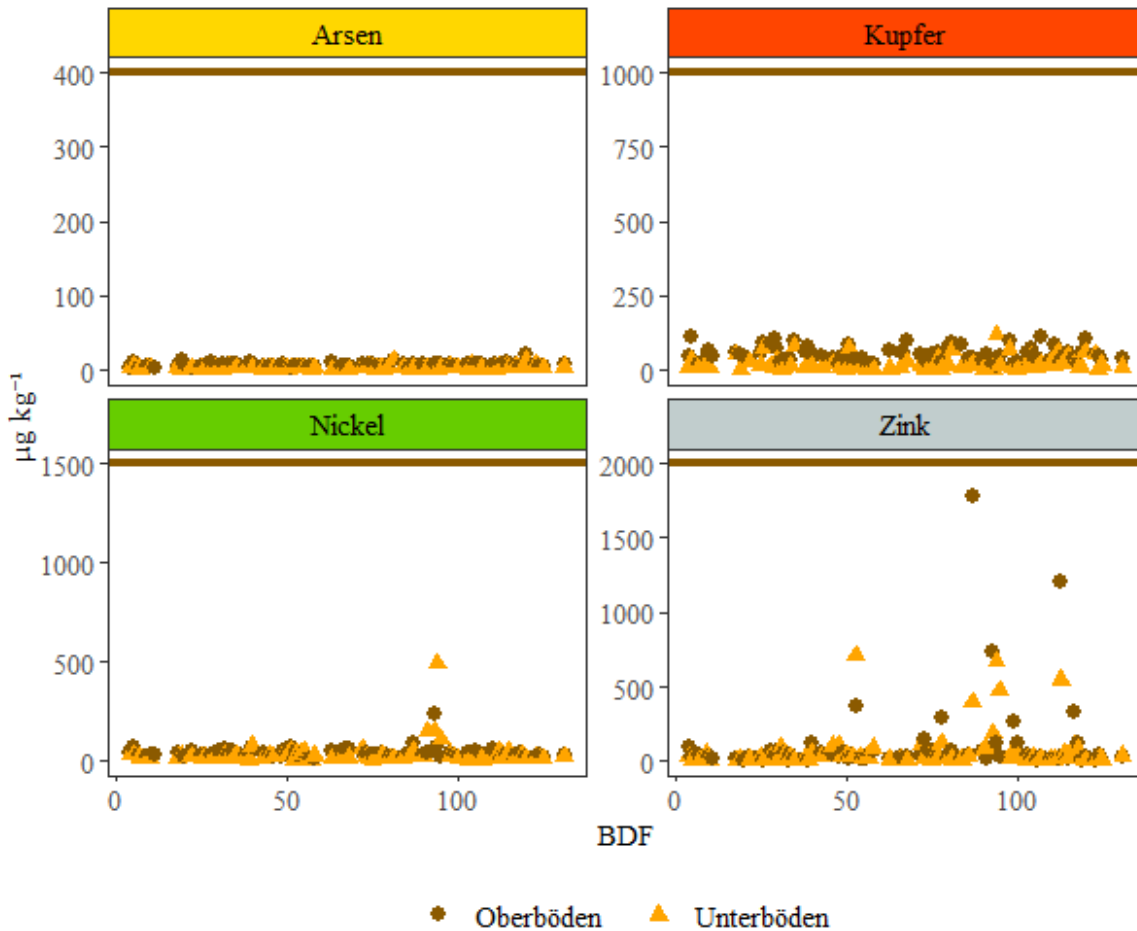


Abb. 102: Verfügbare Gehalte an Schwermetallen auf Acker-BDF und Vergleich mit Prüfwerten (PW) hinsichtlich Wachstumsbeeinträchtigungen (Beprobung: 2005/2006 - für Unterböden gelten die 1,5-fachen PW, die PW für Ober- und Unterböden sind nur eingezeichnet, wenn die y-Achsenkalierung dies zuließ).

Bei den 2005/06 beprobten und untersuchten Acker-BDF konnte für keines der Elemente eine Überschreitung von Prüf- und Maßnahmenwerten im Ammoniumnitratextrakt des Bodens im Hinblick auf Pflanzenqualität oder Wachstumsbeeinträchtigungen im Oberboden festgestellt werden (s. Abb. 101 und Abb. 102).

Die einzige Überschreitung des Prüfwertes für Blei im Unterboden bei **BDF 94** ($578 \mu\text{g Pb kg}^{-1}$ TM Boden, bestimmt im Ammonium-Nitrat-Extrakt) lässt sich nicht mit den im Boden gefundenen Gesamtgehalten (Königswasserextrakt) erklären (sie betragen nur 16 mg Pb kg^{-1} TM Boden), als vielmehr durch den sehr niedrigen pH-Wert des Unterbodens dieser BDF (pH 4,6), wodurch die Löslichkeit des Bleis im Boden stark erhöht ist. Durch eine Anhebung des pH-Wertes z.B. mittels einer Kalkung, kann die Verfügbarkeit des Bleis im Unterboden deutlich reduziert werden und der Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung mit einfachen Mitteln beseitigt werden.

2.4 Ergebnisse und Diskussion Organische Schadstoffe

2.4.1 Umweltchemikalien

Kurzsteckbrief Polychlorierte Biphenyle (PCB):

Polychlorierte Biphenyle (PCB) stellen eine Verbindungsklasse aus 209 Einzelverbindungen, den sogenannten PCB-Kongeneren dar. Aufgebaut sind alle PCB aus einem Biphenyl-Gerüst, das einen bis zehn Chlorsubstituenten trägt. Nach der Systematik von Ballschmiter (s. Fußnote 6 auf S. 25) werden die PCB-Kongeneren nach ihrem Chlorierungsgrad und Stellung der Chloratome an den Biphenylringen geordnet. Aus den Ballschmiter-PCB-Kongeneren mit IUPAC(International Union of Pure and Applied Chemistry)-Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 wird der Summenwert ΣPCB_6 n. Ballschmiter gebildet.

Mit zunehmendem Chlorierungsgrad nimmt die Lipidlöslichkeit zu, die Wasserlöslichkeit und Metabolisierung der PCB aber ab. Die höher chlorierten Biphenyle weisen somit ein hohes Bio- und Geoakkumulationspotenzial, hohe Persistenz und ein hohes Gefährdungspotential auf. Besonders wegen der hohen Persistenz sind PCB ubiquitär vorkommende Chemikalien, die heute noch als Umweltchemikalien eine wichtige Rolle spielen. Im Boden und anderen „Umweltproben“ liegen die PCB meistens als Gemische verschiedener PCB-Kongeneren vor. Einige PCB weisen Ähnlichkeiten zu Dioxinen auf und werden daher dl(dioxine-like)-PCB bezeichnet. Die Bindung der PCB findet hauptsächlich in Auflagehorizonten und Oberböden und bevorzugt an die organische Bodensubstanz statt.

PCB wurden als Kühl- und Isoliermittel in Transformatoren und Kondensatoren, als nicht brennbare Hydraulik-, Schmier- und Getriebeöle, aber auch in offenen Systemen als Weichmacher für Kunststoffe, Lacke und Farben, als Flammschutzmittel bei Holz, Papier, Kunststoffen und Textilien und sogar als Trägersubstanzen für Pestizide eingesetzt. Seit 1989 sind Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung von PCB verboten.

Typische Gehalte in Böden: nicht natürlich vorkommend - Bodengehalte bis $20 \mu\text{g} \Sigma\text{PCB}_6 \text{ kg}^{-1}$.

PCB können praktisch in allen Pflanzenteilen nachgewiesen werden, jedoch schwanken die Gehalte zwischen Pflanzenarten und Pflanzenteilen erheblich. Die Aufnahme von PCB aus Böden im Vergleich zu einer direkten gasförmigen oder partikulären atmosphärischen Deposition ist gering. Eine systematische Beziehung zwischen Gehalten in Pflanzen und Gehalten im Boden besteht deshalb in der Regel nicht. Die Wurzelaufnahme erfolgt überwiegend nur in die äußere, meist lipophile Epidermis. Eine Translokation in oberirdische Pflanzenteile findet kaum statt. Entsprechend weisen unterirdische Pflanzenteile höhere Gehalte als oberirdische auf, ferner Pflanzen mit einer großen Oberfläche (Blattsalat) höhere Gehalte auf als solche mit einer kleinen (Getreidekörner). Die Akkumulation in Pflanzen relativ zum Boden ist in der Regel für drei- und vierfach chlorierte Biphenyle am höchsten und nimmt mit zunehmendem Chlorierungsgrad ab.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte in Böden nach BBodSchV: 0,05 bzw. 0,1 $\text{mg} \Sigma\text{PCB}_6 \text{ kg}^{-1}$ je nach Humusgehalt (kleiner gleich oder größer 8 %) des Bodens, s.a. Tab. 37.

Fortsetzung Polychlorierte Biphenyle (PCB):

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln:

Höchstgehalt in mg kg^{-1} (ppm), bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (FuttMV, 2002/32/EG Anh. 1 - konsolid. Text v. 28.11.2019) für pflanzliche Futtermittel-Ausgangserzeugnisse: $10 \mu\text{g kg}^{-1}$.

(Litz, 2004-2016)

Kurzsteckbrief Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

[soweit nicht anders angegeben, Werte in mg kg^{-1}]:

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bilden eine Stoffgruppe aus mehreren hundert organischen Einzelsubstanzen (auch Kongenere bezeichnet). Aufgebaut sind PAK aus mehrgliedrigen Ringen bestehend aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen (meist Benzolringen), die über gemeinsame Seiten durch Kondensationsreaktion miteinander verbunden sind. Sie entstehen bei der unvollständigen Verbrennung organischer Materialien, sind weit verbreitet, toxisch und können Krebs auslösen. International weitgehend als Referenzgröße durchgesetzt haben sich die 16 EPA-PAK, die von der US-amerikanischen Umweltbehörde „Environmental Protection Agency“ (EPA) im Jahre 1976 in die „priority pollutant list“ aufgenommen wurden darunter auch Benzo(a)pyren (BaP) als Einzelsubstanz.

Hintergrundgehalte aus natürlichen Quellen in Oberböden von Äckern und Grünland in Deutschland: $0,1-0,3 \Sigma\text{PAK}_{16}$ und $0,015 \text{ BaP}$. Höhere Bodengehalte in städtischen Verdichtungsräumen $>0,5 \Sigma\text{PAK}_{16}$.

Die Bindung der PAK findet hauptsächlich in Oberböden und an die organische Bodensubstanz statt. Aber auch Bindung an die (Blatt-)oberflächen von Pflanzen.

Typische Gehalte in Pflanzen: $0,001-0,1 \Sigma\text{PAK}_{16}$ und $0,0001-0,015 \text{ BaP}$.

Grenzwerte/Höchstgehalte:

Vorsorgewerte in Böden nach BBodSchV: 3 bzw. 10 ΣPAK_{16} und 0,3 bzw. 1 BaP je nach Humusgehalt (kleiner gleich oder größer 8 %) des Bodens, s.a. Tab. 37.

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln: -

(Litz, 2004-2016)

2.4.1.1 Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für Umweltchemikalien im Boden, Vorsorgewerte der Bundesbodenschutzverordnung

Für beide Gruppen von Umweltchemikalien sind in der BBodSchV (BBodSchV, 1999) jeweils Vorsorgewerte festgelegt worden, die im Folgenden zur Einstufung der bei den BDF gemessenen Gehalte herangezogen werden (s. Tab. 37). Für die Anwendung der jeweiligen Vorsorgewerte ist der Humusgehalt des Bodens zu berücksichtigen.

Tab. 37: Vorsorgewerte für organische Stoffe in mg kg^{-1} TM Boden (BBodSchV, 1999).

Stoff	Humusgehalt $\leq 8\%$	Humusgehalt $> 8\%$
Summe PCB ₆	0,05	0,1
Benzo(a)pyren [BaP]	0,3	1
Summe PAK ₁₆	3	10

2.4.1.2 Ergebnisse PCB

Die PCB wurden nur einmalig in den Oberböden der BDF bestimmt - Beprobung und Untersuchung fanden 1985-1987 statt. Aufgrund, der dort festgestellten, sehr geringen Befunde (s. unten), wurde keine erneute Untersuchung mehr durchgeführt. Die Oberböden der BDF wurden jeweils auf die 6 Ballschmitter-Kongenere PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153 und PCB 180 untersucht. Die Summe dieser 6 Ballschmitter PCB (ΣPCB_6) ergibt sich jeweils durch Addition der Gehalte der 6 Einzelkongenere.

Tab. 38: PCB-Gehalte in BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1985-87) in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden, differenziert nach Nutzungen (MW=Mittelwert).

	80 Acker-BDF		18 Grünland-BDF	
	MW	90 % der Werte	MW	90 % der Werte
PCB 28	0	0	0	0
PCB 52	0	0	0	0
PCB 101	0	0	0	0
PCB 138	0,3	0-1,5	0,3	0-1,3
PCB 153	0,3	0-1	0,3	0-1,4
PCB 180	0,2	0-0,8	0,3	0-1,4
ΣPCB_6	0,9	0-3,6	1,0	0-4,1

Wie Tab. 38 zeigt, konnten bei Erstbeprobung und -untersuchung der BDF-Oberböden 1985-87 von den insgesamt 6 Ballschmitter-PCB nur die höherchlorierten PCB ab PCB 138 bis PCB 180 und nur in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen werden. Sie enthalten insgesamt 6 (PCB 180 sogar 7) Chloratome, wohingegen die PCB 28, 52 und 101 nur 3, 4 bzw. 5 Chloratome besitzen. Höherchlorierte PCB gelten als biologisch weniger gut abbaubar (sind also persistenter) und bleiben damit länger im Boden erhalten als niederchlorierte PCB. Insofern ist der Zusammenhang zwischen Chlorierungsgrad der PCB und den jeweiligen Bodenkonzentrationen auch bei BDF-Oberböden messbar, wie Tab. 38 zeigt.

PCB-Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF nach Humusgehalt und Vorsorgewerte

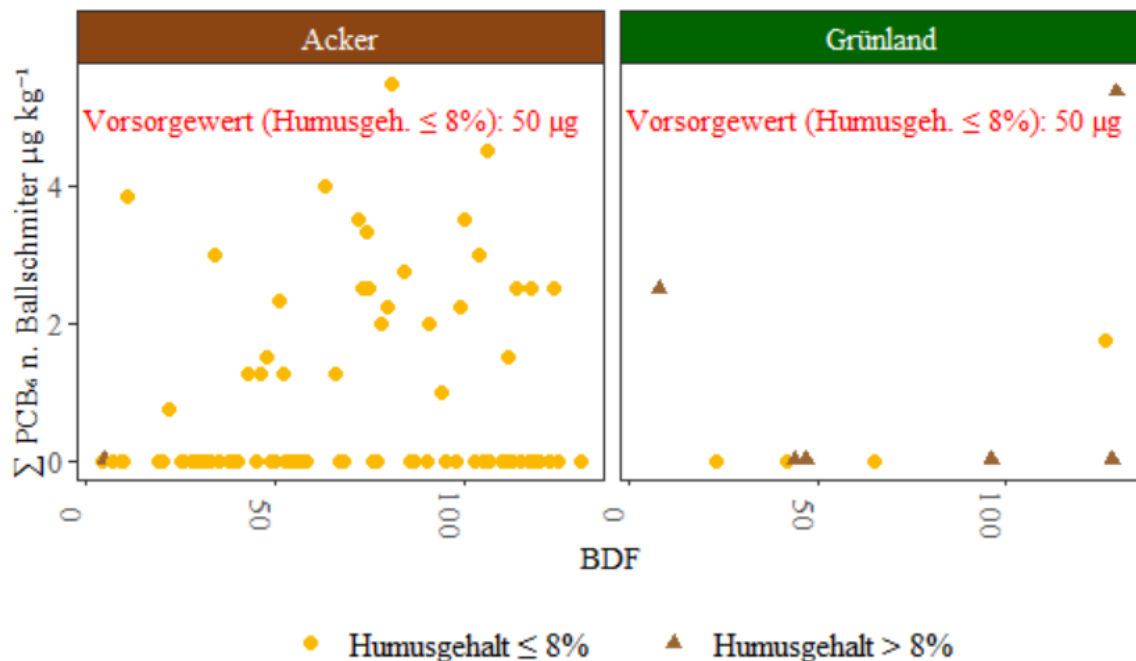


Abb. 103: Gehalte an Summe PCB₆ nach Ballschmitter in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden. Die Vorsorgewerte gelten für Böden ≤ 8% Humusgehalt. Die weniger strengen, höheren Vorsorgewerte für Böden über 8% Humusgehalt werden bei BDF nicht erreicht und sind folglich nicht eingezeichnet.

Bei allen Oberböden der Acker- und Grünland-BDF lagen die PCB-Gehalte für die Summe an PCB₆ nach Ballschmitter weit unterhalb der einschlägigen Vorsorgewerte der BBodSchV (50 µg kg⁻¹ für Böden ≤ 8% Humusgehalt bzw. 100 µg kg⁻¹ für Böden mit mehr als 8% Humusgehalt, s. Tab. 37). Wegen der äußerst geringen Gehalte bei der Summe der PCB₆, wird deshalb auf die Verteilung der jeweiligen 6 PCB-Einzelkongenere nicht weiter eingegangen.

Weil die Konzentrationen an Polychlorierten Biphenylen in den BDF-Böden insgesamt sehr niedrig sind und die Verwendung von PCB stark zurückgegangen ist bzw. verboten wurde, sind die Böden der BDF bei späteren Beprobungsserien nicht mehr auf PCB untersucht worden. Daher lässt sich auch keine Aussage zur zeitlichen Veränderung der PCB-Gehalte in den BDF-Oberböden im Beobachtungszeitraums treffen.

2.4.1.3 Ergebnisse PAK

Bei der Erstaufnahme (Probenahmeserie 3: 1996-1999) der PAK wurden die Oberböden aller BDF untersucht. Später, also 2012 bzw. 2016 (Beprobungsserie 5 bzw. 6) wurden die PAK dann nur noch auf 15 bzw. 14 ausgewählten BDF mit bei Erstaufnahme festgestellten, höheren Schadstoffwerten, im Oberboden untersucht. Die Summe PAK-16 (ΣPAK_{16}) ergibt sich durch Summation der Gehalte von 16 Einzelsubstanzen (16 PAK-Einzelkongenere nach EPA).

Tab. 39: PAK-Gehalte in BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1996-99) in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden, differenziert nach Nutzungen (MW=Mittelwert).

	80 Acker-BDF		18 Grünland-BDF		3 Hopfen-BDF	1 Obst-BDF	3 Wein-BDF
	MW	90 % der Werte	MW	90 % der Werte	MW	MW	MW
Naphtalin	1,5	0-5,5	1,67	0,3-5,9	1,53	1,58	0,96
Acenaphtylen	0,0	0-4	0,0	0-20,2	0,0	0,0	0,0
Acenaphten	0,0	0-12,1	0,0	0-25,1	0,0	0,0	0,0
Fluoren	1,8	0,5-6,4	6,4	0,9-14,1	0,98	5,98	2,3
Phenanthren	61	6-166	162	10-271	23	189	49
Anthracen	1,9	0,1-19,1	2,8	0,5-29,3	0,2	3,2	2,7
Fluoranthen	32	6-149	72	15-298	12,6	108	110
Pyren	22	2-111	54	11-236	9,8	94	71
Benzo(a)anthracen	14,6	2-77	29	4-143	4,1	23	102
Chrysen	18,8	3-96	40	7-157	5,1	62	48
Benzo(bk)fluoranthen	34	8-131	67	16-230	13,02	82	163
Benzo(a)pyren	11,4	1-63	26	4-135	0,5	28	67
Indeno(1,2,3-cd)pyren	22	3-68	36	5-98	7,3	46	111
Dibenz(ah,ac)anthracen	4,9	0,8-20,5	10,4	1-32,3	1,1	8,9	13,0
Benzo(ghi)perylen	17,9	1-55	35	6-97	3,9	39	73
Summe 16 EPA-PAK	276	64-876	611	118-1613	96	772	975

Tab. 39 zeigt die Gehalte der 16 EPA-PAK in den Oberböden der BDF bei Erstbeprobung 1996-1999 für die verschiedenen Nutzungen in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden. Benzo(b)- und Benzo(k)-fluoranthen wurden analytisch gemeinsam erfasst, weshalb der Leser nur 15 EPA-PAK einzeln aufgelistet vorfindet. Wie in Tab. 39 ersichtlich, wurden höhere Konzentrationen in den Oberböden der BDF vor allem bei den Einzelkongeneren Phenanthren, Fluoranthen, Pyren, Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b,k)fluoranthen, Indeno(1,2,3-cd)pyren und Benzo(g,h,i)perylen, mit meist mehr als 3 kondensierten Kohlenstoffringen gemessen, als bei anderen EPA-PAK. Besonders niedrig waren die Gehalte bei PAK mit nur 2-3 kondensierten Kohlenstoffringen, besonders bei Naphtalin, Acenaphtylen, Acenaphten und Fluoren. Das ist insofern bemerkenswert, weil PAK mit einer geringeren Anzahl kondensierter Kohlenstoffringe und damit geringerer Molmasse im Allgemeinen leichter biologisch abgebaut werden bzw. leichter aus dem Boden ausgasen können, als das bei den höhermolekularen PAK der Fall ist. Somit verschiebt sich über die Zeit das Spektrum der EPA-PAK hin zu PAK mit größerer Anzahl an kondensierten Kohlenstoffringen.

PAK-Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF nach Humusgehalt und Vorsorgewerte

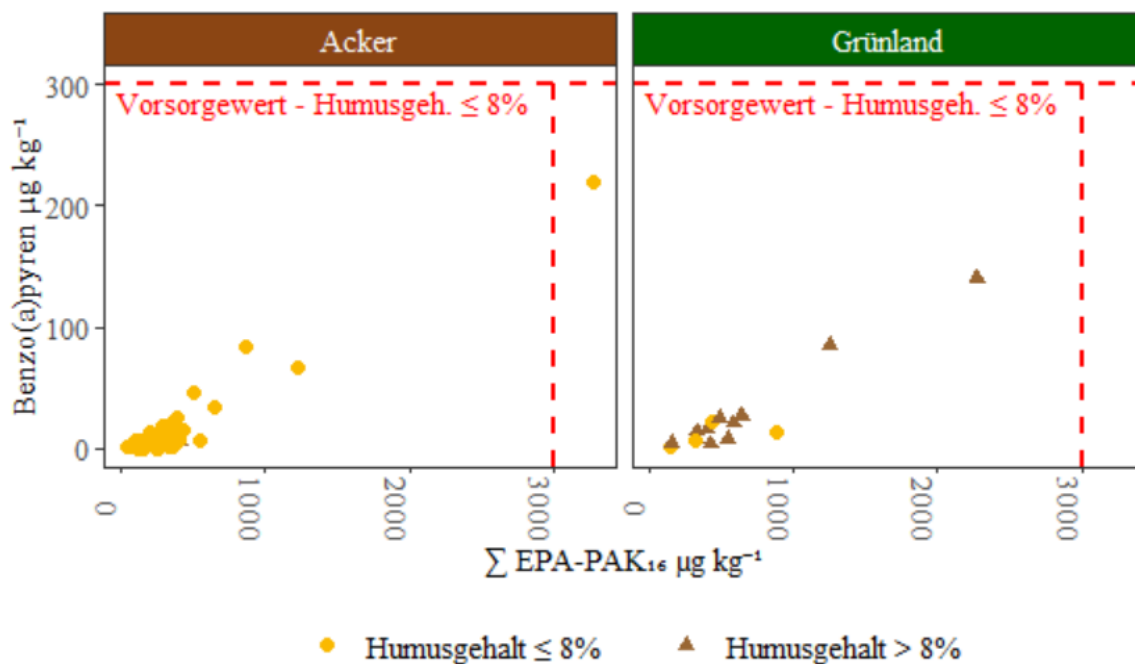


Abb. 104: Gehalte an BaP und Summe PAK₁₆ in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1996-99 bezogen auf lufttrockenen Boden. Die Vorsorgewerte gelten für Böden ≤ 8% Humusgehalt. Die weniger strengen, höheren Vorsorgewerte für Böden über 8% Humusgehalt werden bei BDF nicht erreicht und sind folglich nicht eingezeichnet.

Benzo(a)pyren ist ein höhermolekularer Vertreter der PAK (5 kondensierte Benzolringe) und gilt als besonders persistent und toxisch. Deshalb wird es neben der Summe aller 16 EPA-PAK häufig gesondert bei Grenzwerten (hier Vorsorgewerten der BBodSchV) ausgewiesen. Bei Erstaufnahme 1996-99 wurde jedoch für Benzo(a)pyren [B(a)P] in keinem Fall, der bei Böden ≤ 8% Humusgehalt gültige („strengere“) Vorsorgewert der BBodSchV in den Oberböden der Acker- und Grünland-BDF überschritten. Für die überwiegende Zahl der BDF lag der Gehalt an BaP sogar unter 100 µg kg⁻¹ lufttrockenem Bodens und somit deutlich unterhalb des Vorsorgewertes (0,3 mg).

Auch für die Summe der 16-EPA-PAK lagen die Werte bei Erstaufnahme meist deutlich unter dem Vorsorgewert der BBodSchV (3000 µg kg⁻¹ lufttrockenem Boden, für Böden ≤ 8% Humusgehalt). Lediglich bei **BDF 40** (Nutzung Acker) wurde eine leichte Vorsorgewertüberschreitung festgestellt. Die Ursache dafür ist jedoch unbekannt, möglicherweise eine punktuelle Belastung mit Brandrückständen.

Entwicklung der PAK-Gehalte ausgewählter Acker- und Grünland-BDF im Beobachtungszeitraum

Bei 12 BDF mit erhöhten PAK-Gehalten bei der Erstuntersuchung 1996-99 wurden bei den Beprobungen 2012 und 2016 Wiederholungsuntersuchungen des Oberbodens durchgeführt, um die Entwicklung der Gehalte feststellen zu können.

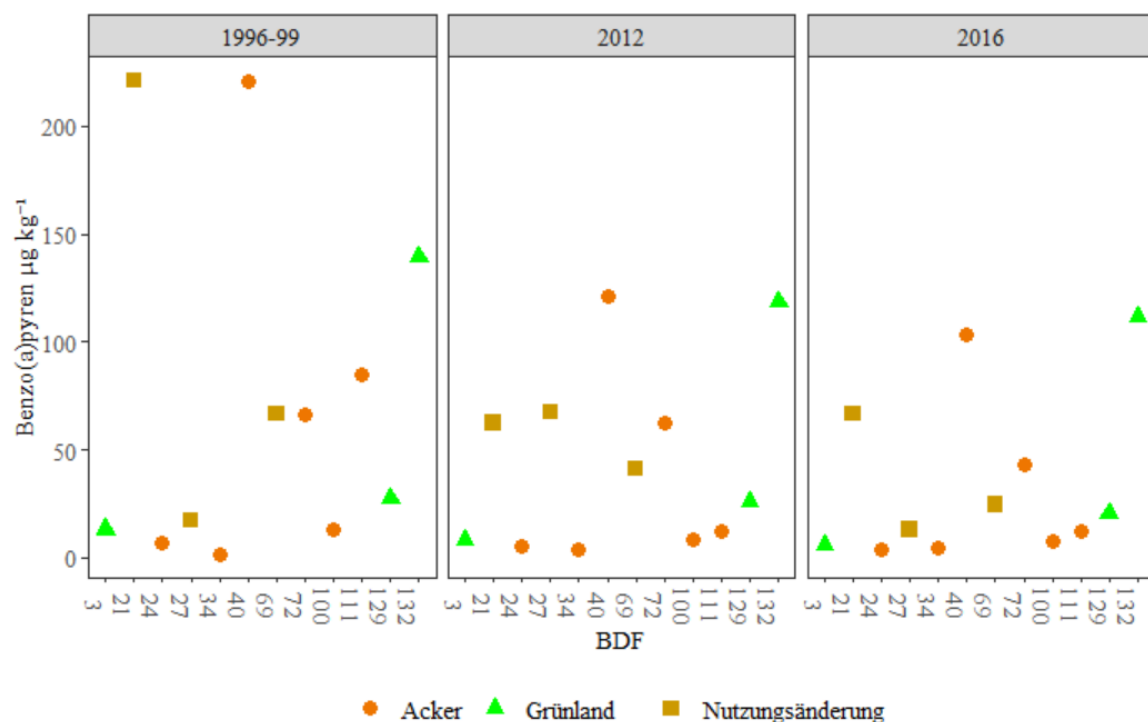


Abb. 105: Zeitliche Veränderung der BaP-Gehalte in Oberböden 12 ausgewählter BDF, differenziert nach Nutzung und bezogen auf lufttrockenen Boden.



Abb. 106: Zeitliche Veränderung der Summe-PAK₁₆-Gehalte in Oberböden 12 ausgewählter BDF, differenziert nach Nutzung und bezogen auf lufttrockenen Boden.

Abb. 105 und Abb. 106 zeigen die Veränderungen der PAK-Gehalte für Benzo(a)pyren und Summe PAK₁₆ in den Oberböden 12 ausgewählter BDF, die über alle 3 Probenahmeserien beprobt wurden. BDF mit Nutzungsänderung (Umstellung von Acker in Grünland oder umgekehrt), die aufgrund eines Wechsels der Beprobungstiefen bei den anderen Schadstoffauswertungen unberücksichtigt blieben, werden aufgrund der geringen Anzahl BDF für eine Zeitreihe explizit mit dargestellt.

Wie die Abb. 105 und Abb. 106 zeigen, gingen in der Regel die Gehalte der PAK in den Oberböden der 12 BDF zurück und das gleichermaßen für B(a)P wie die Σ PAK₁₆. Der stärkere Rückgang zwischen der 1. und 2. Beprobung kann durch einen notwendigen Laborwechsel oder den langen Zeitabstand zwischen Erstaufnahme und Zweituntersuchung (>10 Jahre - zwischen Zweit- und Drittuntersuchung waren nur 4 Jahre Abstand!) mitbeeinflusst worden sein. Ein in der Tendenz leichter Rückgang der PAK-Gehalte in den BDF-Oberböden ist aber auch zwischen 2012 und 2016 feststellbar. Es lässt sich somit insgesamt ein rückläufiger Verlauf der PAK-Belastungen in den Oberböden der BDF nachweisen.

2.4.2 Chlorierte Kohlenwasserstoffe

Kurzsteckbrief Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW):

CKW wie DDT, Lindan (γ -HCH) oder Hexachlorbenzol (HCB) wurden jahrzehntelang als Pestizide oder Beizmittel in großem Umfang eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Persistenz in der Umwelt und biotischen Systemen und ihrer starken Akkumulation in der Nahrungskette, wurde die Anwendung der meisten Mittel inzwischen aber verboten. Als relevante Umweltchemikalien sind sie jedoch auch heute noch in Böden messbar.

DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan): toxisches, persistentes Organochlorpestizid, früher als Insektizid und sehr wirksames Kontakt- und Fraßgift in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt. Kommerzielle DDT besteht aus den Isomeren p,p'-DDT (ca. 77%), o,p'-DDT (ca. 15%) und den Abbauprodukten (Metaboliten) DDE (Dichlordiphenyldichlorethen) und DDD (Dichlordiphenyldichlorethan). Von 1946-1972 war es das meistgenutzte Insektizid, besonders zur Bekämpfung der Malaria, die von der Anopheles-Mücke übertragen wird. DDT ist in der Umwelt sehr persistent. Im Boden adsorbiert es bevorzugt an die organische Substanz und ist somit eher in Oberböden zu finden. In der Atmosphäre kann DDT an Staubpartikel gebunden über große Entfernungen transportiert werden. Es akkumuliert im Fettgewebe von Tieren und wird so in der Nahrungskette angereichert (Biomagnifikation). Für Menschen und Tiere ist DDT toxisch und wirkt als endokriner Disruptor. Es steht im Verdacht, mutagen und kanzerogen zu sein. Seit Inkrafttreten der Stockholmkonvention 2004 darf DDT nur noch zur Bekämpfung krankheitsübertragender Insekten eingesetzt werden. In der BRD gilt bereits seit 1972 ein DDT-Verbot.

Das neuroaktive Kontaktinsektizid Lindan (Gamma-Hexachlorcyclohexan) ist ubiquitär verbreitet und wurde besonders Anfang der 80er Jahre großflächig und in großen Mengen im Wald eingesetzt (Borkenkäfer) oder fand Anwendung als Holzschutzmittel. In der Landwirtschaft besaß es eine Zulassung für alle wichtigen Kulturen (Getreide, Mais, Raps, Kartoffeln u. a.). In den 1980er Jahren wurde der Einsatz aber stark eingeschränkt und Lindan am 01.09.2006 vom Markt genommen. Es ist sowohl akut als auch chronisch toxisch. Im Vergleich zu anderen chlororganischen Insektiziden besitzt es eine mittlere Wasserlöslichkeit, Flüchtigkeit und Biokonzentrationstendenz. In mikrobiologisch aktiven Böden können innerhalb eines Jahres aber 50-70 % des Wirkstoffes abgebaut werden. Es ist besonders an die organische Substanz im Boden adsorbiert und daher häufiger in Oberböden zu finden.

Hexachlorbenzol (HCB) ist ein Fungizid, das seit 1945 zur Saatgutbeizung v. a. gegen Zwergsteinbrand eingesetzt und seit 1981 aber vollständig verboten wurde. HCB ist auch Ausgangsprodukt für die Herstellung verschiedener Verbindungen wie Pentachlorphenol (PCP), Pentachlorthiophenol und versch. Farbstoffe. Es reichert sich, aufgrund seiner vergleichsweise geringen Wasserlöslichkeit im Boden stark an (ebenfalls bevorzugt an die organische Substanz im Boden) und ist dort nur sehr schwer abbaubar. Es wurde wiederholt in verschiedenen Bereichen der Umwelt (Wasser, Luft, Nahrungsmitteln, Sedimenten) nachgewiesen.

Fortsetzung Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW):

Grenzwerte/Höchstgehalte in Böden: -

Höchstgehalte in Lebens- und Futtermitteln:

Höchstgehalt in mg kg^{-1} (ppm), bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (FuttMV, 2002/32/EG Anh. 1 - konsolid. Text v. 28.11.2019) für Futtermittel-Ausgangserzeugnisse in mg kg^{-1} :

Σ DDT: 0,05, HCB: 0,01 und γ -HCH: 0,2

(HLUG, 2014)

2.4.2.1 Ergebnisse CKW - Übersicht

Die CKW wurden nur bei Erstbeprobung 1985-87 auf allen BDF im Oberboden untersucht. Die Ergebnisse wurden ausführlich im Bericht „10 Jahre Bodendauerbeobachtung an der LBP“, Teil I (Stoffbestand des Bodens, Kap. 3) und Teil II (Stoffeinträge in den Boden, Kap. C.4) dargestellt (LBP, 1997 – Teil I und II). Auf ausgewählten BDF, wo bei Erstbeprobung CKW-Werte über der Quantifizierungsgrenze gemessen wurden, sind die CKW 2012 und 2016 erneut untersucht worden (s.a. Kap. 2.1.2).

Tab. 40: CKW-Gehalte in BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1985-87) in $\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockenem Boden, differenziert nach Nutzungen (MW=Mittelwert).

	80 Acker-BDF		18 Grünland-BDF	
	MW	90 % der Werte	MW	90 % der Werte
p,p-DDT	1,0	0-4,9	3,3	0-4,5
o,p-DDT	0,5	0-1,8	1,1	0-1,6
p,p-DDD	0,1	0-0,4	0,3	0-1,3
o,p-DDD	0,3	0-0,3	0,3	0-0,3
p,p-DDE	1,0	0-5	1,9	0-12,3
o,p-DDE	0,3	0-0,3	0,3	0-0,3
Σ DDT + Metaboliten	2,6	0-12	8,4	0-20,4
α -HCH	0	0	0	0
β -HCH	0	0	0	0
Lindan (γ -HCH)	0,4	0-1,1	0,4	0-1,5
δ -HCH	0	0	0	0
Σ HCH	0,4	0-1,1	0,6	0-1,5
HCB	1,2	0-5,6	2,4	0-3,2

2.4.2.2 DDT und Metaboliten

Früher war DDT ein sehr wichtiges und häufig eingesetztes Insektizid. Wegen seiner starken Akkumulation in der Nahrungskette wurde es aber schon 1972 (DDT-Gesetz vom 07.08.1972) verboten.

Technisches DDT besteht überwiegend aus den beiden DDT-Isomeren p,p'- und o,p'-DDT und verschiedenen Abbauprodukten (Metaboliten). Hauptisomer ist p,p'-DDT mit einem Mengenanteil über 70 % (s. Tab. 41).

Tab. 41: Prozentuale Anteile verschiedener DDT und Metaboliten in technischem DDT (BUA-Stoffbericht 216, 1998: Gesellschaft Deutscher Chemiker).

p,p'-DDT	o,p'-DDT	p,p'-DDD	o,p'-DDD	p,p'-DDE	o,p'-DDE	sonstige
77,1	14,9	0,3	0,1	4	0,1	3,5
65-80	15-21	≤ 4				$\leq 1,5$ DDOH

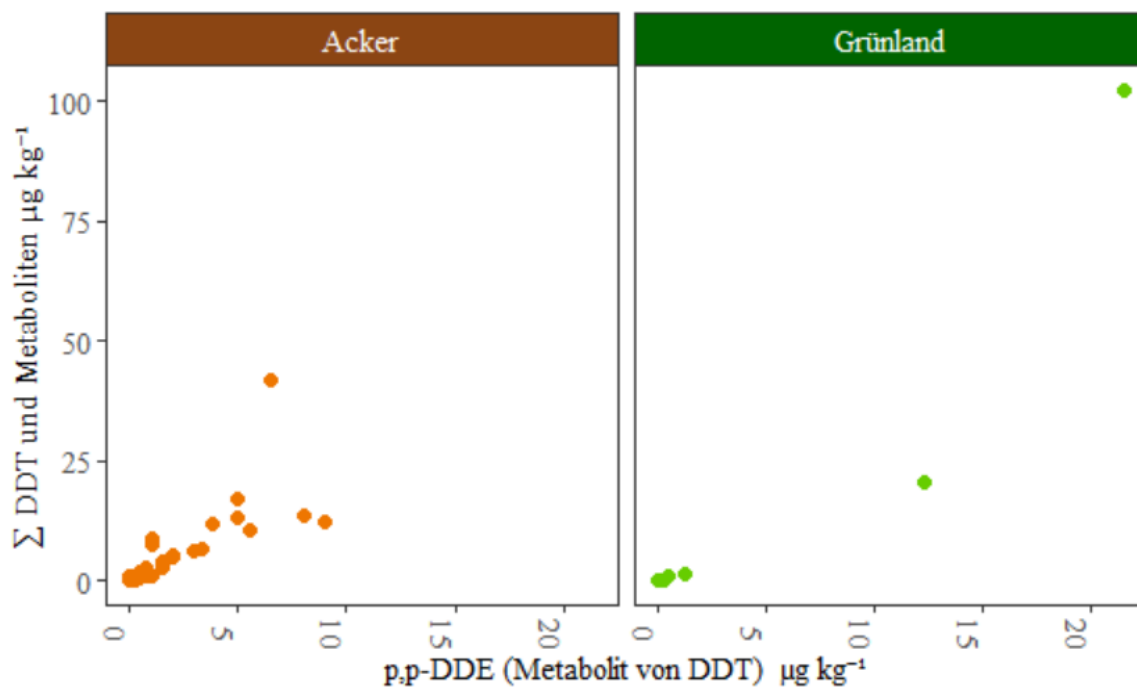


Abb. 107: Summe DDT und p,p'-DDE in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden. P,p'-DDE wurde unter den DDT-Metaboliten ausgewählt, weil bei Erstuntersuchung öfters Werte über der Nachweisgrenze lagen und es auf BDF mit den höchsten Konzentrationen im Boden gemessen wurde.

Bei Erstaufnahme (1985-87) wurden für die Summe DDT und Metaboliten meist weniger als $20 \mu\text{g kg}^{-1}$ und weniger als $10 \mu\text{g p,p}'\text{-DDE}$ (eines wichtigen DDT-Metaboliten) in lufttrockenen Oberböden der BDF gemessen. Ausnahmen sind Acker-**BDF 100** ($6,5 \mu\text{g p,p}'\text{-DDE}$ und $42 \mu\text{g}$ Summe DDT im Oberboden) sowie die beiden Grünland-**BDF 36** ($22 \mu\text{g p,p}'\text{-DDE}$ und $102 \mu\text{g}$ Summe DDT im Oberboden) und **BDF 129** ($12 \mu\text{g p,p}'\text{-DDE}$ und $20 \mu\text{g}$ Summe DDT im Oberboden).

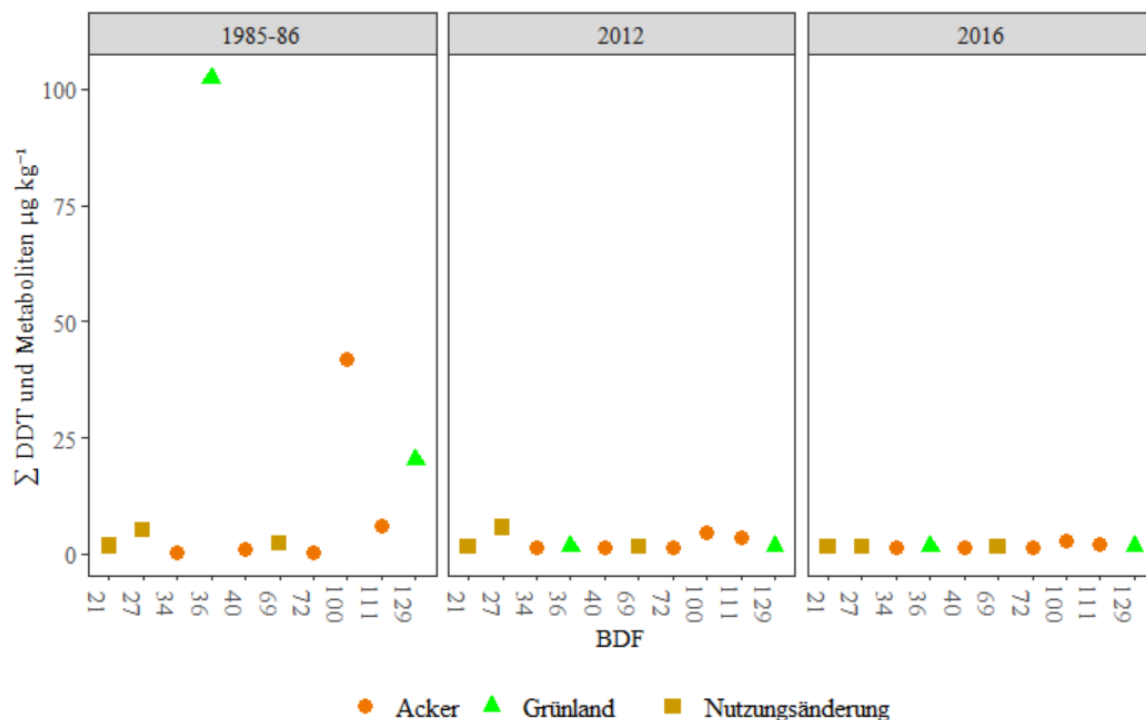


Abb. 108: Zeitliche Veränderung der Gehalte an Summe DDT+Metaboliten in BDF-Oberböden 10 ausgewählter BDF [$\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockener Boden].

Von den 10 BDF, die zusätzlich zur Erstaufnahme (1985/86) auch in den Jahren 2012 und 2016 in BDF-Oberböden untersucht wurden, konnte in späteren Probenahmeserien nur noch äußerst wenig DDT (Summe DDT und aller Isomere und Metaboliten) im Oberboden gemessen werden. Es ist zu erwarten, dass die Konzentrationen weiter abnehmen werden und DDT in Zukunft als Parameter aus dem Monitoring herausgenommen werden kann.

2.4.2.3 Hexachlorcyclohexane (HCH)

Wie in Tab. 40 ersichtlich, wurde aus der Gruppe der Hexachlorcyclohexane in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF ausschließlich Lindan (= γ -Hexachlorcyclohexan) und das in nur sehr geringen Konzentrationen (Bereich der Quantifizierungsgrenze $1 \mu\text{g kg}^{-1}$) festgestellt.

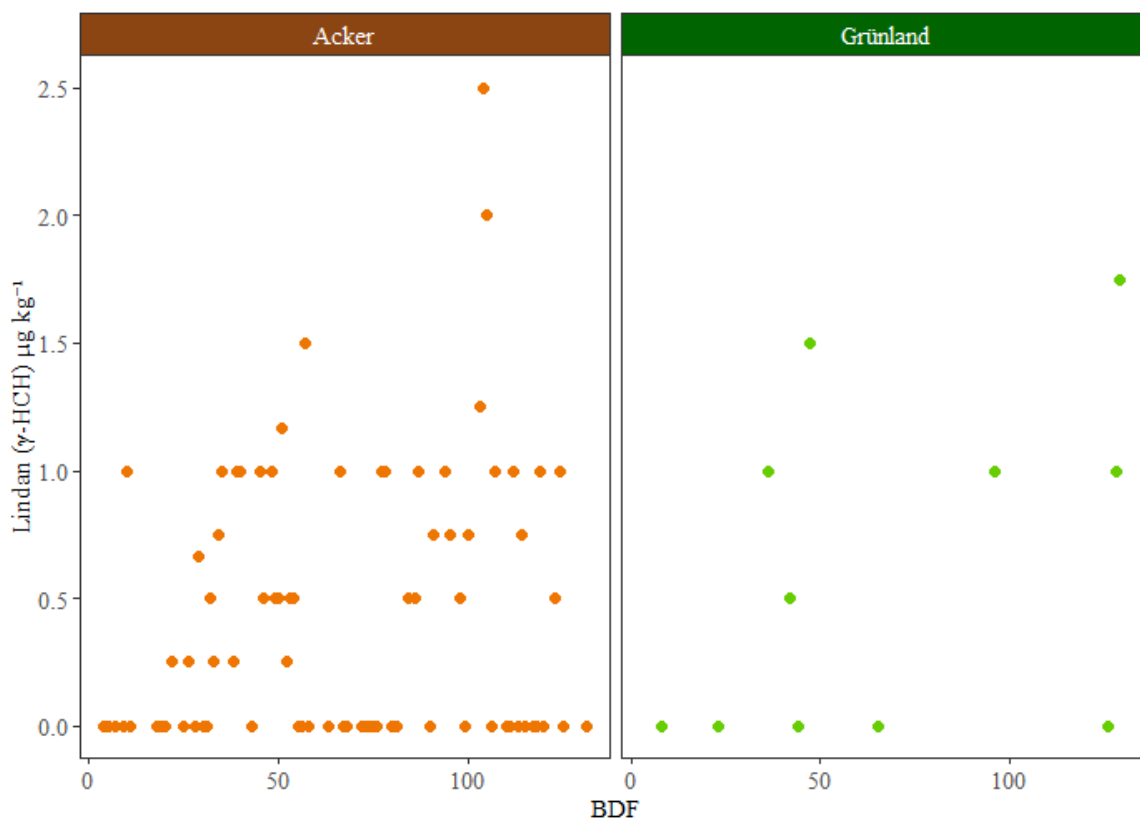


Abb. 109: Lindan (γ -HCH (=Hexachlorcyclohexan))-Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden.

Die bei Erstaufnahme (Bodenprobenahmeserie 1, 1985-86(87)) gemessenen Konzentrationen an Gamma-HCH (γ -Hexachlorcyclohexan bzw. Lindan) in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF sind sehr niedrig wie Abb. 109 zeigt. Nur bei ganz wenigen BDF wurden überhaupt Werte über der Quantifizierungsgrenze von $1 \mu\text{g Lindan kg}^{-1}$ im Oberboden gemessen.

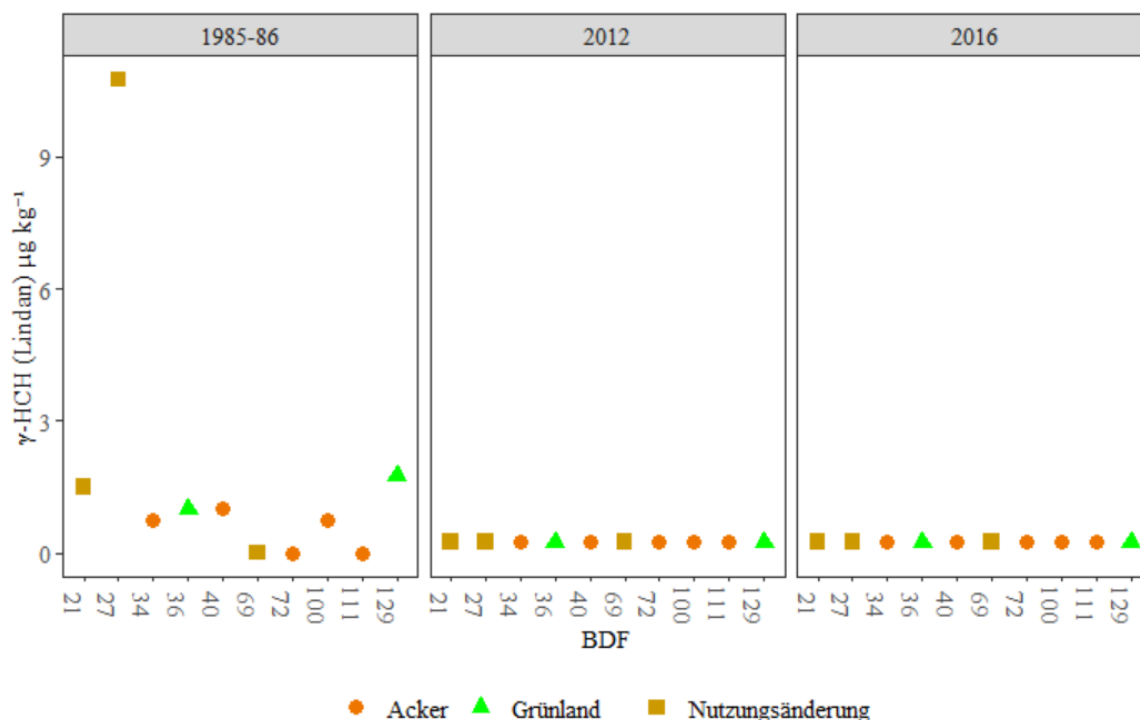


Abb. 110: Zeitliche Veränderung der Gehalte an Lindan in BDF-Oberböden 10 ausgewählter BDF [$\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockener Boden].

Die ohnehin nur sehr geringen Konzentrationen an Lindan in BDF-Oberböden haben bei denjenigen 10 BDF, für die über alle 3 Beprobungsserien im Beobachtungszeitraum Messwerte vorlagen, weiter abgenommen wie Abb. 110 zeigt.

Die insgesamt sehr niedrigen Lindan-Gehalte in BDF-Oberböden verbunden mit einem zeitlichen Rückgang auf 10 der BDF, rechtfertigen keine Fortsetzung der Untersuchungen dieses Stoffes mehr auf BDF, weshalb darüber nachgedacht werden sollte, Lindan aus dem Monitoring herauszunehmen.

2.4.2.4 Hexachlorbenzol (HCB)

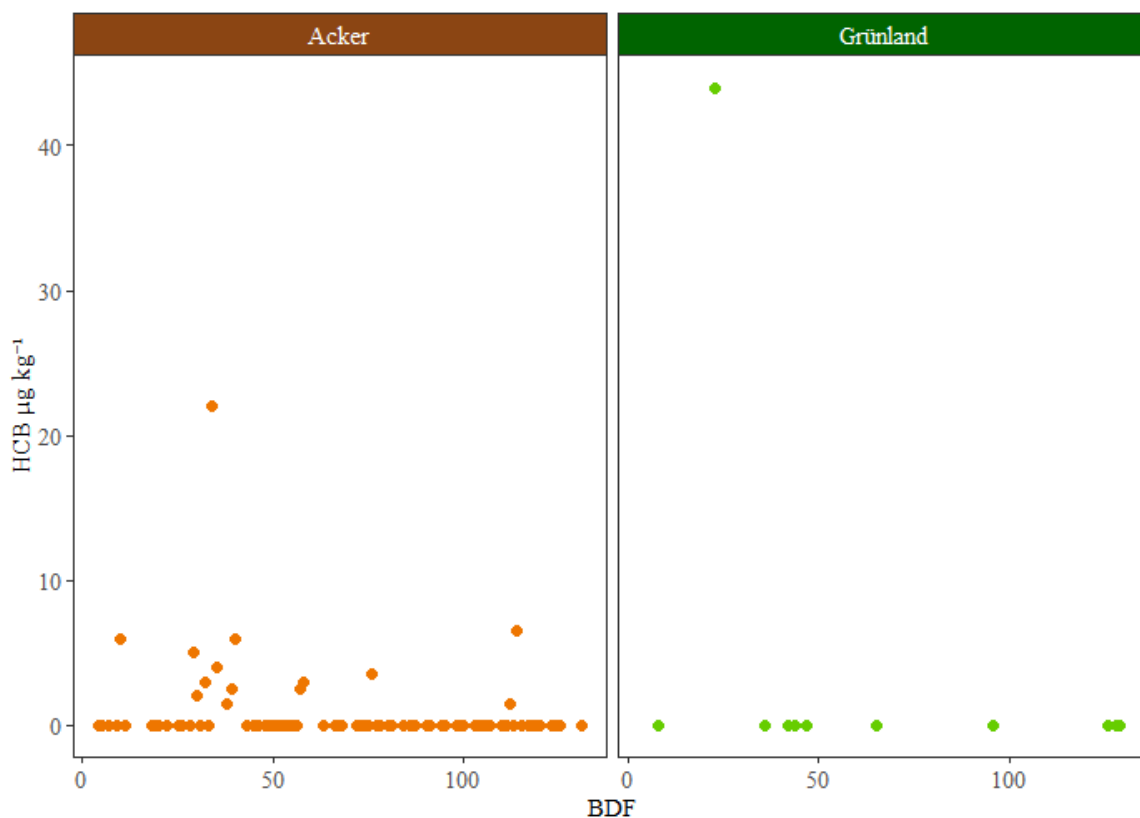


Abb. 111: Hexachlorbenzol (HCB)-Gehalte in Oberböden der Acker- und Grünland-BDF bei Erstaufnahme 1985-87 bezogen auf lufttrockenen Boden.

Die gemessenen Konzentrationen an Hexachlorbenzol (HCB) in den BDF-Oberböden bei Erstaufnahme (1985/86) bewegen sich auf sehr niedrigem Niveau. Nur bei einer Acker- (**BDF 34**: 22 µg HCB) und einer Grünland-BDF (**BDF 23**: 44 µg HCB) wurden überhaupt HCB-Konzentrationen über 10 µg kg⁻¹ lufttrockenem Boden gemessen.

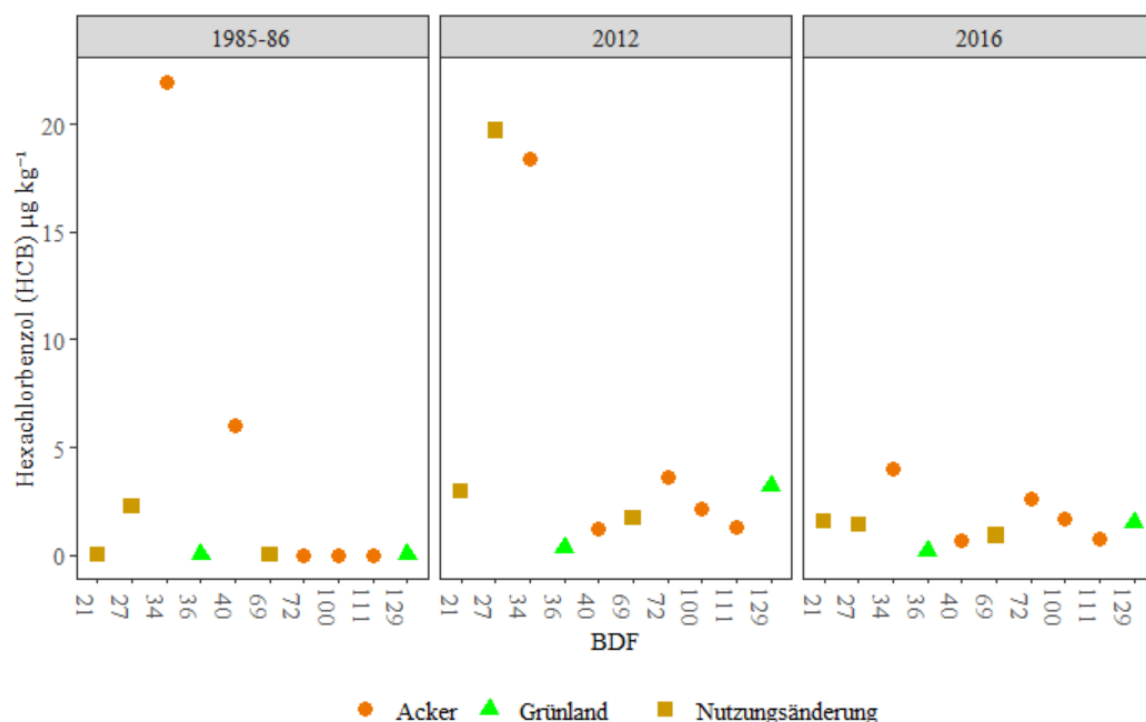


Abb. 112: Zeitliche Veränderung der Gehalte an HCB in BDF-Oberböden 10 ausgewählter BDF [$\mu\text{g kg}^{-1}$ lufttrockener Boden].

Bei den 10, über die Erstaufnahme hinaus beprobten BDF-Oberböden, hat die HCB-Konzentration weiter abgenommen, besonders auch bei **BDF 34**, wo bei Erstuntersuchung noch $22 \mu\text{g}$ und 2016 nur mehr $4 \mu\text{g}$ HCB gemessen wurden. Ausnahme ist **BDF 27**, die Fläche liegt im Donaumoos, hier fand eine Nutzungsänderung statt (Fläche war bis 2006 ein Acker und ist seitdem Grünland) – der Anstieg 2012 ist nicht erklärbar, besonders da bei der Folgebeprobung 2016 der HCB-Gehalt wieder auf dem Niveau von 1986 lag. Der Standort weist von allen BDF den höchsten Humusgehalt ($>60\%$) auf. Die Messung von organischen Schadstoffen in sehr humusreichen Böden, ist aufgrund der starken Bindung an den Humus recht schwierig, was vielleicht ein Grund dafür sein könnte.

2016 wurde dann meist nur noch sehr wenig HCB im Oberboden der 10 BDF gemessen. Es ist wahrscheinlich, dass die Konzentrationen an HCB auch in Zukunft weiter abnehmen werden und HCB ebenfalls als Parameter aus dem Monitoring herausgenommen werden könnte.

3 Einträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Böden

Anorganische Schad- und Spurenstoffe können über verschiedene Wege in landwirtschaftlich genutzte Böden gelangen. Haupteintragspfade bei Acker- und Grünland sind die Düngung (Einträge über Mineral- und Wirtschaftsdünger) und Immissionen, also Schadstoffeinträge über die Luft. Bei Sonderkulturen (Hopfen, Obst, Wein) werden wegen der fungiziden Wirkung Kupfer und Zink als Pflanzenschutzmittel eingesetzt und zusätzlich zur Düngung und den Einträgen aus der Luft, in Böden eingetragen. Im Folgenden werden die Einträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Böden über diese Eintragspfade ausführlich dargestellt.

3.1 Schadstoffeinträge durch Wirtschaftsdünger

Wirtschaftsdünger (auch wirtschaftseigene Dünger oder Hofdünger genannt) sind nach Düngegesetz (DüngG, 2009) Düngemittel, die

- als tierische Ausscheidungen bei der Haltung von Tieren zur Erzeugung von Lebensmitteln oder bei der sonstigen Haltung von Tieren in der Landwirtschaft oder
- als pflanzliche Stoffe im Rahmen der pflanzlichen Erzeugung oder in der Landwirtschaft,

auch in Mischungen untereinander oder nach aerober oder anaerober Behandlung, anfallen oder erzeugt werden.

Durch das Aufbringen von Wirtschaftsdüngern können neben Nährstoffen auch anorganische Schad- und Spurenstoffe (Schadstoffdefinition s. Kap. 2, S. 20) in den Boden gelangen. Besondere Bedeutung haben dabei Wirtschaftsdünger viehhaltender Betriebe, da diese v.a. wegen möglicher Futtermittelzusätze (z.B. Kupfer, Zink) stofflich belastet sein könnten. Bei BDF-Betrieben mit Sonderkulturen wie Wein und Hopfen fallen auch Reben- bzw. Hopfenrebenhäcksel als Wirtschaftsdünger an. Darum werden seit Anfang des Bodenmonitorings tierische und pflanzliche Wirtschaftsdünger der BDF-Betriebe regelmäßig beprobt und untersucht (s. LBP, 1997 Teil II, Kap. 2).

Etliche BDF-Betriebe betreiben überhaupt keine Viehhaltung - unter den viehhaltenden Betrieben aber sind die meisten Rinderhalter oder mit deutlich geringerem Anteil Schweinehaltende Betriebe. Wenige BDF-Betriebe halten auch Hühner oder anderes Geflügel, Pferde, Schafe oder Ziegen. Im Beobachtungszeitraum haben aber auch einige Betriebe die Viehhaltung ganz aufgegeben oder die (Tier-)Art hat bei der Viehhaltung gewechselt (s. auch Band 1 der Veröffentlichung „35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern“).

Rinder- und Schweinegülle sind mit Abstand die wichtigsten Wirtschaftsdünger (47 % sind Rindergülle, 22 % Schweinegülle). Rindermist- und -jauche folgen mit deutlichem Abstand (5 % aller Wirtschaftsdünger-Proben). Der Schwerpunkt der Auswertung liegt daher auf Rinder- und Schweinegülle. Besonders bei Schweinen wird dem Futter häufig und dann meist in höherer Dosis, Kupfer oder Zink beigemischt, besonders in der Ferkelzucht (s. LfL, 2006). Da innerhalb der BDF nur wenige Betriebe Schweine halten und der Stichprobenumfang damit für plausible Auswertungen zu klein war, wurden seit 1993 auch zusätzliche Betriebe (also nicht BDF-Betriebe) mit intensiverer Schweinehaltung in die Beprobungen bzw. Untersuchungen einbezogen. Tab. 42 bis Tab. 44 geben einen Überblick der im

Beobachtungszeitraum von BDF- und Zusatzbetrieben untersuchten Rinder- und Schweinegülle.

Ein etwas neueres Phänomen stellt die (Mit-)Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen dar. Deshalb wurden seit 2005 auch Gärreste von BDF-Betrieben beprobt und untersucht.

Im Beobachtungszeitraum (1985 bis 2018) wurden so insgesamt 564 Wirtschaftsdünger beprobt und untersucht. Davon stammen von 19 Zusatzbetrieben (Nicht-BDF-Betrieben) insgesamt 59 Schweinegülle, eine Rindergülle sowie 7 Biogas-Gärreste.

3.1.1 Stoffauswahl

Die Wirtschaftsdünger wurden auf folgende Parameter untersucht:

- Allgemeine Untersuchungsparameter: Gehalt an Trockenmasse (TM), Organische Substanz, pH-Wert;
- Nährstoffe: N_t , NH_4-N , Ca (als CaO), K (als K_2O), Mg (als MgO), Na (als Na_2O), P (als P_2O_5), S sowie
- 19 Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe: Al, As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, U und Zn.

Der Schwerpunkt der Auswertungen liegt auf den anorganischen Schad- und Spurenstoffen in Wirtschaftsdüngern. Die Nährstoffgehalte in Wirtschaftsdüngern werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Für die Berechnung von maximalen Schadstofffrachten (s. Kap. 3.1.8), bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung, ist es aber wichtig, den Gesamtstickstoffgehalt (N_t) sowie den Trockenmasse-Gehalt (TM) zu kennen.

3.1.2 Methodik

3.1.2.1 Probenahme

Wegen der großen Bandbreite möglicher Wirtschaftsdünger, ihrer unterschiedlichen Konsistenz (fest, flüssig) und ihrer z.T. sehr unterschiedlichen Zusammensetzung (tierische Ausscheidungen mit oder ohne pflanzliche Beimengungen) und der damit verbundenen stofflichen Inhomogenitäten, muss bei der Probenahme besonders darauf geachtet werden, für den jeweiligen Wirtschaftsdünger eine homogene und möglichst repräsentative Probe zu nehmen. Bei Gülle z.B. ist es unbedingt notwendig, eine gute Durchmischung der flüssigen und festen Bestandteile zu gewährleisten. Die Vorgabe war daher, die Probe, wenn möglich, zum Zeitpunkt der Ausbringung zu nehmen, also nach dem Aufrühren der Gülle.

Die Probenahme von Wirtschaftsdüngern ist in Kap. 3.4 von Band 1 der Veröffentlichung „35 Jahre Boden-Dauerbeobachtung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Bayern“ und unter https://www.lfl.bayern.de/zentrale_analytik/180385/index.php ausführlich beschrieben. Tab. 42 bis Tab. 44 geben einen Überblick, der im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben genommenen Rinder- und Schweinegülle-Proben (zusammen 399 Gülleproben). Im Beobachtungszeitraum fanden insgesamt 6 Beprobungskampagnen im Abstand von jeweils 6 Jahren statt.

Tab. 42: Anzahl der im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben genommenen Rindergülleproben (rot: Zusatzbetriebe).

BDF	Beprobung - Rindergülle (Serie + Jahr)						Σ Proben
	Anzahl untersuchter Gülleproben						
	1: 1985-1986	2: 1993	3: 1999	4: 2005/06	5: 2012	6: 2018	
1	1	1	1				3
2	1	1	1	1	1	1	6
3	1	1		1			3
4		1	1	1	1	1	5
5	1					1	2
6	1	1	1	1	1	1	6
7			1	1	1	1	4
8				1		1	2
11		1					1
12	1	1	1	1	1	1	6
13	1	1		1	1	1	5
15	1	1					2
19	1		1	1	1		4
23	1	1					2
24			1				1
27	1						1
28	1	1	1	1	1	1	6
31	1	1	1	1			4
34	1	1	1	1	1	1	6
35	1						1
36	1	1	1	1	1	1	6
38	1	1	1	1		1	5
41	1		1	1			3
42	1	1	1	1	1	1	6
43	1	1	1				3
44	1	1	1	1			4
46				1	1	1	3
48	1	1	1	1	1	1	6
49					1	1	2
50	1	1	1	1	1	1	6
51	2	1	1				4
52				1	1		2
53			1	1	1	1	4
54	1	1	1		1	1	5
57		1	1				2
58	1	1	1	1			4
64	1	1					2
65	1	1	1	1		1	5
70			1				1
71				1			1
73	1	1		1			3
74	1	1	1	1		1	5
75			1	1	1	1	4
76		1	1		1	1	4
77	1						1
78	2	1	1	1	1	1	7
79	1	1		1	1	1	5

81	1	1	1	1	1	1	6
83	1	1		1	1		4
84	1			1	1	1	4
85	1	1	1	1	1		5
87	1				1	1	3
89		1	1				2
90						1	1
91	1						1
92		1					1
93		1		1	1	1	4
95	2	1		1	1	1	6
96		1					1
99					1	1	2
100		1					1
103		1					1
105	1	1				1	3
110		1	1				2
112						1	1
113	1			1			2
115	1	1	1				3
117		1	1	1	1	1	5
120	1	1		2			4
121	1	1		1	1	1	5
126	1		1	1	1	1	5
128	1	1	1	1	1	1	6
129	9	1	1	1	1	2	15
130	1	1	1	1			4
131			1				1
222			1				1
Σ Proben	60	50	42	45	35	40	<u>272</u>

Tab. 43: Anzahl der im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben genommenen Schweinegülleproben (rot: Zusatzbetriebe).

BDF	Beprobung - Schweinegülle (Serie + Jahr) Anzahl untersuchter Gülleproben						Σ Proben
	1: 1985-1986	2: 1993	3: 1999	4: 2005/06	5: 2012	6: 2018	
9		1	1	1		1	4
10	1	1	1		1	1	5
20	1						1
21			1				1
40	3	1	1	1			6
52						1	1
60					1		1
66		1	1			1	3
72		1					1
76						1	1
77			1	1			2
80			1	1		1	3
86	2	1	1	1	1		6
88	1	1	1	1	1		5
91		1	1	1			3
92				1			1
101	1	1					2
104		1	1				2
107	2	1	1	1		1	6
110						1	1
112	2	1					3
113						1	1
114	1						1
120				1			1
123		1					1
124	1	1	1	1	1		5
131				1			1
201		1	1	1	1	2	6
202		1	1	1	1		4
203		1	1	1			3
204		1	1	1	1	2	6
205		1	1	1	1	2	6
211		1	1	1			3
212		1	1	1			3
213		1	1	1			3
221		1	2	1			4
222		1	1				2
223		1	1				2
224						1	1
231		1	1				2
232		1	1	1			3
233		1	1	1			3
234		1	1	1	1		4
235						2	2
237						1	1
238						1	1
Σ Proben	15	29	29	24	10	20	127

Tab. 44: Im Beobachtungszeitraum auf BDF- und Zusatzbetrieben beprobte Rinder(RG)- und Schweinegülle (SG).

Beprobung (Nr. und Jahr)	Anzahl untersuchter RG	Anzahl untersuchter SG	Summe Gülleproben
1: 1985-1986	60	15	75
2: 1993	50	29	79
3: 1999	42	29	71
4: 2005/06	45	24	69
5: 2012	35	10	45
6: 2018	40	20	60
Summe RG/SG:	272	127	<u>399</u>

In Tab. 43 ist ersichtlich, dass die geringe Anzahl Schweinegülle-Proben bei der Erstbeprobung ausschließlich auf BDF-Betrieben genommen wurde. Wie bereits erwähnt wurden deshalb ab 1993 auch von zusätzlichen Betrieben mit intensiverer Schweinehaltung Gülleproben genommen und ins Monitoring integriert (in Tab. 43 rot markiert). Es ist aber auch feststellbar, dass im Laufe des Beobachtungszeitraums insgesamt weniger Rinder- und Schweinegülle beprobt wurde. Besonders nach 1993 (79 Gülleproben) sank die Zahl der genommenen Gülleproben auf 71 Proben, 1999, 69 Proben, 2005/06 und nur noch 45 Proben 2012; 2018 wurden dann wieder 60 Gülleproben untersucht (s. Tab. 44). Gründe dafür sind, dass Betriebe die Tierhaltung ganz aufgegeben haben oder nicht mehr an Untersuchungskampagnen teilnehmen mochten (z.B. wegen Wechsel des Besitzers oder Pächters).

Wie Tab. 42 und Tab. 43 auch zeigen, konnte nur von wenigen BDF-Betrieben (N=13) über alle 6 Beprobungen Rindergülle gezogen werden. Bei Betrieben mit Schweinehaltung (BDF- und Nicht-BDF-Betriebe) fand keine durchgehende Beprobung von Schweinegülle zu allen Beprobungszeitpunkten statt. V.a. die Schweinehalter der Zusatzbetriebe, die erst 1993 am Monitoring teilnahmen, standen später für einer erneute Beprobung oft nicht mehr zur Verfügung. Deshalb wurden fehlende Zusatzbetriebe, wenn möglich, durch andere Betriebe ersetzt. Eine Ursache hierfür ist neben der Aufgabe der Viehhaltung auch die Umstellung der Betriebe auf Biogas-Erzeugung mit rein pflanzlichen Einsatzstoffen.

Die fehlende Kontinuität der Betriebe mit Viehhaltung führt daher zu jeweils sehr unterschiedlich großen Stichproben an Rinder- und Schweinegülle zu den einzelnen Beprobungszeitpunkten. Um die Stichprobenumfänge groß zu halten, wurde von einer Differenzierung in Acker- und Grünlandbetriebe oder Betrieben mit Sonderkulturen abgesehen.

3.1.2.2 Analytik Wirtschaftsdünger

Die Trockensubstanz wurde durch Eindampfen und Trocknen bei 105°C bis Gewichtskonstanz bestimmt. Die Menge an organischer Substanz ergibt sich aus dem Glühverlust. Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte mittels Glaselektrode in einer CaCl₂-Lösung.

Die Bestimmung von Gesamtstickstoff erfolgte nach dem Kjeldahl-Verfahren, Ammoniumstickstoff wurde mittels eines automatisierten Destillations- und Titrationsgerätes bestimmt. Obige Parameter wurden in der frischen Probe untersucht.

Für die Bestimmung der Gehalte an Schwermetallen, Spurenstoffen und weiteren Nährstoffen wurden die getrockneten Wirtschaftsdünger-Proben analog zum Boden (s. Kap. 2.2.2) mittels Königswasserextraktion (KW) aufgeschlossen [Methode: DIN ISO 11466: 06.97].

Die aufgeschlossenen Proben wurden bei Ersterhebung mit der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) gemessen, seit 1996 erfolgt die Messung mittels Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma [ICP-OES (=optische Emissionsspektrometrie) bzw. mit ICP-MS (Detektion mittels Massenspektrometer)].

3.1.3 Beurteilungsgrundlagen, gesetzliche Regelungen für Schadstoffeinträge durch Düngung, Kennzeichnungsschwellen- und Grenzwerte der DüMV

Neben Nährstoffen können bei der Düngung auch anorganische Schad- und Spurenstoffe in die Böden landwirtschaftlich genutzter BDF eingetragen werden. In der Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (= Düngemittelverordnung) (DüMV, 2012) sind für bestimmte Schadstoffe Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte festgelegt. Sie (s. Tab. 45) werden im Folgenden zur Bewertung der Messergebnisse bei den Wirtschaftsdüngern herangezogen, sie gelten bis auf die Kennzeichnungswerte für Cu und Zn auch für Mineraldünger.

Tab. 45: Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte der DüMV für anorganische Schadstoffe (TM=Trockenmasse, FM=Frischmasse).

Element	Kennzeichnung ab [mg kg ⁻¹ TM]	Grenzwert [mg kg ⁻¹ TM]
Arsen (As)	20	40
Blei (Pb)	100	150
Cadmium (Cd)	1,0	1,5
Cd für Düngemittel ab 5 % P ₂ O ₅ (FM)	20 mg kg ⁻¹ P ₂ O ₅	50 mg kg ⁻¹ P ₂ O ₅
Chrom (Cr) gesamt	300	-
Cr ^{VI}	1,2	2
Kupfer (Cu)*	500	-
Nickel (Ni)	40	80
Quecksilber (Hg)	0,5	1,0
Thallium (Tl)	0,5	1,0
Zink (Zn)*	1000	-

*gilt für Wirtschaftsdünger, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate, Pflanzenhilfsmittel

Düngemittel dürfen demnach nur in den Verkehr gebracht werden, wenn sie bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen nicht schädigen, den Naturhaushalt nicht gefährden und in den Düngemitteln sowie in den Ausgangsstoffen für diese Düngemittel, die Schadstoffgrenzwerte in Anlage 2, Tabelle 1.4, Spalte 4 der Düngemittelverordnung nicht überschritten sind. Für

Kupfer und Zink sind, da wichtige Spurennährstoffe, in Anlage 1, Abschnitt 4.1.1, Spalte 6 Höchstgehalte für Düngemittel mit zusätzlich den Typ bestimmenden Spurennährstoffen festgelegt worden. Der Höchstgehalt für Kupfer beträgt 900 mg kg^{-1} und für Zink 5000 mg kg^{-1} – die Höchstgehalte gelten jedoch nicht für Wirtschaftsdünger. In Anlage 2, Tabelle 1.2.12 und 1.2.13 der DüMV wird auch festgelegt, ab welchem Wert es für Wirtschaftsdünger und für Cu+Zn eine Kennzeichnungspflicht gibt (0,05 % bei Cu und 0,1 % TM bei Zn). Für $\text{Cr}_{\text{gesamt}}$ gilt nach Tab. 1.4, Anl. 2 der DüMV ein Kennzeichnungsschwellenwert von 300 mg kg^{-1} , ein entsprechender Grenzwert ist in der DüMV nicht festgelegt (die Kennzeichnungsschwellen- und Grenzwerte der DüMV sind in Tab. 45 aufgelistet).

3.1.4 Wie gelangen Schad- und Spurenstoffe in Rinder- und Schweinegülle

Schad- und Spurenstoffe können über verschiedene Wege in Ausscheidungen des Viehs (Kot und Urin) gelangen. Am bedeutendsten ist die Aufnahme von Schadstoffen über das Futter und die Aufnahme von schadstoffhaltigem Boden (Verschmutzung des Futters, Wühltätigkeit, Staubaufnahme, Direktaufnahme von Boden) (zu Schadstoffen im Boden, s. Kap. 2). Rinder nehmen besonders über das Grundfutter (Gras, Heu, Silage), das mit Bodenmaterial verunreinigt sein kann, bei der Beweidung auch durch Ausrupfen von Wurzeln und daran haftendem Boden, sowie durch Mineralzusätze ins Futter, Schadstoffe auf. Schweine nehmen über Wühltätigkeit im Boden Schadstoffe auch direkt aus dem Boden auf. Da Boden viele Mineralstoffe enthält, fressen Tiere Boden z.T. auch direkt. Auf die gezielte Zugabe von Kupfer und Zink ins Futter von Rindern und Schweinen zur Leistungs- und Wachstumsförderung der Tiere, wurde bereits oben (Einleitung von Kap. 3.1) hingewiesen. Aber auch über das Tränkwasser und die Luft (s. Kap. 3.3) nehmen Tiere Schad- und Spurenstoffe auf und scheiden diese anschließend wieder in Form von Kot und Urin aus. Deswegen lassen sich Schad- und Spurenstoffe auch in Gülle (Rinder- und Schweinegülle) messen.

In Futtermitteln gelten einige der bedeutendsten und besonders toxischen anorganischen Schadstoffe als unerwünschte Stoffe, weshalb es nach § 8 der Futtermittelverordnung verboten ist, Futtermittel mit einem Gehalt an einem unerwünschten Stoff, der den in Anhang I der Richtlinie 2002/32/EG festgesetzten Höchstgehalt überschreitet, in den Verkehr zu bringen, zu verfüttern oder zu Verdünnungszwecken mit dem gleichen oder einem anderen Futtermittel zu mischen (FuttMV, 1981). In der RICHTLINIE 2002/32/EG des europäischen Parlaments vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung (zuletzt am 28.11.2019 geändert) sind für einige Futtermittel Höchstgehalte für diese Schadstoffe im Futter festgelegt (s. Tab. 46).

Tab. 46: Unerwünschte Stoffe (Auswahl) in Futtermitteln gemäß § 8 der Futtermittelverordnung (FuttMV) und EG-RL 32/2002.

Unerwünschter Stoff	Art des Futtermittels	Höchstgehalt in mg kg^{-1} bezogen auf ein Futtermittel mit 88 % TM-Gehalt
Arsen	FuttM-Ausgangserzeugnisse	2
	Ergänzungsfuttermittel	4
	Alleinfuttermittel	2

Cadmium	FuttM-Ausgangserzeugnisse pflanzlichen Ursprungs	1
	Ergänzungsfuttermittel	0,5
	Alleinfuttermittel	0,5
Blei	FuttM-Ausgangserzeugnisse	10
	Ergänzungsfuttermittel	10
	Alleinfuttermittel	5
Quecksilber	FuttM-Ausgangserzeugnisse	0,1
	Mischfuttermittel	0,1

3.1.5 Ergebnisse und Diskussion anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Wirtschaftsdüngern – Übersicht Rinder- und Schweinegülle

Ein Überblick der Untersuchungsergebnisse aller Wirtschaftsdünger anhand wichtiger, statistischer Kennwerte, differenziert jeweils für die einzelnen Beprobungsserien, findet sich in den Tab. 65 bis Tab. 68 im ANHANG. Weil von allen Wirtschaftsdüngern Rinder- und Schweinegülle aber am umfanglichsten untersucht wurde, werden hier die Ergebnisse nur für diese ausführlich dargestellt.

Tab. 47: Untersuchungsergebnisse der in DüMV geregelten Elemente in Rinder- und Schweinegülle im Beobachtungszeitraum (1985-2018) in mg kg^{-1} TM (statistische Kennwerte der Einzelbeprobungen, siehe Tab. 65 & Tab. 66 im ANHANG; WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, N=Anzahl untersuchter Proben. Im Bodenteil in Kap 2.3.3 ausführlich beschriebene Elemente sind blau markiert).

WDA	N	STAT	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Tl	Zn
Rindergülle	272	Mittelwert	0,97	7,0	0,30	5,3	45	5,1	0,051	0,041	246
		Median	0,66	5,5	0,25	4,7	40	4,0	0,030	0,035	220
		5%-Perz.	0,24	1,0	0,11	2,0	22	2,2	0,005	0,002	111
		95%-Perz.	2,50	16,5	0,57	11,4	79	9,6	0,150	0,126	469
		Min.	0,03	0,3	0,07	1,0	11	1,2	0,005	0,002	61
		Max.	9,41	90,0	1,66	26,0	213	31,0	0,290	0,157	1376
Schweinegülle	127	Mittelwert	1,04	7,8	0,36	8,4	354	11,0	0,031	0,032	930
		Median	0,63	6,0	0,30	8,0	253	10,1	0,020	0,024	869
		5%-Perz.	0,21	1,0	0,16	3,0	83	5,3	0,005	0,002	192
		95%-Perz.	3,43	18,7	0,74	15,1	866	17,1	0,117	0,136	1838
		Min.	0,13	0,4	0,01	1,0	41	3,4	0,005	0,002	23
		Max.	7,60	26,0	1,23	22,0	1650	52,8	0,160	0,162	2622

Tab. 48: Untersuchungsergebnisse der übrigen Elemente in Rinder- und Schweinegülle im Beobachtungszeitraum (1985-2018) in mg kg^{-1} TM (statistische Kennwerte der Einzelbeprobungen, siehe Tab. 65 & Tab. 66 im ANHANG; WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, N=Anzahl untersuchter Proben. Im Bodenteil in Kap 2.3.3 ausführlich beschriebene Elemente sind blau markiert).

WDA	N	STAT	Al	Sb	Ba	B	Fe	Co	Mn	Mo	Se	U
Rindergülle	272	Mittelwert	1111	0,28	44,1	29,2	1760	1,30	255	3,4	0,87	0,289
		Median	1011	0,11	41,5	26,8	1633	1,04	248	2,2	0,76	0,168
		5%-Perz.	404	0,04	16,9	15,0	735	0,10	148	0,3	0,10	0,004
		95%-Perz.	2402	1,23	77,0	51,3	3199	3,39	369	10,2	2,29	0,899
		Min.	208	0,03	8,3	11,7	425	0,10	129	0,1	0,08	0,004
		Max.	3099	1,80	128,0	96,0	5162	5,88	858	31,7	3,28	1,596
Schweinegülle	127	Mittelwert	1066	0,41	50,0	65,6	2321	2,75	516	7,3	3,10	2,543
		Median	905	0,17	47,1	63,2	2243	2,34	501	6,4	2,57	1,641
		5%-Perz.	539	0,07	25,8	26,7	1103	0,28	257	2,4	1,00	0,004
		95%-Perz.	2212	0,98	77,2	126,8	3827	6,31	798	11,6	6,24	8,273
		Min.	263	0,02	18,2	2,0	664	0,10	89	1,0	0,10	0,004
		Max.	3378	11,62	116,9	191,0	5298	9,55	1473	57,0	10,81	11,895

3.1.6 Ergebnisse ausgewählter anorganischer Schad- und Spurenstoffe in Rinder- und Schweinegülle

In den Abb. 113 bis Abb. 117 sind die Gehalte der in der DüMV geregelten anorganischen Schad- und Spurenstoffe sowie des Urans in Rinder- und Schweinegülle für alle sechs Probenahmezeitpunkte (soweit von allen Serien Daten vorlagen) graphisch dargestellt. Einen Steckbrief zum jeweiligen, chemischen Element findet sich im Bodenteil, Kap. 2.3.3 im jeweiligen, elementspezifischen Unterkapitel. Soweit in der DüMV ein Grenzwert (s. Tab. 45) festgelegt ist, wurde er in den Graphiken als Referenzwert eingezeichnet.

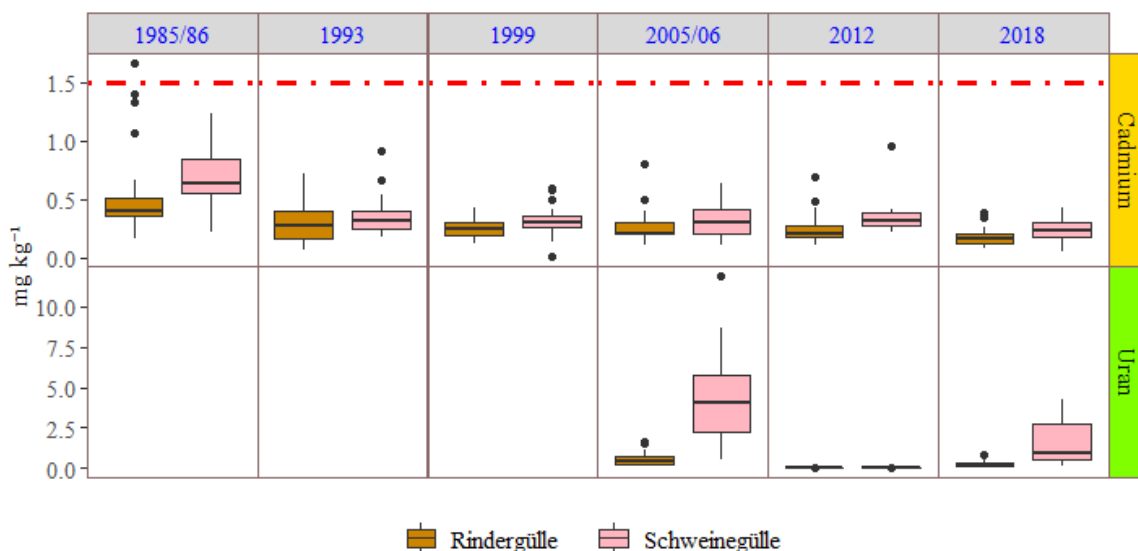
Cadmium (Cd) und Uran (U) in Rinder- und Schweinegülle

Abb. 113: Cd- und U-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) - für Cd, im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.

Die Cadmiumgehalte in Rinder- und Schweinegülle sind sehr niedrig, liegen meist deutlich unter dem Grenzwert der DüMV und streuen nur gering. Nur 3 Rinder- und 2 Schweinegülle wiesen Cadmium-Gehalte $> 2/3$ des Grenzwertes der DüMV ($1,5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ TM) auf. Der Grenzwert wird nur im Fall der Grünland-BDF 85 ausschließlich bei der Erstaufnahme 1986 in Rindergülle leicht überschritten: $1,66 \text{ mg Cd kg}^{-1}$. Bei späteren Beprobungen wurden beim gleichen Betrieb nur noch $0,2 - 0,4 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ in Rindergülle gemessen. In Schweinegülle sind die Cadmiumgehalte im Mittel etwas höher als in Rindergülle und streuen auch etwas stärker. Im Beobachtungszeitraum sind insgesamt aber die Cd-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle rückläufig, wie Abb. 113 zeigt.

Uran wurde erst seit 2005 in Wirtschaftsdüngern untersucht. In der DüMV ist für Uran kein Grenzwert festgelegt. Uran kommt in Konzentrationen von einigen mg kg^{-1} in Rinder- und Schweinegülle vor. Auch wenn sich wegen der kürzeren Beobachtungszeit noch wenig Bestimmtes über den zeitlichen Verlauf sagen lässt, ist wie bei Cadmium, festzustellen, dass Schweinegülle durchschnittlich höhere Gehalte als Rindergülle aufweist. Andere Quellen hingegen weisen höhere Urangehalte in Rinder- als in Schweinegülle aus. So geben Kratz et al. für Rindergülle im Mittel $0,2-1,4 \text{ mg U kg}^{-1}$ TM ($n=66$) und für Schweinegülle $0,1 \text{ mg U kg}^{-1}$ TM (allerdings nur 1 Schweinegülle von einem Ökobetrieb untersucht) an (Kratz, 2006). Beweidung (Rinderhaltung) findet auf Grünland statt, dort wird in der Regel nicht mineralisch gedüngt. Uran kann daher nicht über Mineraldünger in Böden eingetragen werden und Rindergülle sollte damit weniger Cd und U enthalten als Schweinegülle. Gegenüber den mineralischen P-Düngern weisen Rinder- und Schweinegülle insgesamt aber wesentlich geringere Cadmium- und Urangehalte auf (dort Mittelwerte von 12 mg Cd und 61 mg U (Schnug, 2012 und Dittrich, 2008)). Für die, gegenüber 2005/06 und 2018, um ein Vielfaches niedrigeren Urangehalte bei der 2012 beprobten Gülle, haben wir keine plausible Erklärung. Möglicherweise liegt es aber daran, dass 2012 anders als bei den übrigen Beprobungen, die Wirtschaftsdünger von einem externen (anderen) Labor untersucht wurden (Laborwechsel!).

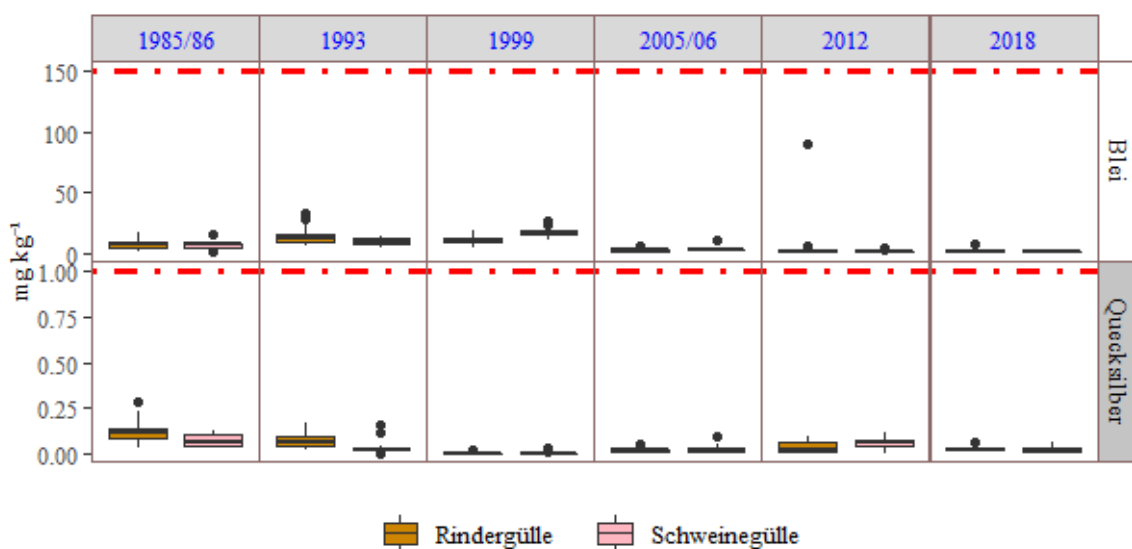
Blei(Pb) und Quecksilber (Hg) in Rinder- und Schweinegülle

Abb. 114: Pb- und Hg-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.

Die Bleigehalte in Rinder- und Schweinegülle sind niedrig und offensichtlich rückläufig wie Abb. 114: zeigt. Die Gülle enthalten wesentlich weniger Blei als die Böden (s. Kap. 2.3.3.1). Die Unterschiede beim Bleigehalt zwischen Rinder- und Schweinegülle sind gering und nicht deutlich. Der Grenzwert der DüMV ($150 \text{ mg Pb kg}^{-1}$ TM) wird durchwegs und deutlich unterschritten.

Die Quecksilbergehalte in der untersuchten Rinder- und Schweinegülle sind ebenfalls sehr niedrig und liegen deutlich unterhalb des Grenzwertes der DüMV ($1,0 \text{ mg Hg kg}^{-1}$ TM). Die Gülle enthält weit weniger Quecksilber als die Böden (s. Kap. 2.3.3.6), im Beobachtungszeitraum ist die Tendenz auch bei Quecksilber rückläufig. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Quecksilbergehalten in Rinder- und Schweinegülle ist nicht auszumachen.

Blei und Quecksilber sind Anzeiger allgemeiner Umweltbelastungen durch Verkehr und Industrie. Der Rückgang der Blei-Immissionen im Beobachtungszeitraum (s. a. Kap. 3.3) v.a. durch das Verwendungsverbot in Kraftstoffen (Benzin-Bleigesetz 1988), spiegelt sich auch im Rückgang der Gehalte in Wirtschaftsdüngern wider.

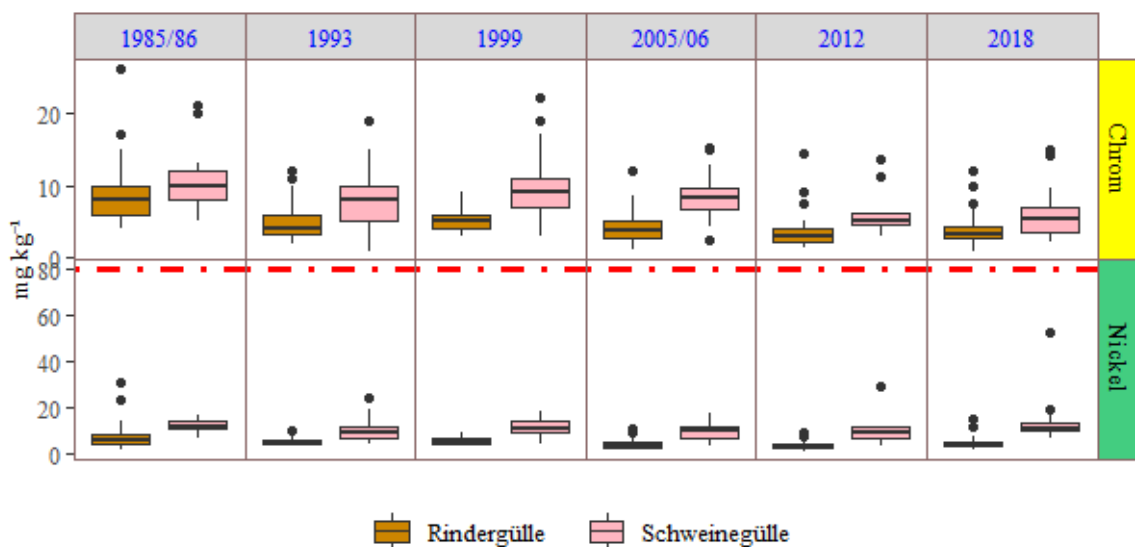
Chrom (Cr) und Nickel (Ni) in Rinder- und Schweinegülle

Abb. 115: Cr- und Ni-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) - für Ni, im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.

Chrom und Nickel sind geogen häufig vorkommende Schwermetalle und somit auch bodenbürtig. Chrom ist ein wichtiges Spurenelement in der Tierernährung. In Rinder- und Schweinegülle kommt es in relativ niedrigen Konzentrationen vor, weit unterhalb des Kennzeichnungswertes der DüMV von 300 mg kg^{-1} (für Cr ist in der DüMV kein Grenzwert festgelegt!). Die Gehalte sind deutlich geringer als im Boden (s. Kap. 2.3.3.3). Die Gehalte in Schweinegülle sind im Durchschnitt höher als in Rindergülle. Im zeitlichen Verlauf haben die Chromgehalte in Rinder- und Schweinegülle abgenommen (s. Abb. 115).

Bei Nickel sind die Gehalte ähnlich gering mit noch geringerer Streuung. Auch bei Nickel wurden höhere Gehalte in Schweinegülle als in Rindergülle gemessen. Die untersuchte Rinder- und Schweinegülle wies auch bei Ni geringere Gehalte als die Böden auf (s. Kap. 2.3.3.5). Der Grenzwert der DüMV (80 mg Ni kg^{-1} TM) wird in keinem Fall überschritten. Im Beobachtungszeitraum haben sich die Ni-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle kaum verändert.

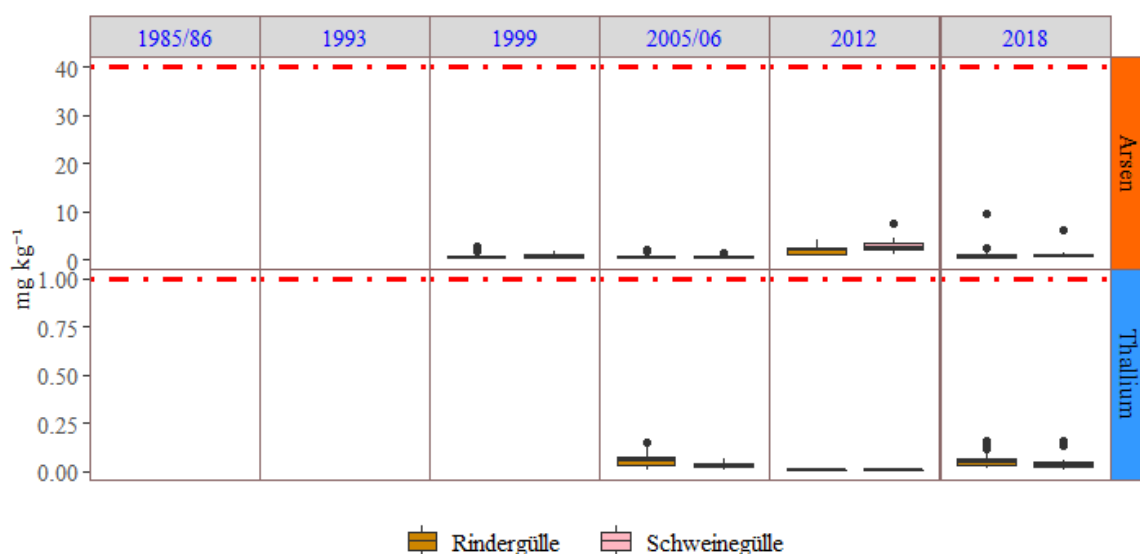
Arsen (As) und Thallium (Tl) in Rinder- und Schweinegülle

Abb. 116: As- und Tl-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) im Vergleich zum Grenzwert der DüMV.

As (ab 1999) und Tl (ab 2005) wurden nicht gleich zu Beginn des BDF-Programmes in Wirtschaftsdüngern untersucht.

Die Arsengehalte in Rinder- und Schweinegülle lagen überwiegend unterhalb von 3 mg As kg^{-1} TM und in keinem Fall $>10 \text{ mg As kg}^{-1}$ TM. Der Grenzwert der DüMV (40 mg kg^{-1}) wird nicht annähernd erreicht. Es scheint, als wären die As-Gehalte in Schweinegülle leicht höher als in Rindergülle. Um das jedoch zu bestätigen oder um Gehaltveränderungen über die Zeit feststellen zu können, fehlen noch die Daten. Das wird sich erst im weiteren Verlauf des Monitorings zeigen müssen.

Thallium konnte in Rinder- und Schweinegülle nur in sehr niedrigen Konzentrationen gemessen werden. Überwiegend lagen die Werte bei $<0,1 \text{ mg Tl kg}^{-1}$ TM und nie über $0,2 \text{ mg Tl kg}^{-1}$ TM. Anders als bei As scheinen aber die Tl-Gehalte in Rindergülle höher als in Schweinegülle zu sein. Um das Bestätigen zu können oder ob sich die Gehalte über die Zeit verändert haben, fehlen Daten weiterer Gülle-Beprobungen (es liegen für Tl erst die Ergebnisse von 3 Untersuchungsreihen vor).

Kupfer (Cu) und Zink (Zn) in Rinder- und Schweinegülle

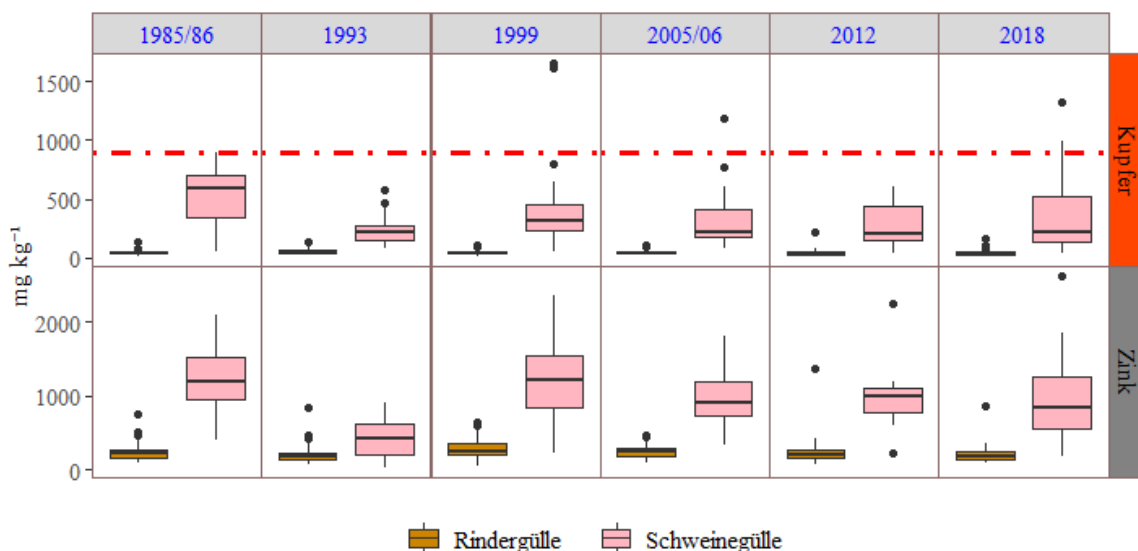


Abb. 117: Cu- und Zn-Gehalte in Rinder- und Schweinegülle in mg kg^{-1} TM (Anzahl der untersuchten Rinder- und Schweinegülle, s. Tab. 44) - für Cu ist auch der Höchstgehalt der DüMV für Düngemittel mit zusätzlich den Typ bestimmenden Spurennährstoffen eingezeichnet, er gilt jedoch nicht für Wirtschaftsdünger, s. a. Kap. 3.1.3).

3.1.7 Verbot antibiotischer Leistungsförderer und Futtermittelzusätze von Kupfer und Zink

Um die Kupfer- und Zinkgehalte in Rinder- und Schweinegülle einordnen und die zeitlichen Schwankungen besser verstehen zu können (s. Abb. 117), ist es in diesem Zusammenhang wichtig, auf antibiotische Leistungsförderer und deren Surrogat durch Zugabe der Spurenelemente Kupfer und Zink ins Tierfutter von Rindern und Schweinen kurz einzugehen.

Futtermittelzusatzstoffe sind gemäß Art. 2 Abs. 2 a) und Art. 5 Abs. 3 VO (EG) Nr. 1831/2003 Stoffe, Mikroorganismen oder Zubereitungen, die keine Futtermittel-Ausgangserzeugnisse oder Vormischungen sind und bewusst Futtermitteln oder Wasser zugesetzt werden, um insbesondere eine oder mehrere der im Folgenden genannten Funktionen zu erfüllen (LGL, 2022).

Futtermittelzusatzstoffe müssen mindestens eine, können aber auch mehrere dieser Funktionen erfüllen:

- die Beschaffenheit des Futtermittels positiv beeinflussen,
- die Beschaffenheit der tierischen Erzeugnisse positiv beeinflussen,
- die Farbe von Zierfischen und -vögeln positiv beeinflussen,
- den Ernährungsbedarf der Tiere decken,
- die ökologischen Folgen der Tierproduktion positiv beeinflussen,
- die Tierproduktion, die Leistung oder das Wohlbefinden der Tiere, insbesondere durch Einwirkung auf die Darmmikrobiota oder die Verdaulichkeit der Futtermittel, positiv beeinflussen,
- eine kokzidiostatische oder histomonostatische Wirkung haben.

Zu den Futtermittelzusatzstoffen zählen auch antibiotische Leistungsförderer und die Spurenelemente Kupfer und Zink.

Bis Ende 2005 waren bestimmte antibiotisch wirksame Substanzen in festgesetzten niedrigen Dosierungen als sogenannte antibiotische Leistungsförderer bei bestimmten Tierarten zugelassen. Unter diesem Begriff werden im Wesentlichen Substanzen verstanden, welche sowohl eine gesundheitsprophylaktische Wirkung zeigen als auch die Leistung bei klinisch gesunden Tieren und bei ausreichender Versorgung mit allen lebensnotwendigen Nährstoffen steigern. Das Ausmaß der leistungsfördernden Effekte ist vor allem von der Tierart sowie vom Alter der Tiere, aber auch von den äußeren Faktoren wie Haltung, Hygiene und Fütterungsbedingungen abhängig.

Probleme, die durch den Einsatz von antibiotischen Leistungsförderern auftreten, sind sehr vielfältig. Die wohl bedeutendsten liegen in der vermuteten Selektion von Resistenzen sowie in der möglichen Beteiligung bei der Entstehung von multiresistenten Keimen. Diese Problematiken waren auch die entscheidenden Gründe, die dazu führten, dass es schließlich zu einem EU-weiten Verbot der antibiotischen Leistungsförderer ab 1. Januar 2006 kam. Durch eine Vielzahl an amtlichen Futtermitteluntersuchungen wird die Einhaltung dieses Verbotes überprüft.

Kupfer und Zink sind wichtige Spurennährstoffe in der Tierernährung und spielen als Futtermittelzusätze, insbesondere in der Schweinehaltung (Ferkelerzeugung) eine sehr wichtige Rolle. Die natürlicherweise vorkommenden Spurenelementgehalte in Futtermitteln sind in der Regel nicht bedarfsdeckend. Aus diesem Grund werden für ernährungsphysiologische Zwecke dem Futter Kupfer (Cu) und Zink (Zn) zugegeben. Kupfer und Zink sind beim Schwein außerdem für ihre antimikrobielle Wirkung im Magen-Darmtrakt und den daraus resultierenden leistungsfördernden Effekten wie Wachstumsverbesserung bekannt und daher in gewisser Weise ein Ersatz für die antibiotischen Leistungsförderer.

Um ihre pharmakologische Wirkung entfalten zu können, wären allerdings sehr hohe Gehalte erforderlich, welche zum Teil eine deutliche Überschreitung ernährungsphysiologischer Empfehlungen bzw. zulässiger Höchstgehalte bedeuten (Tab. 49). Bei diesen Dosierungen können unerwünschte Nebenwirkungen oder durch Akkumulation sogar toxische Effekte auftreten. Zudem führt ein übermäßiger Gebrauch von Kupfer und Zink durch die Ausscheidung der Tiere und Ausbringung konzentratreicher Gülle auf landwirtschaftliche Nutzflächen zu einem gesteigerten Eintrag und einer Anreicherung in den Böden. Darüber hinaus besitzen Kupfer und Zink das Potenzial, die Ausbreitung von Antibiotikaresistenzen durch Phänomene der Kreuz- und Co-Selektion zu fördern. Dies belegen neuere Forschungsergebnisse, welche bei Bakterienisolaten aus Gülle oder landwirtschaftlich genutzten Böden mit erhöhten Kupfer- bzw. Zinkgehalten Häufungen von Antibiotikaresistenzen zeigen. Der Gesetzgeber hat daher Höchstgehalte für Kupfer und Zink im Alleinfuttermittel festgelegt (siehe Tab. 49). Die ziel- und risikoorientierte Überwachung auf dem Futtermittelsektor wird durch entsprechende Probenahmen sichergestellt (LGL, 2022).

Tab. 49: Kupfer und Zink - Bedarf und Höchstgehalte im Alleinfuttermittel (LGL, 2022).

Tierart / Tierkategorie	Kupfer		Zink	
	Gehalte im Alleinfuttermittel bezogen auf 88 % TS ¹ [mg kg ⁻¹]			
	Bedarfsangaben	Höchstgehalt	Bedarfsangaben	Höchstgehalt
Ferkel	20-170	150 ² /100 ³	70-100	150
Mastschweine	10-15	25	50-60	120
Zuchtsauen	15-20	25	60-80	150

¹Trockensubstanz²Saugferkel und Absetzferkel bis 4 Wochen nach dem Absetzen³ab der 5. Woche nach dem Absetzen bis 8 Wochen nach dem Absetzen: 100Tab. 50: 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 Ab- setzen)
				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>

Tab. 51: Futtermittelverordnung (FuttMV) - Regelungen für Zink 1985 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	250	250	150	150
Mastschweine	250	250	150	120
Zuchtsauen	250	250	150	150
Rinder vor dem Wiederkäueralter			150	120
Milchaustauschfutter	250		200	180
sonstige Alleinfutter	250		150	120
andere Rinder	250		150	120

FuttMV: Futtermittelverordnung, LFGB: Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch Verordnung (EG) Nr. 1334/2003 vom 25. Juli 2003, gültig ab 26. Januar 2004: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:187:0011:0015:DE:PDF>
 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>

Die Änderungen der gesetzlichen Regelungen (Futtermittelverordnung, Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch, EG-VO 1334/2003 und das seit 1. Januar 2006 EU-weit gültige Verbot antibiotischer Leistungsförderer [EU-weites Verbot des Inverkehrbringens und der Verwendung antibiotischer Leistungsförderer (Antibiotika, die keine Kokzidiostatika oder Histomonostatika sind) in Futtermitteln (EG/1831/2003).] spiegeln sich in den gemessenen Kupfer- und Zinkgehalten der im Rahmen von BDF untersuchten Rinder- und Schweinegülle zum Teil wider (s. Abb. 117). Das hat entsprechend auch zu den erst in Kapitel 3.1.8 beschriebenen und in Abb. 121 dargestellten, berechneten, maximalen Eintragsfrachten für Kupfer und Zink geführt.

Die Gehalte an Kupfer und Zink in Schweinegülle sind um Faktor 6-8 (Cu) bzw. Faktor 4 (Zn) höher als in Rindergülle. s. Abb. 117 und Tab. 47. Ursache sind die jeweils zulässigen Futtermittelzusätze für beiden Tierarten, gestaffelt nach Haltungsform und Alter der Tiere.

Die Gehalte in der untersuchten Schweinegülle lagen bei Ø 354 mg Kupfer und max. 1650 mg Cu kg⁻¹ TM – für Zink betragen sie Ø 930 mg Zn und max. 2622 mg Zn kg⁻¹ TM.

Auch wies Schweinegülle zu verschiedenen Beprobungszeitpunkten z.T. recht große Unterschiede in den Kupfer- und Zinkgehalten auf. Besonders zwischen der Erstaufnahme (1985/86) und 1993 war ein starker Rückgang zu beobachten, der mit einer Verschärfung der Höchstgehalte der Futtermittelverordnung einherging (LfL, 2006) (s.a. Tab. 49 bis Tab. 51).

Gegen Ende der 1990er Jahre ist jedoch ein erneuter Anstieg der Cu- und Zn-Werte in Schweinegülle, bei Zink und Probenahme 1999 sogar ganz leicht über das Niveau von 1985/86 hinaus, zu beobachten (s. Tab. 65 und Tab. 66 im ANHANG). Ein Zusammenhang mit dem verringerten Einsatz antibiotisch wirksamer Leistungsförderer in Futtermitteln seit

Anfang der 1990er Jahre und dem endgültigen Verbot zum 01.01.2006 ist zu beobachten. Wegen der antibiotischen Wirkung beider Elemente kompensiert deren Einsatz in gewissem Umfang einen reduzierten Einsatz solcher Antibiotika.

Der nach Anlage 1; Abschnitt 4.1.1, Spalte 6 der Düngemittelverordnung (DüMV, 2012) für Kupfer (= 900 mg Cu kg⁻¹ TM) und für mineralische, organische und organisch-mineralische Düngemittel mit zusätzlich den Typ bestimmenden Spurennährstoffen gültige Höchstgehalt, wäre in 5 Fällen (3 Zusatzbetriebe, 1 Acker-BDF) sogar überschritten worden (Der Höchstgehalt ist nur als Referenzwert gedacht, denn er gilt für Wirtschaftsdünger nicht!). Der entsprechende Höchstgehalt für Zink (5000 mg Zn kg⁻¹ TM – ebenfalls nur als Referenzwert gedacht – auch er gilt nicht für Wirtschaftsdünger!) wurde bei keiner Schweinegülle erreicht.

In Rindergülle waren die Kupfer- und Zinkgehalte deutlich geringer als in Schweinegülle. Die untersuchte Rindergülle wies durchschnittlich 45 mg Cu und max. 213 mg Cu kg⁻¹ TM sowie durchschnittlich 246 mg Zn und max. 1376 mg Zn kg⁻¹ TM auf. Der Maximalwert für Kupfer in Rindergülle von 213 mg Cu kg⁻¹ TM wurde bei Acker-BDF 93, Beprobung 2012 gemessen; bei der gleichen Acker-BDF und gleichem Probenahmezeitpunkt wurde dort auch für Zink mit 1376 mg Zn kg⁻¹ TM der Maximalwert in Rindergülle erreicht.

Aus früheren Untersuchungen von Schweinegülle an der LfL – „Güllemonitoring 2005-2006“ (LfL, 2006) ist bekannt, dass besonders die Art der Schweinehaltung (Schweinemast, Ferkelerzeugung und -aufzucht) sowie die Betriebsgröße ausschlaggebend ist für die Kupfer- und Zinkgehalte der Schweinegülle. Von BDF- und Nicht-BDF-Betrieben liegen aber keine genauen Daten zur Betriebsgröße vor. Auch wurde die Haltungsform (Schweinemast oder Ferkelaufzucht) erst bei späteren Beprobungen abgefragt, so dass die Datenlage nicht ausreichend ist, um diesbezügliche Aussagen für den Beobachtungszeitraum ableiten zu können.

Festzustellen ist aber, dass die Kupfer- und Zinkgehalte in der Schweinegülle von den Zusatzbetrieben höher waren als bei den BDF-Betrieben. Bei den untersuchten Zusatzbetrieben handelt es sich überwiegend um größere Betriebe mit intensiverer Schweinehaltung.

3.1.8 Maximale Frachten nach Düngerverordnung (DüV)

Nach § 6 Abs. 4 der Düngerverordnung (DüV 2017, geändert durch die Bekanntmachung vom 30.04.2020 (BGBl. Jg. 2020, Teil I Nr. 20, S 846)) darf mittels organischer und organisch-mineralischer Dünger nur so viel Stickstoff (N_{gesamt} bzw. N_t) ausgebracht werden, dass im Durchschnitt der landwirtschaftlich genutzten Flächen des Betriebs 170 kg N_t je Hektar und Kalenderjahr (01.01. bis 31.12.) nicht überschritten werden. In die „170 kg N-Grenze“ fließen neben der Stickstoffmenge aus Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft auch die Stickstoffmengen aus allen anderen organischen Düngern, die im Betrieb ausgebracht werden (z.B. Klärschlamm, Kompost), ein. Bei der Berechnung der 170 kg N-Grenze dürfen Stall- und Lagerungsverluste, aber keine Aufbringungsverluste abgezogen werden (siehe <https://www.lfl.bayern.de/170kggrenze>).

In Abhängigkeit vom Gesamtstickstoffgehalt (kg N_t je m³) in der Gülle ergibt sich eine maximal zulässige Aufbringungsmenge, um die 170 kg N-Grenze nicht zu überschreiten. Mittels der auf TM bezogenen Schadstoffkonzentrationen (mg kg⁻¹ bzw. g t⁻¹) lassen sich daraus die jeweils maximalen Schadstofffrachten eines Schadstoffs pro Jahr ausrechnen.

Bei praxisüblicher Düngung bzw. Aufbringung eines Wirtschaftsdüngers sind die tatsächlichen Schadstoff-Frachten in vielen Fällen aber weit geringer. Entscheidend ist, wieviel des

Düngebedarfs über organische Dünger/Wirtschaftsdünger abgedeckt wird und welche Zu- und Abschläge (Stall- und Lagerungsverluste) zu berücksichtigen sind (Wendland, 2018).

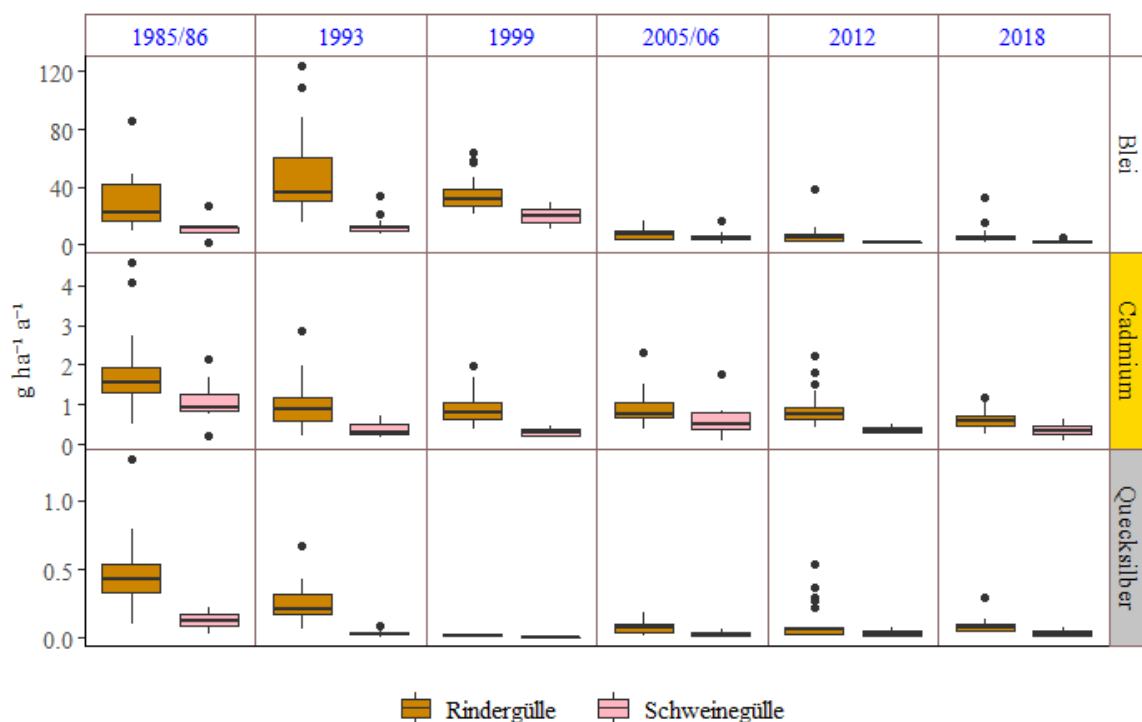


Abb. 118: Pb-, Cd- und Hg-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweingülle.

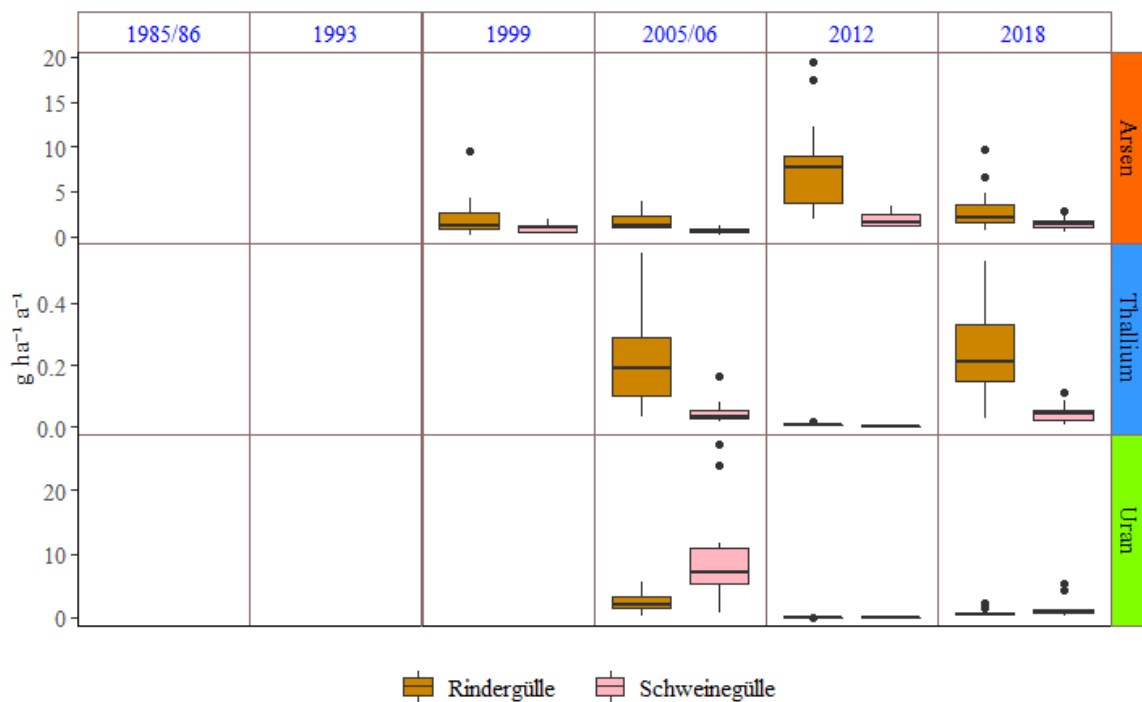


Abb. 119: As-, Tl- und U-Frachten bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweingülle.

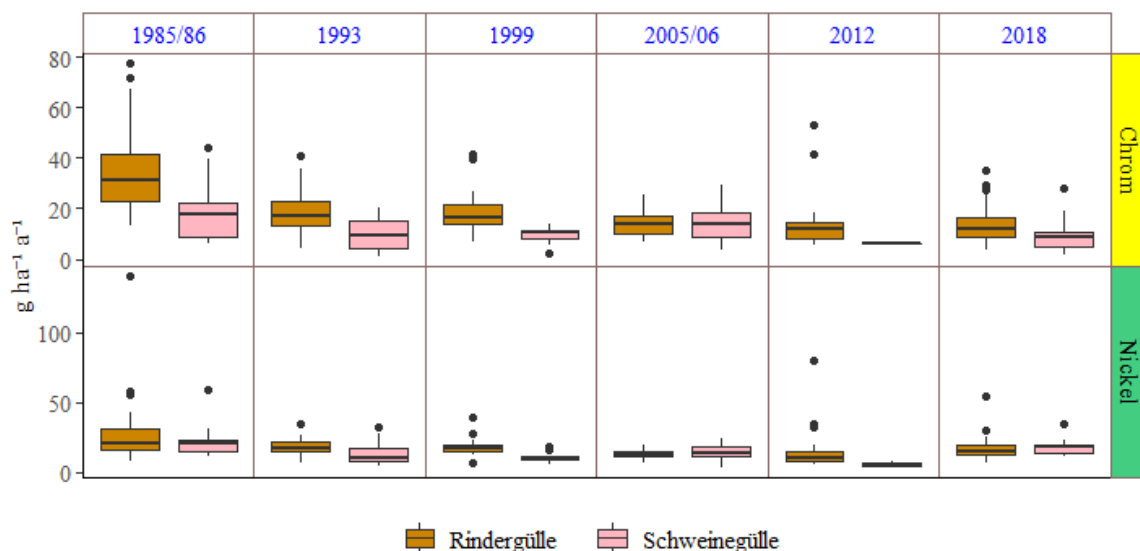


Abb. 120: Cr- und Ni-Frachten bei nach Düngverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweinegülle.

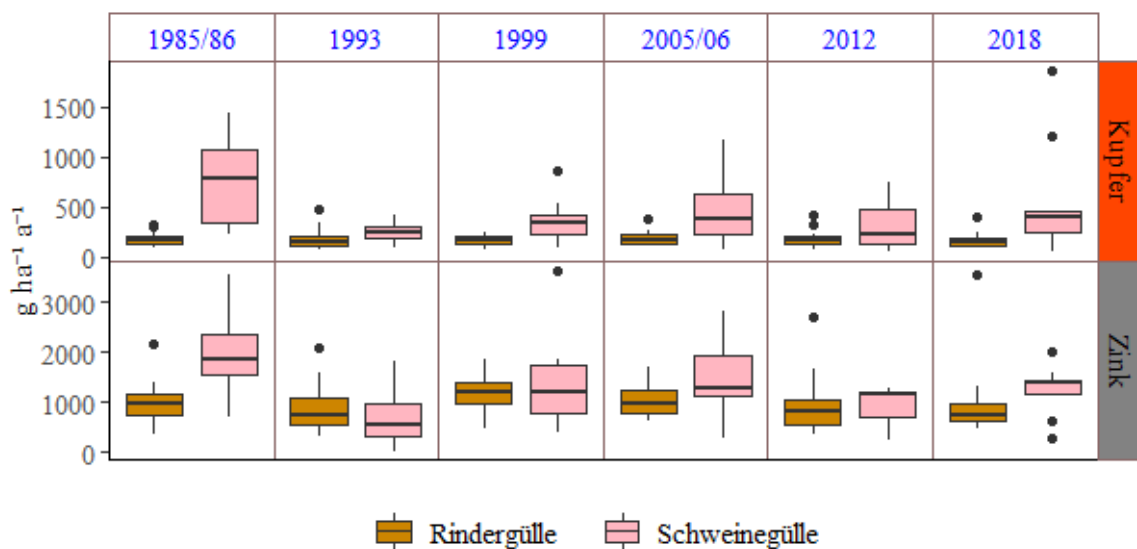


Abb. 121: Cu- und Zn-Frachten bei nach Düngverordnung maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweinegülle.

Bei der Berechnung der nach DüV maximal möglichen Düngemengen von $170 \text{ kg N}_t \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ fließen der N_t -Gehalt als auch der Trockenmasse(TM)-Gehalt der Gülle ein. Je nach Art des Wirtschaftsdüngers bzw. der Gülle sind Gesamtstickstoff- und TM-Gehalt aber recht unterschiedlich, wie Tab. 52 zeigt.

Tab. 52: Trockenmasse(TM)- und Gesamtstickstoff(N_{ges})-Gehalte in Rinder und Schweinegülle von BDF- und Zusatzbetrieben in Prozent (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, N=Anzahl untersuchter Gülleproben).

WDA	N	STAT	TM (%)	N_{ges} (% TM)
Rindergülle	272	Mittelwert	7,8	4,9
		Median	8,0	4,7
		5%-Perz.	3,3	3,6
		95%-Perz.	11,2	7,2
		Min.	1,4	1,9
		Max.	17,9	20,1
Schweinegülle	127	Mittelwert	4,8	13,8
		Median	3,7	12,7
		5%-Perz.	1,3	6,0
		95%-Perz.	11,0	23,7
		Min.	0,6	1,3
		Max.	24,1	34,9

Der zeitliche Verlauf der jeweils errechneten maximalen Schwermetall-Frachten für die ausgewählten 10 Elemente im Beobachtungszeitraum (s. Abb. 118 bis Abb. 121), deckt sich deshalb nicht immer mit den zeitlichen Verläufen der tatsächlich in der Gülle gemessenen Schwermetallkonzentrationen (Abb. 113 bis Abb. 117). Auch ergeben sich dadurch Unterschiede zwischen Rinder- und Schweinegülle bzgl. Höhe der Schadstofffrachten und Höhe der jeweiligen Stoffkonzentration.

So sind v.a. bei Pb und Cd, aber auch bei Hg (Beprobung 2012 und 2018) im Unterschied zu den Gehalten, die Einträge für Rindergülle höher als für Schweinegülle. Gleiches gilt für die Cr- und Ni-Frachten sowie die Frachten an As. Nur bei Cu und Zn sowie eingeschränkt (weil nur wenige Beprobungsserien und Untersuchungen vorliegen) bei Tl und U decken sich die Frachten durch Düngung mit Rinder- und Schweinegülle recht gut mit den Gehaltsunterschieden in der Rinder- und Schweinegülle.

Von den für die verschiedenen chemischen Elemente errechneten Frachten fallen besonders die für Kupfer und Zink auf:

Bei Kupfer und Rindergülle ist der Median im Beobachtungszeitraum über alle Beprobungen mehr oder weniger gleich hoch (rd. $150 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) geblieben, wie Tab. 53 zeigt. Demgegenüber schwanken die Cu-Frachten bei Schweinegülle im Beobachtungszeitraum (1985/86, 1993, 1999, 2005/06, 2012 und 2018 – 6 Beprobungen und Untersuchungen) erheblich: Abnahme von $789 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1985/86) auf 240 (1993), dann Zunahme auf 332 (1999) und 373 (2005/06) und erneute Abnahme auf $222 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2012) und schließlich erneute Zunahme auf $397 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2018).

Für Zink und Rindergülle nahmen die Frachten im Beobachtungszeitraum von $856 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1985/86) auf $674 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1993) ab, stiegen anschließend auf $1038 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1999) an und fielen erneut auf 871 (2005/06), 801 (2012) und $687 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2018). Bei Schweinegülle nahmen die Zink-Frachten von 1985/86 ($1872 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) bis 1993 ($540 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) erheblich ab, um dann wieder auf 1205 (1999) und $1286 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2005/06) anzusteigen. 2012 gingen die Zn Frachten dann wieder auf $1162 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zurück und stiegen erneut auf $1408 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2018) an. Besonders die

Verschärfung der Futtermittel-Verordnung zwischen 1986 und 2003 für Höchstgehalte an Kupfer in Futtermitteln, lässt sich recht gut am starken Rückgang der Kupferfrachten durch Schweinegülle ablesen (s. Abb. 121 und Tab. 53).

Tab. 53: Medianwerte Cu- und Zn-Frachten bei nach DüV maximal zulässiger N-Düngung mit Rinder- und Schweinegülle in $g\ ha^{-1}\ a^{-1}$ (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers).

WDA	Beprobung	Cu	Zn
Rindergülle	1985/86	152	856
	1993	150	674
	1999	157	1038
	2005/06	152	871
	2012	150	801
	2018	153	687
Schweinegülle	1985/86	789	1872
	1993	240	540
	1999	332	1205
	2005/06	373	1286
	2012	222	1162
	2018	397	1408

Die z.T. sehr großen Schwankungen der Cu- und Zn- Frachten im Beobachtungszeitraum bei Düngung mit Rinder- und Schweinegülle können nicht durch Schwankungen der Messungen erklärt werden. Vielmehr werden beide Elemente wegen ihrer antibiotischen und wachstumsfördernden Wirkungen gezielt als Futtersupplemente bei Schweinen und Rindern eingesetzt. Sie sind deshalb auch in Ausscheidungen der Tiere messbar. Änderungen der Futtermittelverordnung, die Cu- und Zn-Gaben ins Futter der Tiere regeln, aber auch das endgültige Verbot (01.01.2006) und der Ersatz von antibiotischen Leistungsförderern durch Cu und Zn sind direkt in der Gülle messbar und bedingen die z.T. hohen Schwankungen der möglichen Cu- und Zn-Frachten im Beobachtungszeitraum. Auch die Schwankungen des TM-Gehalts der Güllen hat direkten Einfluss auf die Schadstofffrachten.

Für Pb, Cd, Hg aber auch Cr und Ni sowie eingeschränkt (weil nur erst 3 Beprobungen bisher) auch für U, schwankten im Beobachtungszeitraum und bei 6 (bei U nur 3) Beprobungen und Untersuchungen, die jeweils errechneten Eintragsfrachten viel weniger stark als bei Cu und Zn. Bei all diesen Elementen gingen die Eintragsfrachten im Beobachtungszeitraum zurück. Bei As ist die errechnete Fracht für Rindergülle, besonders bei der Beprobung 2012 deutlich höher als für die übrigen Serien. Es liegen jedoch nur Daten von 4 Untersuchungszeitpunkten vor. Tl wurde erst seit 2005 in Gülle untersucht, bei Rindergülle schwankten aber die errechneten Eintragsfrachten zwischen den Untersuchungsserien erheblich. Allerdings liegen sie insgesamt auf einem äußerst niedrigen Niveau was die in Abb. 119 augenfällig hoch erscheinenden Schwankungen vielleicht erklären könnte. Für beide Elemente, also As und Tl aber auch U liegen bisher noch zu wenig Untersuchungen unterschiedlicher Beprobungszeitpunkte vor und wird sich erst bei zukünftigen Untersuchungen der Gülle zeigen müssen, wie stark die Schwankungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten sind und die zeitliche Entwicklung der Eintragsfrachten verläuft.

Besonders aber bei denjenigen Elementen, bei denen die Eintragsfrachten im zeitlichen Verlauf sehr große Schwankungen aufwiesen, insbesondere Cu und Zn, erfasst eine 6-jährige Beprobung und Untersuchung den zeitlichen Verlauf nur sehr unvollständig. Wie hoch die Eintragsfrachten durch Düngung mit Rinder- und Schweinegülle in der beprobungsfreien Zeit tatsächlich sind, lässt sich nicht sagen. Die Gehaltsschwankungen während der Beprobungsintervalle in Rinder- und Schweinegülle sind dazu einfach zu stark. Unbekannt ist auch, was auf BDF tatsächlich gedüngt wurde mit Gülle oder ob und in welchen Mengen zwischen den Beprobungsserien organisch mit Wirtschaftsdüngern bzw. Gülle gedüngt wurde.

3.2 Schadstoffeinträge durch Mineraldünger

Bei Mineraldüngern (auch anorganische Dünger genannt) liegen die düngenden Stoffe meist in Form von Salzen oder deren Lösungen vor. Die Düngemittelverordnung (DüMV, 2012) unterscheidet bei den Mineraldüngern zwischen mineralischen Einnährstoffdüngern (Stickstoffdünger, Phosphordünger, Kaliumdünger oder Kalkdünger) und mineralischen Mehrnährstoffdüngern (NP-, NK-, PK- und NPK-Dünger).

Aus Schadstoffsicht sind hauptsächlich die Phosphat-enthaltenden mineralischen Ein- und Mehrnährstoffdünger von Bedeutung, da sie je nach Herkunft und Art der Lagerstätte des Rohphosphats v.a. die Schwermetalle Cadmium und Uran in größeren Mengen enthalten können (Dittrich, 2008, Schnug, 2012).

N-, K- und Ca-Dünger enthalten in der Regel nur geringe Schadstoffmengen. Von gewisser Relevanz im Hinblick auf Stoffeinträge sind Spurennährstoff-Dünger, die z.B. Bor, Eisen, Kobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän, Selen und Zink enthalten. Sie werden eingesetzt, um einen Mikronährstoffmangel auszugleichen.

Haupteinsatzbereich der Mineraldüngung, besonders der Phosphatdüngung, ist der Ackerbau. Bei Grünland-Betrieben mit Viehhaltung wird der P-Bedarf der Kulturen in der Regel durch die Gülle gedeckt; zusätzlich wird nur N mineralisch gedüngt. Daher ist bei Grünland-BDF ein größerer Eintrag von Uran oder Cadmium durch mineralische P-Dünger in der Regel nicht zu erwarten.

Wegen der großen Vielfalt der auf BDF-Betrieben verwendeten Mineraldünger mit sehr unterschiedlichen Nährstoffzusammensetzungen bei Mehrnährstoffdüngern, aber auch unterschiedlichen Zusätzen (auch bei Einnährstoffdüngern), erschien eine Untersuchung von Mineraldüngern im Rahmen des BDF-Programmes zu aufwändig und auch nicht sinnvoll, da im Rahmen der Düngemittelverkehrskontrolle regelmäßig die verschiedensten Mineraldünger auf Schadstoffe untersucht werden. Es werden daher Daten aus der Literatur zitiert.

Tab. 54: Schwermetalleinträge durch Mineraldüngung in $g\ ha^{-1}\ a^{-1}$ (KTBL, 2005).

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	$g\ ha^{-1}\ a^{-1}$					
Milchviehbetrieb	0,7	11	14	3,3	7,0	41
Schweinezucht- und Schweinemastbetrieb	0,8	5,4	13,5	3,6	30,6	75,7

Schnug und Haneklaus (Schnug, 2014) geben für in Deutschland gehandelte phosphathaltige Dünger 1-12 mg Cd kg⁻¹ und 8-63 mg U kg⁻¹ und entsprechend 18-47 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅ bzw. 126-283 mg U kg⁻¹ P₂O₅ an (der Grenzwert der DüMV für Cadmium liegt bei 1,5 mg kg⁻¹ TM bzw. 50 mg kg⁻¹ P₂O₅ für Düngemittel ab 5 % P₂O₅). Dabei weisen gegenüber den in geringeren Mengen verfügbaren und abgebauten magmatischen Lagerstätten, besonders Rohphosphate aus sedimentären Lagerstätten z.T. sehr hohe Cadmium- und Urangelhalte auf.

Die Einträge von Cadmium und Uran durch P-haltige Dünger betragen nach Kratz (Kratz et al., 2011) für die Jahre 1951-2010 im Durchschnitt 8,21 g U ha⁻¹ a⁻¹ und 1,41 g Cd ha⁻¹ a⁻¹. Wie dort auch zu lesen ist, stiegen die Cadmumeinträge von etwa 0,5-1 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ zu Anfang der 1950er Jahre bis ca. 1980 auf knapp 3 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ an, seitdem aber fallen sie wieder kontinuierlich auf nunmehr knapp >0,5 g Cd ha⁻¹ a⁻¹ im Jahr 2010. Bei Uran stiegen die Einträge von etwa 2-4 g U ha⁻¹ a⁻¹ zu Anfang der 1950er Jahre bis ca. 1980 auf etwas mehr als 18 g U ha⁻¹ a⁻¹ an, seitdem aber fallen sie kontinuierlich auf im Jahr 2010 wieder 2-4 g U ha⁻¹ a⁻¹.

Der Verlauf der Cadmium- und Uraneinträge in landwirtschaftliche Böden, zeigt die Entwicklungen in der Landwirtschaft recht gut auf. Setze ab 1950 noch eine zunehmende Intensivierung der Landwirtschaft mit verstärktem Phosphatdüngereinsatz ein, so ging ab ca. 1980 und besonders in den letzten Jahrzehnten der Phosphat-Düngereinsatzes stark zurück. In Bayern ist dabei ein Rückgang des P-Dünger-Einsatzes um > 70 % in den vergangenen zwei bis drei Jahrzehnten feststellbar (s. Abb. 122). Der Verbrauch an mineralischem P ging hier von 31,3 kg P₂O₅ ha⁻¹ LF im Jahr 1994 (1980 waren es noch ca. 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ LF) auf 13,6 kg P₂O₅ ha⁻¹ LF im Jahr 2020 zurück.

Gründe für den verringerten P-Dünger-Einsatz sind gestiegene Kosten und ein größeres Umweltbewusstsein. Die P-Düngung wurde dem Pflanzenbedarf also viel besser angepasst und entsprechend muss so weniger P nachgedüngt werden.

Der geringere Mineraleinsatz (besonders an Phosphatdüngern) in den letzten Jahrzehnten, führte auch zu einer starken Abnahme der Schwermetall-Einträge v.a. beim Cadmium und Uran um über 50 %. Aber auch freiwillige Vereinbarungen mit der Industrie zur Verwendung cadmiumarmer Rohphosphate (1984 < 90 mg, 1999 < 40 mg Cd kg⁻¹ P₂O₅) trugen zur Verringerung des Cadmium-Eintrags durch Düngemittel bei.

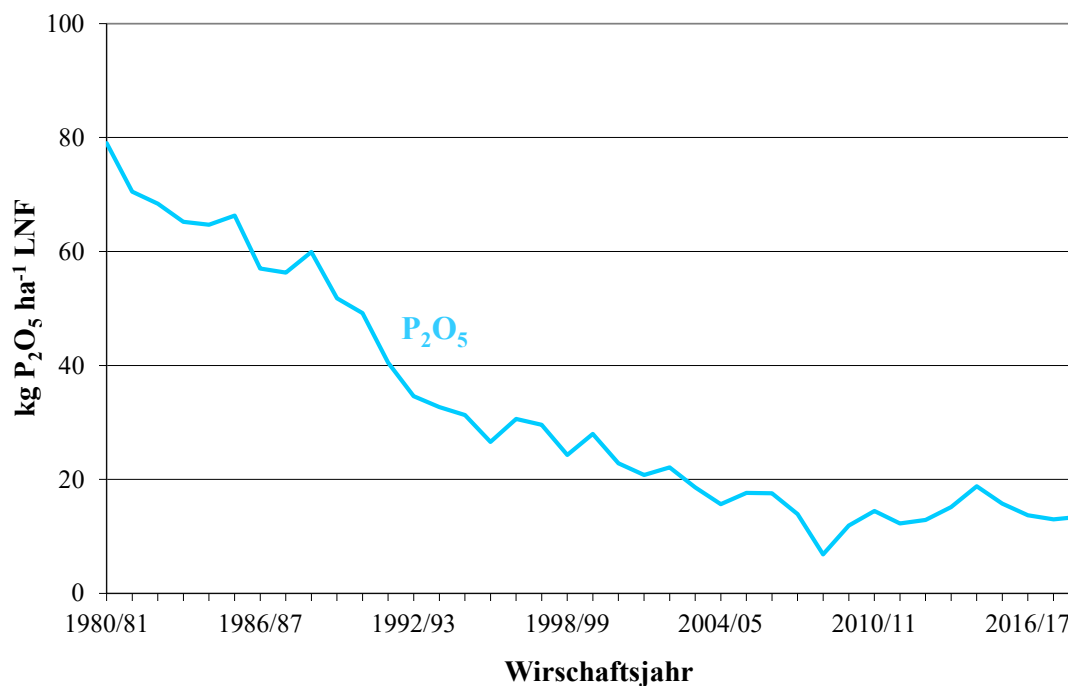


Abb. 122: Entwicklung des Verbrauchs an Phosphaten (als P_2O_5) in Bayern von 1980-2018 (Daten LfL-IBA).

3.3 Schadstoffeinträge durch Immissionen

Industrie, Verkehr und Haushalte belasten unsere Luft mit Schadstoffen. An ihrem Entstehungsort als Emissionen bezeichnet, werden sie an ihrem Wirkungsort, z. B. in der Umgebungsluft von Menschen, Tieren und Pflanzen als Immissionen bezeichnet. Über Niederschläge oder Staub werden diese in der Umwelt abgelagert; dies bezeichnet man als Deposition. Auf dem Weg der Deposition gelangen die Schadstoffe auch in landwirtschaftlich genutzte Böden.

3.3.1 Stoffauswahl

Für die Depositionsmessungen wurden die 6 Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zink (Zn) ausgewertet, weil von diesen Elementen Messwerte über den gesamten Beobachtungszeitraum vorliegen.

3.3.2 Methodik

Zu Beginn des Bodenmonitorings gab es in Bayern fast nur Depositionsmessstellen in emittentennahen städtischen Gebieten und Ballungsräumen, die vom LfU betrieben wurden. Zur Erfassung der Depositionen in ländlichen Gebieten wurden daher zu Beginn des Bodenmonitorings auf allen BDF jeweils 2 Bergerhoff-Sammler aufgestellt. Beim Bergerhoff-Verfahren wird ein Kunststoffbecher (ein sogenannter Bulksammler, von engl. bulk = Masse, Menge) für einen definierten Zeitraum (meistens 4 Wochen) im Freiland aufgestellt, um damit die Staubniederschläge (= nasse und trockene Staubdeposition) zu erfassen (s. Abb. 123). Es handelt sich um ein genormtes Verfahren (VDI 4320 Blatt 2).



Abb. 123: Depositionssammler nach Bergerhoff (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt).

1985 bis einschließlich 1995 wurden auf allen 133 BDF Messungen nach dem Bergerhoff-Verfahren von der LfL durchgeführt. Der Messzeitraum erstreckte sich jeweils vom 01.09 bis zum 31.08 des Folgejahres über ein volles Bewirtschaftungsjahr.

Der in den Bulkgefäßen monatlich gesammelte Staubrückstand wurde aufgrund der geringen Feststoffmengen und Konzentrationen in den ersten Jahren zunächst halbjährlich, dann jährlich zusammengefasst, eingedampft und der Eindampfrückstand mittels Salpetersäure aufgeschlossen. Der verbleibende Rückstand wurde trocken verascht und zur Entfernung des Silikats mehrmalig mit Flusssäure aufgeschlossen. Die Messung erfolgte mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS).

Die Depositionsmessungen auf allen 133 BDF-Standorten der LfL erwiesen sich im weiteren Verlauf als enorm aufwändig. Da das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) 1996 auch mit eigenen Immissionsmessungen in ländlichen Gebieten begann, wurden Ende 1995 die Immissionsmessungen an der LfL eingestellt. Seitdem werden ausschließlich Daten des LfU ausgewertet.

Zur Erfassung der Hintergrundbelastung in Bayern betreibt das LfU derzeit sechs immissionsökologische Dauerbeobachtungsstationen (DBS) in ländlichen Gebieten Bayerns, wo jeweils Bergerhoff-Sammler installiert sind. Sie werden ganzjährig im 28-Tage-Rhythmus beprobt. Für das erste und letzte Intervall eines Jahres, in dem jeweils über den Jahreswechsel gemessen wird, wird die jeweilige Deposition im Messzeitraum tagesgenau gewichtet und zwischen Dezember und Januar aufgeteilt. Somit sind exakte Ganzjahreswerte verfügbar.

Die Stationen befinden sich in Bidingen, Eining, Grassau, Kulmbach, Möhrendorf und Weibersbrunn (s. Abb. 124:). Die Messdaten werden jährlich im Lufthygienischen Jahresbericht

des LfU veröffentlicht (s. https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/lufthygienische_berichte/index.htm).

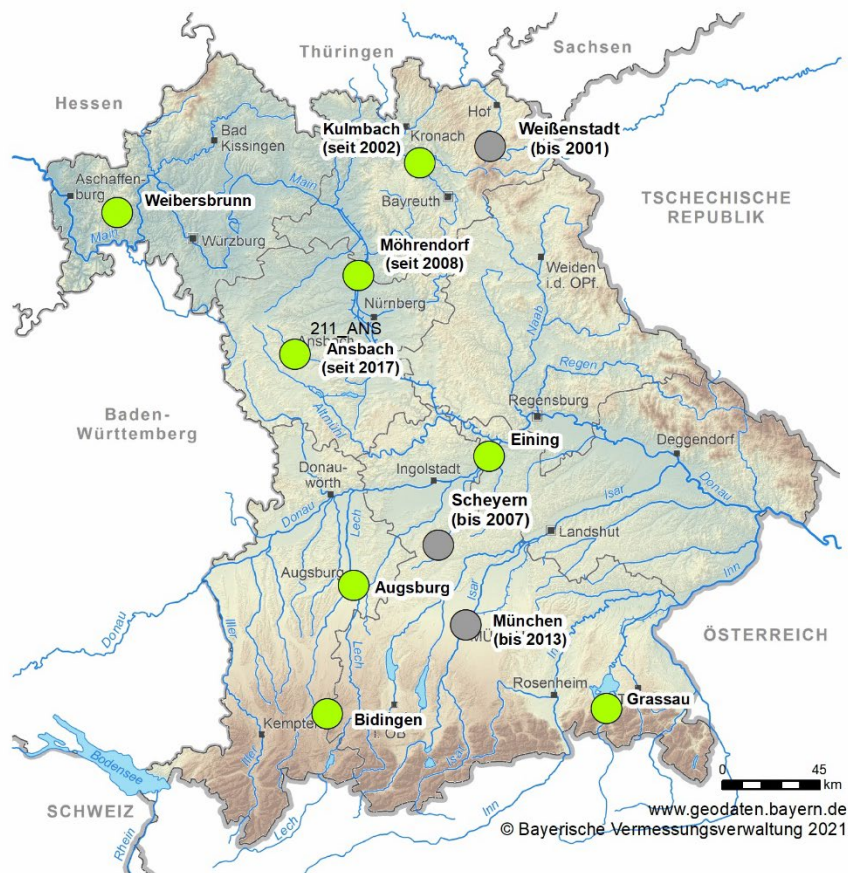


Abb. 124: Lage der 6 immissionsökologischen Dauerbeobachtungsstationen (DBS) des LfU in ländlichem Umfeld (grüne Kreise, außer Ansbach und Augsburg) (Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt).

Beim Bergerhoff-Verfahren (LfL, LfU) werden am Ende des Expositionszeitraums und vor der Laboranalyse, erkennbare Verunreinigungen (z.B. Vogelkot, Insekten, Algen, Moos) entfernt und die Probe gesiebt. Stark verunreinigte Proben werden nicht untersucht.

Zur Bestimmung der Staubmenge und von Staubinhaltsstoffen im Staubbiederschlag wurde vom LfU bis Jan. 2011 das in VDI 2267 Blatt 15 Variante C beschriebene Verfahren angewendet. Nach Siebung und Eindampfen, wurde durch Differenzwägung die Staubmenge bestimmt. Nach Aufschluss des Staubbiederschlags mittels $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ erfolgt die Bestimmung der Elementgehalte mittels Massenspektrometrie (ICP-MS, inductively coupled plasma – mass spectrometry) gemäß DIN EN ISO 17294.

Seit 2011 wird das in DIN EN 15841 beschriebene Verfahren angewendet. Nach Einengung des Staubbiederschlags im Trockenschrank und anschließender Siebung wird dieser eingedampft und durch Differenzwägung die Staubmenge bestimmt. Dem Rückstand wird Salpeter- und Salzsäure zugegeben und dieser in einem Mikrowellen-Druckaufschlussautomaten bei 200°C aufgeschlossen. Die Bestimmung der Elementgehalte erfolgt ebenfalls mittels Massenspektrometrie (ICP-MS, inductively coupled plasma – mass spectrometry) gemäß DIN EN ISO 17294.

Durch die Änderung des Aufschlussverfahrens ab Februar 2011 ergaben sich für manche Elemente Änderungen der Wiederfindung, was die Vergleichbarkeit der Jahresmittelwerte gegenüber den Vorjahren etwas einschränkt.

Von LfL bzw. LfU (s. https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/hintergrundwerte_atmosphaer_depo.pdf) wurden auch andere Elemente oder Mess-Parameter untersucht, z.B. Mangan. Es wurden aber nur diejenigen 6 Elemente ausgewählt, für die sowohl eigene Messungen als auch Messungen des LfU vorlagen und die aus unserer Sicht am relevantesten sind: Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink.

Depositionswerte werden in $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ bzw. $\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Milligramm pro Quadratmeter und Tag bzw. Mikrogramm pro Quadratmeter und Tag) angegeben. Die Deposition für einen Monat ergibt sich durch Multiplikation mit der Anzahl der Tage des betreffenden Monats. Ausgewertet wurden ausschließlich Jahresmittelwerte in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, die man durch Hochrechnung der Monatsmittelwerte auf ein Jahr erhält.

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion – Immissionen

Im Beobachtungszeitraum (1985-2019) ergaben die Depositionsmessungen für die 6 ausgewählten Schwermetalle folgende Einträge in den Boden (s. Abb. 125: und Abb. 126).

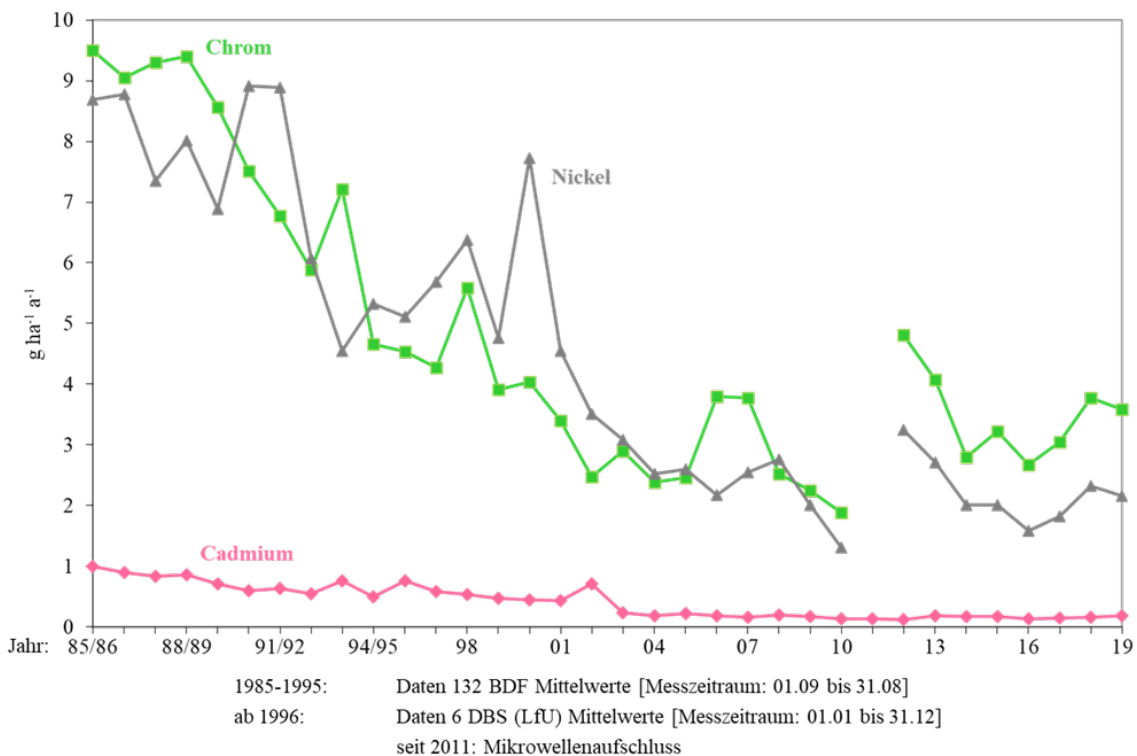


Abb. 125: Mittlere Einträge an Cadmium, Chrom und Nickel über Immissionen (ländliche Gebiete) in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

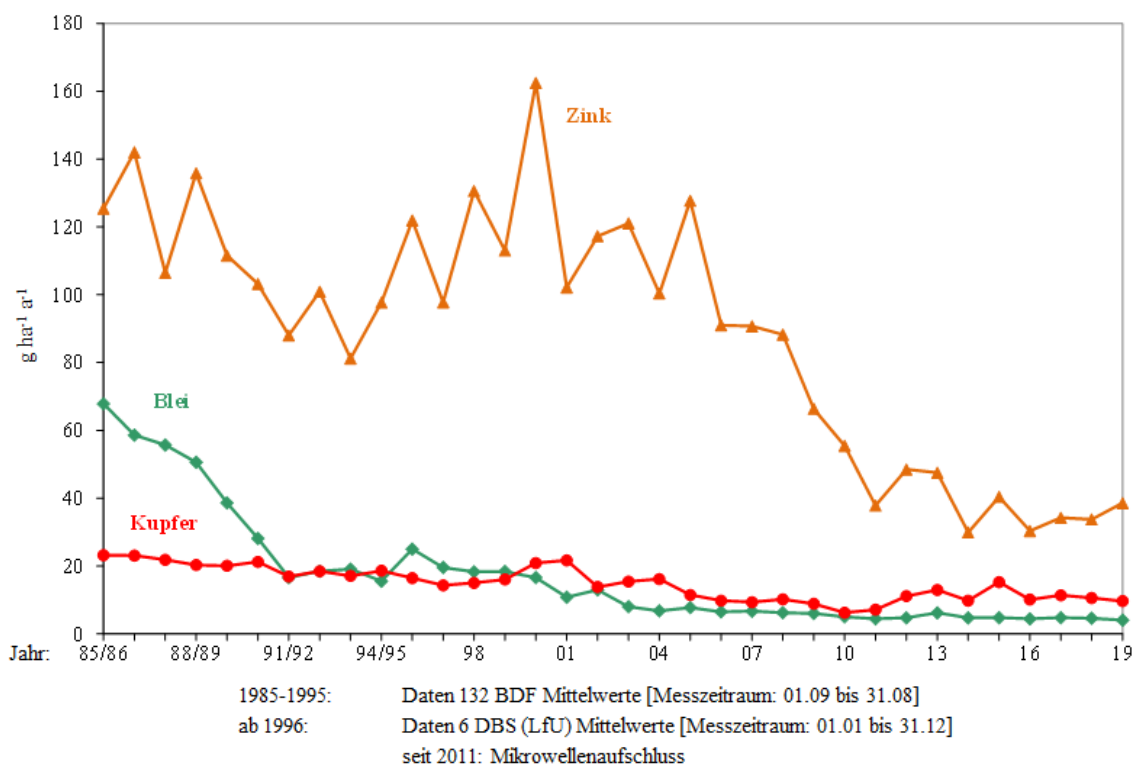


Abb. 126: Mittlere Einträge an Blei, Kupfer und Zink über Immissionen (ländliche Gebiete) in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

Für alle beobachteten Elemente waren die Immissionen im Beobachtungszeitraum rückläufig, jedoch in unterschiedlich starkem Maß und mit unterschiedlichem Verlauf.

Bei Chrom und Nickel ist im Beobachtungszeitraum ein sehr ähnlicher zeitlicher Verlauf feststellbar. Die Immissionen gingen anfangs stark zurück, ab Anfang der 2000er Jahre konnte aber kein weiterer Rückgang mehr beobachtet werden, stattdessen schwanken die Immissionen seitdem um 2 (Ni) – 3 (Cr) $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Ein allgemeiner Rückgang der Umweltverschmutzung und Emissionen seit Mitte der 1980er Jahre (z.B. Einbau von Filteranlagen in Kraftwerken oder dem Rückgang der Kohleverstromung), liefern Gründe für den Rückgang. Der gleiche, zeitliche Verlauf bei Chrom und Nickel, dürfte an der geogenen Natur beider Elemente liegen und dass beide Elemente in der Natur häufig miteinander vergesellschaftet vorkommen.

Die Immissionen an Cadmium sind im Beobachtungszeitraum von niedrigen Werten um $1 \text{ g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ auf Werte um $0,1-0,2 \text{ g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ zurückgegangen. Die Ursachen sind ein allgemeiner Rückgang der Gesamtemissionen und der Umweltverschmutzung durch vermehrten Einsatz umweltfreundlicher Technologien. Auch wird Cadmium wegen seiner stark toxischen Eigenschaften heute viel seltener verwendet als früher.

Im Allgemeinen etwas höher sind die Immissionen für Blei, Kupfer und Zink. Jedoch zeigt sich bei diesen Elementen im Beobachtungszeitraum ein Rückgang wie in Abb. 126 ersichtlich.

Besonders stark gingen die Blei-Immissionen zurück. Betragen die Blei-Einträge Mitte der 80er Jahre noch etwa $70 \text{ g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, liegen sie derzeit bei nur noch rd. $4 \text{ g Pb ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Das entspricht einem Rückgang um 90 % in 35 Jahren. Der starke Rückgang ist auf das Benzin-

Blei-Gesetzes von 1988 zurückzuführen. Seit Anfang der 2000er Jahre ist aber nur noch ein sehr schwacher Rückgang der Blei-Immissionen zu beobachten.

Die Kupfer-Immissionen lagen zu Anfang des Beobachtungszeitraums noch unter den Blei-Immissionen; sie nahmen in den Folgejahren aber weniger stark ab als beim Blei. Sie betragen derzeit rd. 9-10 g Cu ha⁻¹ a⁻¹. Ein weniger starker Rückgang bei den Kupfer-Immissionen, kann am vermehrten Einsatz von Kupfer (z.B. Kupferbleche im Hausbau, Kupfer für Wasserleitungen und Dachrinnen) liegen. Der Einsatz kupferhaltiger Spritzmittel bei Sonderkulturen und Kartoffeln (s. Kap. 3.4) sowie Kupfergaben bei der Spurenelement-Düngung sind aber rückläufig.

Zink kommt im Vergleich zu anderen Schwermetallen allgemein sehr häufig vor, z.B. in Böden (s. Kap. 2.3.3.7) und Wirtschaftsdüngern (s. Abb. 117), was Ursache dafür ist, dass es von allen untersuchten Elementen mit den höchsten Konzentrationen im Staubbiederschlag gemessen wurde. Haben sich die Zink-Immissionen von Beginn des Beobachtungszeitraums bis etwa 2005 nur leicht verändert (erst leichter Rückgang, zur Jahrtausendwende dann wieder leichter Anstieg), fand ab ca. 2005 ein stärkerer Rückgang der Immissionen an Zink statt. Derzeit liegen die Zink-Immissionen bei etwa 30-40 g Zn ha⁻¹ a⁻¹. Eine Ursache dafür sein könnte, dass die Emissionen an Schwermetallen insgesamt zurückgingen, weil Umweltschutzmaßnahmen greifen. Fast 50 % des Zinks findet aber auch Verwendung in der Bauindustrie (UBA, 2005, Dorner, 2015). Dort ging die Verwendung von Zink z.B. für Bedachungen, als Zinkbleche, Dachrinnen, usw. oder in Form verzinkter Eisenbleche zurück, weil stattdessen vermehrt Kupfer dafür verwendet wird.

Die Immissionen stellen die über Bayern gemittelten Stoffeinträge über die Luft in ländliche Gebiete Bayerns dar. Unberücksichtigt blieb aber, wie nah oder fern eine BDF zu einem Emittenten (z.B. Industrieanlage, Verkehrsweg, städtische Ansiedlung) liegt. Die bei den 6 DBS des LfU gemessenen Immissionen sind also nicht auf alle BDF in Bayern übertragbar oder anzunehmen. Leider gibt es keine Belastungskarten potenzieller Immissionen für Bayern, wo solche Emittenten berücksichtigt werden.

Immissionen sind Teil der Einwirkungen auf den Boden im Sinne von Abs. 1, § 11 der BBodSchV. Die gemessenen, jährlichen Eintragsfrachten an Schadstoffen bleiben jedoch weit unterhalb der zulässigen Zusatzbelastungen für die Fälle mit Vorsorgewert-Überschreitungen gemäß Tabelle Nr. 5, Anh. 2 der BBodSchV.

3.4 Einträge von Kupfer und Zink bei Sonderkulturen

Wegen der fungiziden Wirkung werden beim Anbau von Sonderkulturen wie Hopfen, Obst und Wein häufig kupfer- oder zinkhaltige Pflanzenschutzmittel (PSM) eingesetzt. Auf 7 Sonderkultur-BDF [3 Hopfen-, 1 Obst- und 3 Wein-BDF] und einer BDF mit ehemals Hopfenanbau (Nutzungsänderung im Beobachtungszeitraum!), wurden die Gaben an kupfer- und zinkhaltigen PSM von den teilnehmenden Landwirten abgefragt (Schlagkartei). Wegen der geringen Anzahl der beprobten Betriebe und deren regionaler Verteilung in Bayern, können die Ergebnisse natürlich nicht als repräsentativ für die jeweiligen Sonderkulturen in Bayern angesehen werden. Die Sonderkultur-BDF stellen jedoch einen wichtigen Baustein im landesweiten Bodenbeobachtungsprogramm dar.

Tab. 55: Einträge an Reinkupfer durch Pflanzenschutzmittel und berechnete Gehaltszunahmen im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum.

BDF		Nutzung		Reinkupfer				
				Einträge 1986-2020 (=36 Jahre)			Gehaltsänderung im Oberboden	
				Summe Einträge	Mittl. jährl. Eintrag	Mittl. jährl. Eintrag pro Anwendungsjahr	durch PSM-Anwend. ges. Beobacht. zeitraum	im Jahr
kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹ a ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹ a ⁻¹		
61	Hopfen	580	16,1	24,2	129	3,6	54	2,2
62	Hopfen	341	9,5	14,8	76	2,1	48	2,0
83	Hopfen	275	7,6	12,5	61	1,7	35	1,5
60	Nutzungsänderung (chem. Hopfen)	397	11,0	30,5	88	2,5	15	
127	Obst	11	0,3	1,8	2	0,1	4	
97	Wein	99	2,7	3,7	22	0,6	16	0,6
102	Wein	24	0,7	1,8	5	0,1	-12	
108	Wein	42	1,2	3,0	9	0,3	51	1,7

Tab. 55 zeigt die Einträge an Reinkupfer bei den Sonderkultur-BDF und zwar die Summe aller Einträge im gesamten Beobachtungszeitraum (36 Jahre), die Einträge pro Jahr und die mittleren Einträge für diejenigen der 36 Jahre, wo tatsächlich Kupferspritzungen stattfanden (=Anwendungsjahre). Daraus wurden Gehaltsänderungen für die Oberböden der Sonderkultur-BDF beim Ansatz einer Trockenrohddichte von 1,5 t m⁻³ und einer Oberbodenmächtigkeit von 0,3 m errechnet, und zwar für den gesamten Beobachtungszeitraum und ebenso pro Jahr. Diese wurden den absoluten Gehaltsänderungen im Oberboden (Gehalte am Ende des Beobachtungszeitraum - Anfangsgehalt bei Erstbeprobung der BDF) und falls Bestimmtheitsmaß R²>0,3, den aus dem Trend der linearen Regression errechneten Gehaltsänderungen für Cu in Oberböden der Sonderkultur-BDF gegenübergestellt.

Tab. 56: Einträge an Reinzink durch Pflanzenschutzmittel und berechnete Gehaltszunahmen im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum.

BDF	Nutzung	Reinzink						
		Einträge 1986-2020 (=36 Jahre)			Gehaltsänderung im Oberboden			
		Summe Einträge	Mittl. jährl. Eintrag	Mittl. jährl. Eintrag pro Anwendungsjahr	durch PSM-Anwend.		laut gemessener Bodengehalte	
					ges. Beobacht. zeitraum	im Jahr	absolut im ges. Beobacht.zeitraum	lin. Trend im Jahr
kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	kg ha ⁻¹ a ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹ a ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹ a ⁻¹		
61	Hopfen	21	0,6	3,0	4,7	0,13	4	
62	Hopfen	11	0,3	1,8	2,4	0,07	-8	
83	Hopfen						-28	-0,7
60	Nutzungsänderung (chem. Hopfen)	2	0,1	2,2	0,5	0,01	-5	
127	Obst						0	
97	Wein						-20	
102	Wein						-12	-0,3
108	Wein						64	2,1

Wie Tab. 55 zeigt, sind die durch Pflanzenschutzmittel verursachten Einträge an Reinkupfer auf Hopfen-BDF sehr hoch (seit 1985 insgesamt 275 - 580 kg Reinkupfer ha⁻¹), wohingegen Zink (s. Tab. 56) dort nur geringe Bedeutung hat. Die, durch Pflanzenschutzmittel auf Weinflächen verursachten Einträge an Reinkupfer sind deutlich geringer (insges. 42-99 kg Cu ha⁻¹ seit 1985), dort spielt Zink als Pflanzenschutzmittel ebenfalls keine Rolle. Die geringsten durch Pflanzenschutzmittel-Einsätze verursachten Einträge an Reinkupfer wurden auf der Boden- Dauerbeobachtungs-Fläche mit Obstanbau festgestellt (11 kg Cu ha⁻¹ im gesamten Beobachtungszeitraum), Zink spielt auch dort keine Rolle.

Da Kupfer sich im Boden anreichert, stiegen die Cu-Gehalte im Oberboden der Sonderkultur-BDF im Beobachtungszeitraum an, wie Tab. 55 zeigt. Vergleicht man die Einträge an Kupfer durch Pflanzenbehandlung im Hopfen und Weinbau mit den gemessenen Gehaltszunahmen im Oberboden dieser BDF, fällt aber auf, dass die für die Kupferspritzungen errechneten Gehaltszunahmen sich nur zum Teil in den Oberböden messen lassen. Das liegt vielleicht auch daran, dass Ernteentzüge, Oberflächenaustrag und Tiefenverlagerung wieder zu einer Verringerung der Kupfergehalte im Oberboden gesorgt haben dürften. Ausnahme ist Wein-BDF 108, wo die gemessenen Zunahmen beim Kupfer, die Einträge durch Pflanzenschutzmittel überwiegt. Hier lässt sich die Zunahme an Kupfer im Boden nicht allein durch die Anwendung kupferhaltiger Spritzmittel erklären – es ist aber auch denkbar, dass bei BDF 108 nicht alle Kupferspritzungen durch Abfrage der Schlagdaten vollständig erfasst wurden.

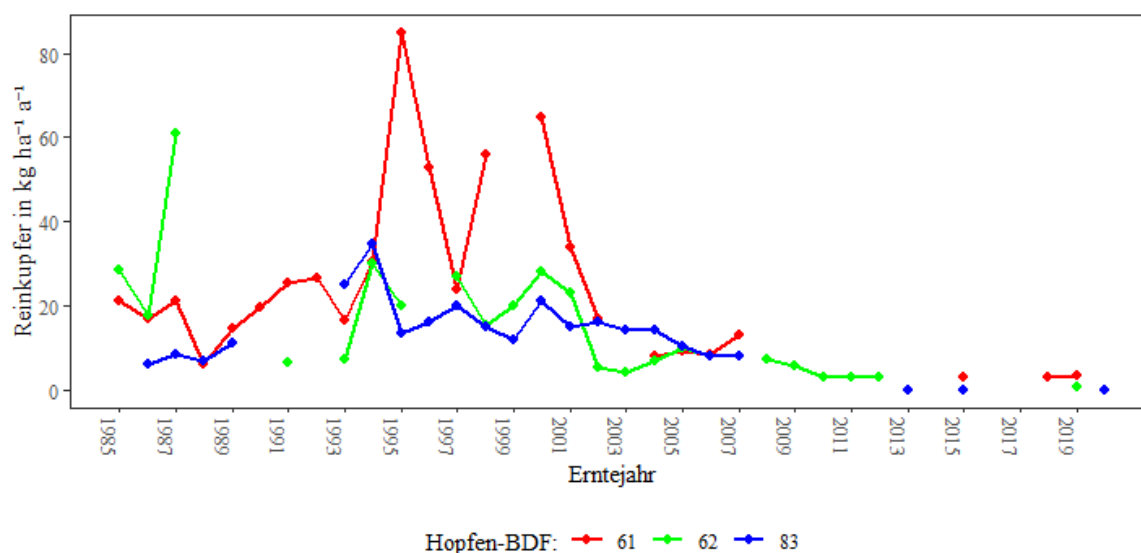


Abb. 127: Zeitlicher Verlauf der Reinkupfergaben auf Hopfen-BDF im Beobachtungszeitraum.

Wie Abb. 127 zeigt, haben die Aufwandmengen an Reinkupfer bei den Hopfen-BDF von 1985 bis etwa zur Jahrtausendwende noch zugenommen, anschließend aber stark abgenommen. Heute liegen sie bei unter $4 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und damit deutlich unter den Aufwandmengen zu Beginn des Beobachtungszeitraums.

Nach umwelt- und anwendertoxikologischer Beurteilung durch das Umweltbundesamt (UBA) sollten kupferhaltige Pflanzenschutzmittel generell nicht mehr angewendet werden. Hopfenbaubetriebe (besonders Öko-Betriebe) können zum derzeitigen Stand allerdings nicht auf diesen Wirkstoff verzichten. Es soll deshalb überprüft werden, wie weit die Kupfermengen pro Saison reduziert werden können, ohne Ertrag und Qualität des geernteten Hopfens zu verschlechtern (LfL-Forschungs- und Innovationsprojekt zur Reduzierung oder zum Ersatz kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel im ökologischen Hopfenbau: <https://www.lfl.bayern.de/schwerpunkte/oekolandbau/102399/index.php>). Ein erstes Ziel ist es, die derzeit nach Pflanzenschutzgesetz erlaubte Aufwandmenge von $4,0 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ um 25 % auf $3 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zu reduzieren. Bis etwa 1965 sind z.T. aber noch bis zu $60 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zur Bekämpfung von Schaderregern im Hopfenbau eingesetzt worden oder waren zulässig.

Die Kupfergehalte im Boden der Sonderkultur-BDF sind jedoch deutlich höher (bis $>150 \text{ mg Cu kg}^{-1}$) als im Boden vergleichbarer Acker- oder Grünland-BDF (meist $<60 \text{ mg Cu}$) (s. Abb. 22 - Abb. 26). Als Cu-Entzüge des Hopfens geben Portner et al. (LfL) für Dolden 581 g , für Häcksel 3473 g und insgesamt $4055 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ an. Durch Beerntung sind die Entzüge also viel zu gering, um deutliche Abnahmen des Kupfergehaltes im Boden messen zu können. Als Dauerkulturen betrieben ist bei Hopfen mit erneuten Cu-Spritzungen zu rechnen, so dass auf Sonderkultur-BDF die Kupfergehalte im Boden nicht abnehmen und hoch bleiben dürften.

4 Stoffausträge anorganischer Schad- und Spurenstoffe aus Böden

Durch Beweidung, Ernteprodukte, Tiefenverlagerung, Bodenerosion und Oberflächenabfluss, durch Ausgasung aus dem Boden oder v.a. bei organischen Schadstoffen auch durch biologischen Abbau können Schadstoffe wieder aus dem durchwurzelbaren Boden ausgebracht werden.

Im Folgenden werden die Entzüge durch Beerntung und was durch Auswaschung ausgebracht wird kurz betrachtet.

Über den Nährstoff- und Schwermetallgehalt bayerischer Ernteprodukte liegen umfangreiche Ergebnisse u. a. aus der besonderen Ernteterminnung vor (BMEL, 2020). Sie zeigen eine starke Schwankung der Werte in Abhängigkeit vom Standort und insbesondere vom Witterungsverlauf in den einzelnen Jahren. Außer dem Wassergehalt und pH-Wert des Bodens beeinflusst auch die jeweilige Sorte das Aufnahmevermögen der Pflanze(nart) für Schwermetalle erheblich.

Da bei der Vielzahl, der auf den Acker-BDF angebauten Fruchtarten und Sorten selbst bei jährlicher Untersuchung aller Ernteprodukte abgesicherte Werte nicht zu erreichen sind, wurde auf die Bestimmung des Nährstoff- und Schwermetallgehalts verzichtet und werden stattdessen hier (s. Tab. 57) nur einige wenige typische Schwermetall-Austräge durch Beerntung und Auswaschung (Faustzahlen aus der einschlägigen Fach-Literatur) angegeben.

Tab. 57: Schwermetallausträge durch Marktfrüchte (Beerntung) und Auswaschung in $g\ ha^{-1}\ a^{-1}$ (KTBL, 2005).

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Beerntung/Marktfrüchte:	$g\ ha^{-1}\ a^{-1}$					
Milchviehbetrieb	0,5	0,6	12	0,8	0,7	53
Schweinezucht- und Schweinemastbetrieb	1,1	1,3	18	1,3	1,4	91
Auswaschung:						
Milchviehbetrieb	0,3	1,6	16	16	3,0	34
Schweinezucht- und Schweinemastbetrieb	0,3	0,9	13	13	2,4	30

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Schadstoffe sind schädlich für Natur und Umwelt, Pflanze, Tier und Mensch. Abhängig von Menge, Konzentration und Verfügbarkeit, sowie in Abhängigkeit v.a. von der Hauptbodenart, dem pH-Wert und dem Humusgehalt des Bodens, können von anorganischen und organischen Schad- und Spurenstoffen Gefährdungen für Böden ausgehen. Aufgrund des Mitte der 1980er Jahre aufkommenden Bewusstseins hierfür, wurde 1985 von der damaligen Bundesregierung die Bodenschutzkonzeption verabschiedet, mit dem Ziel, den Boden vor Schadstoffen zu schützen, sie im Boden zu messen und Schadstoffeinträge auf/in den Boden zu erfassen. Daraufhin wurden in Bayern auf über 130 landwirtschaftlich genutzten Standorten Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) eingerichtet, mit dem Ziel, den Zustand der Böden als Grundlage für die landwirtschaftliche Produktion festzustellen und Veränderungen sowie deren Ursachen frühzeitig erkennen zu können. Eine wichtige Aufgabe ist hierbei, die Schadstoffgehalte auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Bayern für verschiedene Landschaftseinheiten und unterschiedliche Nutzungen sowie langfristige Veränderungen der Stoffgehalte in Ober- und Unterböden regelmäßig zu messen. Außerdem wurden Stoffeinträge und ihrer Veränderungen über die Zeit durch Dünger, Pflanzenschutzmittel und aus der Luft bestimmt.

Seit 1985 wurden dazu auf praxisüblich bewirtschafteten Flächen in 10-jährigen Abständen Bodenproben gezogen. Die Bodenproben wurden auf Gesamt- und pflanzenverfügbare Gehalte anorganischer Schad- und Spurenstoffe und auf organische Schadstoffe (Umweltchemikalien, Rückstände von Pflanzenschutzmitteln) untersucht. Alle 6 Jahre wurden auch Wirtschaftsdünger auf anorganische Stoffe untersucht und kontinuierlich die Immissionen anorganischer Schadstoffe gemessen sowie Kupfer- und Zinkspritzungen bei Sonderkulturen erfasst.

Die Gesamtgehalte anorganischer Schadstoffe in Ober- und Unterböden (4 Beprobungen bisher) von 117 BDF mit über 30-jähriger Beobachtungszeit (darunter 80 Acker-, 18 Grünland- und 7 Sonderkultur-BDF, davon 3 Hopfen-, 1 Obst- und 3 Wein-BDF) lagen für 11 näher betrachtete Elemente überwiegend im Bereich der Hintergrundwerte für Bayern (s. <https://www.lfu.bayern.de/boden/hintergrundwerte/index.htm>). Meist sind die Unterschiede zwischen Ober- und Unterböden nicht sehr groß. Für manche Elemente misst man aber durchschnittlich höhere Gehalte in Oberböden (z.B. Blei, Cadmium, Quecksilber, Uran, Zink), weil diese Elemente eher von außen (z.B. über Immissionen oder Düngung) in Böden eingetragen werden und sich dort meist im Oberboden anreichern. Andererseits gibt es Elemente z.B. Arsen, Chrom und Nickel wo die Unterbodengehalte häufig über denen der Oberböden liegen. Dabei handelt es sich um Elemente, die dem Ausgangsgestein (=geogen) entstammen. Im Oberboden werden sie gegenüber den Unterböden beispielsweise durch Pflanzenentzug oder Tiefenverlagerung innerhalb des Bodenprofils abgereichert, was zu höheren Gehalten im Unterboden führt.

Überschreitungen der Vorsorgewerte der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV) wurden dort festgestellt, wo geogen, also natürlich bedingt höhere Hintergrundwerte auftreten oder auf sandigen oder als sandig eingestuften Böden (Hauptbodenart Sand), besonders bei Cadmium, Nickel und Zink. Das liegt zum einen daran, dass die jeweiligen Vorsorgewerte der Hauptbodenart Sand strenger als für die Hauptbodenart Lehm/Schluff und diese wieder strenger als für die Hauptbodenart Ton sind, aber v.a. auch daran, dass für diese drei Elemente bei pH<6 für die Hauptbodenarten Ton und Lehm/Schluff nach Bundes-Bodenschutz-Verordnung der jeweils strengere Vorsorgewert für die weniger feinkörnige Hauptbodenart anzuwenden ist. Vorsorgewerte wurden aber v.a. auch bei Kupfer und in geringem

Umfang bei Zink auf Sonderkultur-BDF überschritten (für Kupfer wiesen alle Sonderkultur-BDF im Oberboden Überschreitungen der Vorsorgewerte auf). Grund sind kupfer- und (wesentlich seltener) zinkhaltige Spritzmittel zur Bekämpfung von Pilzkrankungen v.a. bei Hopfen und Wein. Werden Vorsorgewerte überschritten, besteht nach § 9 BBodSchV die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung. Schädliche Bodenveränderungen sind nach § 2 Abs. 3 des Bundes-Bodenschutz-Gesetzes (BBodSchG, 1998) Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen (hier ist im Besonderen die landwirtschaftliche Nutzung gemeint), die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. Bei Überschreitungen von Vorsorgewerten ist eine schädliche Bodenveränderung aber nicht bestätigt, sondern es besteht lediglich die Besorgnis und weitere Prüfungen, besonders zur Verfügbarkeit eines Schadstoffes für Pflanzen, müssten eine schädliche Bodenveränderung erst nachweisen.

Für die meisten Elemente und Nutzungen (Acker, Grünland, Sonderkulturen) haben sich die Gehalte im Oberboden im Beobachtungszeitraum (Abnahme/Zunahme) nicht deutlich verändert. Besonders bei Acker-BDF war der Anteil der BDF mit Ab- und Zunahmen gering. Bei Grünland-BDF wurden bei vielen BDF v.a. bei Chrom und Zink Gehaltsabnahmen festgestellt. Bei Sonderkultur-BDF haben im Beobachtungszeitraum die Urangehalte vieler BDF abgenommen (mögliche Begründung: in der Regel keine mineralische Phosphat-Düngung im Grünland!). Die Kupfergehalte in den Oberböden vieler Sonderkultur-BDF haben seit 1985 jedoch zugenommen (71 %, also 5 der 7 Sonderkultur-Flächen zeigten Gehaltszunahmen). Kupfer ist ein im Hopfen- und Weinbau wichtiges und häufig angewandtes Fungizid, was dort zu Kupfer-Anreicherungen im Boden führt.

Der Anteil pflanzenverfügbarer anorganischer Schad- und Spurenstoffe beträgt in der Regel nur ca. 1 % bis max. einige Prozent der Gesamt-Gehalte (Mikrogramm statt Milligramm). Es wurden hauptsächlich Acker-BDF und diejenigen 7 Elemente betrachtet, für die in der Bundes-Bodenschutz-Verordnung (BBodSchV) in Anh. 2, Kap. 2 für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt sind. Die Untersuchungen der Böden der Acker-BDF haben keine erhöhte Verfügbarkeit von Blei, Cadmium und Thallium (hinsichtlich negativer Beeinflussung der Pflanzenqualität) noch von Arsen, Kupfer, Nickel und Zink (hinsichtlich Wachstumsbeeinträchtigungen für Pflanzen) ergeben.

Die Gehalte Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe (16 PAK der EPA, darunter auch Benzo(a)pyren) in BDF-Oberböden waren niedrig. Die bei Böden $\leq 8\%$ Humusgehalt um Faktor 3,33 gegenüber humoseren Böden geltenden strengeren Vorsorgewerte der BBodSchV von 3 mg kg^{-1} TM Boden für ΣPAK_{16} und $0,3 \text{ mg}$ für Benzo(a)pyren, wurden je nur zu einem Drittel in BDF-Oberböden erreicht. Im zeitlichen Verlauf haben die PAK-Gehalte weiter abgenommen. Polychlorierte Biphenyle (6 PCB nach Ballschmiter) wurden nur bei der Ersterhebung 1985/86 untersucht und sehr geringe Konzentrationen ($\Sigma\text{PCB}_6 < 0,006 \text{ mg kg}^{-1}$ - der strengere Vorsorgewert für Böden $\leq 8\%$ Humusgehalt liegt bei $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ TM Boden) in den Oberböden der BDF festgestellt; auf eine erneute Untersuchung wurde daher verzichtet. Die Oberboden-Gehalte an PAK und PCB der Acker-BDF unterschieden sich nur wenig von den Oberboden-Gehalten der Grünland-BDF.

Persistente Rückstände lange verbotener Pflanzenschutzmittel aus der Gruppe der chlorierten Kohlenwasserstoffe, darunter Lindan = γ -Hexachlorcyclohexan, Hexachlorbenzol sowie DDT und seine Metaboliten konnten schon bei Ersterhebung 1985/86 kaum in Oberböden der BDF nachgewiesen werden. Die Gehalte haben im Beobachtungszeitraum weiter abgenommen und liegen heute nahe der analytischen Nachweisgrenzen.

Organische Schadstoffe deren Gehalte in Böden derart gering sind, dass ein weiteres Monitoring nicht mehr gerechtfertigt erscheint, auch weil diese Stoffe lange schon nicht mehr hergestellt oder verwendet werden bzw. verwendet werden dürfen, könnten bald aus dem Monitoring genommen werden. Andere organische Schadstoffe hoher Persistenz und aktueller Brisanz für die Umwelt (u.a. Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen, Antibiotika und Arzneimittelrückstände, Mikro- und Nanoplastik in Böden) sollten in Zukunft Eingang ins Bodenmonitoring finden.

Im Beobachtungszeitraum wurden auch insgesamt 574 Wirtschaftsdünger untersucht, darunter 272 Rinder- und 127 Schweinegülle. Wegen der geringen Anzahl bei BDF-Betrieben wurde ab 1993 auch Schweinegülle von Zusatzbetrieben (Nicht-BDF) mit intensiverer Schweinehaltung beprobt und regelmäßig im Rahmen des Monitorings untersucht. Von keinem Betrieb (BDF- oder Zusatzbetrieb) ist jedoch von allen 6 Beprobungen durchgängig Schweinegülle untersucht worden - bei Rindergülle wurden 13 BDF durchgängig beprobt und untersucht. Ab 2006 wurden erstmals auch Gärreste im Rahmen von BDF untersucht - ein Wandel von Gülle zu Gärresten ist auch bei den BDF feststellbar.

Für Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber, Thallium und Uran wurden geringe Gehalte in Rinder- und Schweinegülle gemessen, die im Beobachtungszeitraum meist abgenommen haben. Somit sind auch die jeweils errechneten Eintrags-Frachten, bei nach Düngeverordnung maximal zulässiger N-Düngung von $170 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, in die Böden gering. Für Kupfer und Zink jedoch sind hohe Gehalte in der untersuchten Rinder- und Schweinegülle gemessen worden. Entsprechend hoch waren die daraus errechneten Eintragsfrachten:

So ist bei Kupfer und Rindergülle der Medianwert im Beobachtungszeitraum über alle Beprobungen zwar mehr oder weniger gleich hoch (rd. $150 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) geblieben. Demgegenüber aber schwankten die Kupfer-Frachten (Medianwerte) bei Schweinegülle im Beobachtungszeitraum (6 Beprobungen und Untersuchungen: 1985/86, 1993, 1999, 2005/06, 2012 und 2018) erheblich:

1985/86 errechneten wir eine mediale Eintragsfracht von $789 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, daraufhin nahm die Eintragsfracht auf $240 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1993) ab; anschließend nahm sie auf 332 (1999) und $373 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2005/06) zu um daraufhin erneut auf $222 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2012) ab- und schließlich wieder auf $397 \text{ g Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2018) zuzunehmen.

Für Zink und Rindergülle nahmen die Frachten im Beobachtungszeitraum von $856 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1985/86) auf $674 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1993) ab, stiegen anschließend auf $1038 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (1999) an und fielen erneut auf 871 (2005/06), 801 (2012) und $687 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2018). Bei Schweinegülle nahmen die Zink-Frachten von 1985/86 ($1872 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) bis 1993 ($540 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) erheblich ab, um dann wieder auf 1205 (1999) und $1286 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2005/06) anzusteigen. 2012 gingen die Zn Frachten erneut auf $1162 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zurück und stiegen wieder auf $1408 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (2018) an.

Besonders bei Schweinegülle spiegelt der zeitliche Verlauf die gesetzlichen Änderungen, wie die Verschärfungen der Futtermittel-Verordnung (besonders zwischen 1986 und 2003) oder das Verbot antibiotischer Leistungsförderer (seit 01.01.2006) wider. Wenn auch der Trend nicht immer sehr deutlich ist, haben die Gehalte und Frachten an Kupfer und Zink bei Schweinegülle im Beobachtungszeitraum etwas abgenommen (besonders im Vergleich zur Erstuntersuchung 1985/86).

Bei den meisten Mineraldüngern hingegen werden nur geringe Schadstoffmengen in die Böden eingetragen. Phosphathaltige Ein- und Mehrnährstoffdünger können aber je nach Herkunft des Rohphosphates, besonders wenn es aus sedimentären Lagerstätten stammt,

größere Mengen an Mengen an Cadmium (bis 12 mg Cd kg^{-1}) und Uran (bis 63 mg U kg^{-1}) enthalten. Eine dem Pflanzenbedarf besser angepasste Phosphordüngung hat seit 1980 aber zu einem starken Rückgang des Verbrauchs an Phosphaten und gleichzeitig zu einem Rückgang des Cadmium- und Uran-Eintrags in Böden geführt.

Die Schadstoff-Depositionen aus der Luft (Immissionen) haben für alle der 6 betrachteten anorganischen Schad- und Spurenstoffe (Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink) seit 1985 abgenommen. Besonders stark nahmen bei Blei (Benzin-Blei-Gesetz), Cadmium, Chrom und Nickel (Rückgang der allgemeinen Luftverschmutzung) die Einträge aus der Luft ab. Aber auch bei Zink haben die Immissionen abgenommen (Zink wird heute seltener verwendet z.B. im Hausbau), ein viel geringerer Rückgang war auch beim Kupfer zu beobachten (Kupfer hat im Hausbau Zink häufig ersetzt).

Wegen der fungiziden Wirkung werden bei Sonderkulturen (Hopfen, Obst, Wein) seit langem (auch schon vor Beginn der Bodendauerbeobachtung 1985) Kupfer und teilweise auch Zink im Pflanzenschutz eingesetzt. Besonders hoch waren die Kupfereinträge bei den 3 Hopfen-BDF. So wurden dort seit 1985 insgesamt $275\text{-}580 \text{ kg}$ an Reinkupfer ha^{-1} in die Böden eingebracht - bei den 3 Wein-BDF hingegen waren es nur $42\text{-}99 \text{ kg ha}^{-1}$. Auf den Hopfen-BDF haben die Aufwandmengen an Reinkupfer von 1985 bis etwa zur Jahrtausendwende sogar noch zugenommen; danach aber stark abgenommen. Sie liegen heute bei unter $4 \text{ kg Cu ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und somit deutlich unter den Aufwandmengen zu Beginn des Monitorings. Da Kupfer sich im Boden anreichert, sind bei Sonderkultur-BDF die Kupfergehalte im Boden deutlich höher (bis $150 \text{ mg Cu kg}^{-1}$) als in Böden vergleichbarer Acker- oder Grünland-BDF (meistens $< 60 \text{ mg Cu kg}^{-1}$). Sie haben dort im Beobachtungszeitraum zugenommen (um $35\text{-}54 \text{ mg Cu kg}^{-1}$ bei den Hopfen-BDF und $16\text{-}51 \text{ mg Cu kg}^{-1}$ bei den Wein-BDF). Mögliche Entzüge z.B. durch Beerntung sind viel zu gering, um deutliche Abnahmen des Kupfergehaltes im Boden messen zu können. Auch werden Hopfen und Wein als Dauerkulturen betrieben und es wird dort, wenn nun auch mit deutlich geringeren Aufwandmengen, weiterhin mit Kupferpräparaten gespritzt, so dass die Kupfergehalte im Boden auch in Zukunft nicht abnehmen werden. Allerdings decken sich die in Oberböden gemessenen Zunahmen bei Kupfer- und Zinkgehalten nicht genau mit den aus den Schlagdaten errechneten Einträgen über Cu-/Zn-haltige Pflanzenschutzmittel, was doch auf gewisse Ernteentzüge oder Austräge durch Erosion und Tiefenverlagerung schließen lässt. Da Kupfer ein Mikronährstoff ist und Pflanzen über Mechanismen verfügen, um nicht zu viel Kupfer aufzunehmen, stellen die hohen Bodenwerte in der Regel kein Anbau-Risiko hinsichtlich einer Verschlechterung der Pflanzenqualität dar und führen dort in der Regel auch nicht zu Mindererträgen. Häufig aber kann auf diesen Flächen nur Hopfen oder Wein nachgebaut werden.

Durch Beerntung, Beweidung, Tiefenverlagerung (z.B. mit dem Sickerwasser), Bodenerosion und Oberflächenabfluss, durch Ausgasung aus dem Boden (flüchtige Schadstoffe) oder bei organischen Schadstoffen auch durch biologischen Abbau können anorganische wie organische Schadstoffe wieder aus dem durchwurzelbaren Boden ausgetragen werden. Jedoch sind die jährlichen Austräge durch Beerntung gering und braucht es lange Zeiträume, bis diese im Boden messbar werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in BDF-Böden gemessenen Schadstoffgehalte und die Schadstoffeinträge über Dünger, Pflanzenschutzmittel oder die Luft überwiegend sehr niedrig sind und sich im Beobachtungszeitraum nicht stark verändert haben oder sogar zurückgegangen sind. Schädliche Bodenveränderungen traten bei BDF nicht auf. Kupferspritzungen auf Sonderkultur-BDF führten allerdings zu Zunahmen von Kupfer im Boden. Höhere Konzentrationen an Kupfer und Zink wurden zwar auch in Rinder- und Schweinegülle gemessen, die Einträge sind aber weit geringer als durch Kupferspritzungen

bei Sonderkulturen. Auch ist im Beobachtungszeitraum ein Rückgang von Kupfer und Zink in Rinder- und Schweinegülle feststellbar. Wie Cadmium und Uran (gehäuft in Mineraldüngern enthalten) sollten alle anorganischen Schad- und Spurenstoffe (auch die übrigen, aus Sicht des Bodenschutzes und der Landwirtschaft weniger relevanten chemischen Elemente) auch künftig im Boden und bei allen Eintragungspfaden untersucht werden. Bei bislang noch nicht untersuchten organischen Schadstoffen oder anderen schädlichen Stoffen von aktueller Brisanz, sollte das Bodenmonitoring jedoch flexibel und schnell reagieren können und sie unter Beobachtung nehmen, wenn das fachlich begründet ist.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Fr. Treisch (LfL-IAB) für die Kartendarstellungen, Organisation und Betreuung des BDF-Programms sowie bei Dr. Blum (LWF), Fr. Dr. Mikolajewski, Dr. Henkelmann, Dr. Wurzing, Dr. Lepschy (LfL-AL), Dr. Wiesmeier (LfL-IAB) mit ihren jeweiligen Laborteams für die Probenaufbereitung und Laboranalysen, bei den Kolleginnen und Kollegen der beteiligten AELF für die Probenahmen, bei den Landwirtinnen und Landwirten für die Bereitschaft zur Teilnahme bei BDF und beim StMELF für die Finanzierung des BDF-Programms. Wir möchten uns auch bedanken bei Fr. Dr. Harms (LfL-ITE), Fr. Dr. Köhler und Fr. Krapp (beide LfU) für die hilfreichen Anregungen und Textkorrekturen sowie bei Herrn Kavka (LfL-IAB).

Literaturverzeichnis

BMEL, 2020: Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2020.

BUA-Stoffbericht 216, 1998: Gesellschaft Deutscher Chemiker, Beratergremium für Altstoffe - DDT und Derivate, Modellstoffe zur Beschreibung endokriner Wirkungen mit Relevanz für die Reproduktion, S. Hirzel Verlag, ISBN 3-7776-0961-7.

Dittrich, B., 2008: Cadmiumaustrag über Düngemittel - BfR-Statusseminar Cadmium, neue Herausforderungen für die Lebensmittelsicherheit? Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, Sachsen, https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/cadmiumaustrag_ueber_duengemittel.pdf.

Dorner, U., 2015: Rohstoffrisikobewertung – Zink. – DERA Rohstoffinformationen 25: 55 S., Berlin.

Eckelmann, W. et al., 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Ausgabe (KA5), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, Schweizerbart Science Publishers.

Hintermaier-Erhard, G., Zech, W., 1997: Wörterbuch der Bodenkunde, Stuttgart, Spektrum Akademischer Verlag, Enke/Springer.

HLUG, 2014: Persistente organische Schadstoffe in landwirtschaftlich genutzten Böden Hessens, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: „Böden und Bodenschutz in Hessen“, Heft 11.

Kassambara, A., 2019: GGPlot2 Essentials - Great Data Visualization in R, 1. Edition, datanovia.com/en (<https://www.datanovia.com/en>).

- Köhler, J. P., Peichl, L., 2009: 30 Jahre Immissionsökologie am Bayerischen Landesamt für Umwelt, Augsburg, Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Kratz, S., Schnug, E., 2006: Rock phosphates and P fertilizers as sources of U contamination in agricultural soils, in „Uran in der Umwelt“, ISBN: 978-3-540-28363-8, S.57-67.
- Kratz, S., Godlinski, F., Schnug, E., 2011.: Heavy Metal Loads to Agricultural Soils in Germany from the Application of Commercial Phosphorus Fertilizers and Their Contribution to Background Concentration in Soils, The New Uranium Mining Boom, Springer Verlag, S. 755–762.
- KTBL, 2005: Faustzahlen für die Landwirtschaft, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, 13. Auflage.
- LBP (Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau), 1997: Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) - Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil I – 4/97: Einführung, Stoffbestand des Bodens – Nährstoffe, Schadstoffe. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau.
- LBP (Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau), 1997: Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) - Bericht nach 10jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil II – 5/97: Stoffeinträge, Stoffausträge, Schwermetall-Bilanzierung verschiedener Betriebstypen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft), 2006: Schweinegülle - Quelle für potentiell unerwünschte Stoffe? 5. Kulturlandschaftstag, Freising, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt), 2005-2017: Hintergrundwerte der atmosphärischen Deposition - Jahresmittelwerte 1999-2017, Stand Juli 2018, Augsburg.
- LfU, 2005-2020: Lufthygienische Berichte des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/lufthygienische_berichte.
- LGL, 2022: Internetseite des Bayerischen Landesamtes für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) zu „Futtermittel-Zusatzstoffen“, <https://www.lgl.bayern.de/tiergesundheit/futtermittel/futtermittelkunde/index.htm#zusatz>).
- 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.
- LfULG, 2008: Schwermetalle in Düngemitteln, Schriftenreihe des sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 3/2008.
- Litz, N., Wilcke, W., Wilke, B.-M., (2004-2016): Handbuch bodengefährdende Stoffe, Bewertung - Stoffdaten - Ökotoxikologie – Sanierung, Loseblattsammlung. Wiley-VCH.
- Portner, J., Roßbauer, G., Bauer, G.M.: Nährstoffaufnahme des Hopfens, <https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/artikelnachstoffaufnahme.pdf>.
- Prüess, A., 1992: Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile, mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden; Ulrich Grauer Verlag, Wendlingen.
- Prüess, A., 1994: Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile (NH₄NO₃-extrahierbare) Spurenelemente in Mineralböden. in KREYSA, G., WIESNER, J., [Hrsg.]: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium, DECHEMA e.V., Frankfurt a.M., S. 415-467.

- Scheffer, F., Schachtschabel, P. et al., 2010: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.
- Schnug, E., 2012: Uran in Phosphor-Düngemitteln und dessen Verbleib in der Umwelt, Strahlentelex Nr. 612-613.
- Schnug, E., Haneklaus N., 2014: Uranium, the hidden treasure in phosphates, *Procedia Engineering* 83, S. 265 – 269
- Strumpf, T. et al., 2011: Erhebung von Kupfergesamtgehalten in ökologisch und konventionell bewirtschafteten Böden. Teil 2: Gesamtgehalte in Böden deutscher Hopfenanbaugebiete, *Journal für Kulturpflanzen* 63(5), Themenheft Kupfer, S. 144-155
- UBA, 2005: Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden, Umweltbundesamt, UBA-texte 19/05.
- UBA, 2011: Bekanntmachung des Umweltbundesamtes - Stoffmonographie Thallium; Referenz- und Human-Biomonitoring-(HBM)-Werte für Thallium im Urin, Stellungnahme der Kommission Human-Biomonitoring des Umweltbundesamtes, *Bundesgesundheitsbl.* 2011 54, S. 516–524.
- 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.
- Wendland, M. et al., 2018: Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland (Gelbes Heft), Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).

Rechtsquellen:

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/>.

BBodSchK, 1985: Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung, Bundestagsdrucksache 10/2977 vom 7. März 1985.

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), https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv_2023/.

BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), 1998: Methoden und Maßstäbe für die Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten gemäß § 8 des Gesetzes zum Schutz des Bodens (BBodSchG) vom 17.3.1998 sowie § 4 Abs. 5 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).

DüngG, 2009: Düngegesetz, BGBl. I S. 54, 136, https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/.

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, https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/.

DüMV, 2012: 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/.

EG-KontamV, 2006: Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. Inzwischen (25.04.2023) ersetzt durch EU 2023/915.

EG-Richtlinie 2002/32/EG über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung.

FuttMV, 1981: Futtermittelverordnung, http://www.gesetze-im-internet.de/futtmv_1981/

LFGB, 2005: Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch, <https://www.gesetze-im-internet.de/lfgb/>

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.

ANHANG

Tab. 58: Statistische Parameter für Gesamtgehalte (Königswasserextrakt) der 11 im Bericht ausführlich beschriebenen Elemente im Boden, differenziert nach Nutzung, Ober(OB)- und Unterböden(UB) in mg kg^{-1} TM (PN=Jahr der Probenahme).

PN	Nutz.	STAT	Sch	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Tl	U	Zn	
1985/86	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	0,45	9,0	23,2	0,26	31,6	16,1	20,6	0,11	0,26	1,3	76	
1985/86		Mittelwert	UB	0,37	9,7	18,4	0,17	29,6	14,7	24,5	0,16	0,28	1,3	65	
1985/86		Min.	OB	0,13	2,7	9,0	0,10	11,6	5,4	3,3	0,05	0,07	0,5	28	
1985/86		Min.	UB	0,06	1,6	3,8	0,01	5,9	2,6	3,6	0,01	0,08	0,5	5	
1985/86		Max.	OB	1,52	23,9	101,0	2,33	87,4	48,5	76,5	0,31	3,49	4,7	558	
1985/86		Max.	UB	1,52	28,2	110,5	2,97	89,3	52,9	83,3	0,88	3,30	4,1	591	
1985/86		5%-Perz.	OB	0,20	4,0	12,7	0,13	14,6	6,5	7,1	0,06	0,11	0,7	34	
1985/86		5%-Perz.	UB	0,10	3,7	7,5	0,04	12,5	5,5	8,5	0,03	0,09	0,6	18	
1985/86		Median	OB	0,39	8,8	20,4	0,20	28,2	14,7	18,7	0,09	0,19	1,2	65	
1985/86		Median	UB	0,33	9,3	16,1	0,10	28,2	14,2	23,5	0,10	0,23	1,1	50	
1985/86		95%-Perz.	OB	0,77	15,9	37,0	0,44	52,9	32,2	38,2	0,18	0,41	2,6	152	
1985/86		95%-Perz.	UB	0,72	17,6	30,0	0,38	48,2	27,5	42,3	0,48	0,47	2,6	145	
1985/86		Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	0,77	10,2	37,0	0,51	46,9	19,1	28,4	0,15	0,35	1,9	123
1985/86			Min.	OB	0,23	5,1	16,7	0,17	19,9	12,6	10,3	0,09	0,14	0,9	61
1985/86	Max.		OB	1,63	23,1	57,8	0,91	135,3	29,8	99,2	0,32	0,99	2,7	201	
1985/86	5%-Perz.		OB	0,34	6,1	21,7	0,21	22,7	13,8	13,0	0,09	0,16	1,0	78	
1985/86	Median		OB	0,61	8,2	38,1	0,55	43,4	18,1	23,6	0,13	0,27	1,9	127	
1985/86	95%-Perz.		OB	1,52	19,5	51,8	0,83	84,9	26,0	75,3	0,28	0,65	2,7	179	
1985/86	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB	0,31	10,5	16,5	0,18	24,8	68,5	16,6	0,14	0,16	1,3	89	
1985/86		Mittelwert	UB	0,28	12,1	14,2	0,10	24,9	15,7	22,4	0,18	0,20	1,0	47	
1985/86		Min.	OB	0,16	8,5	11,5	0,11	12,7	28,6	7,3	0,06	0,13	1,1	71	
1985/86		Min.	UB	0,18	10,9	11,7	0,07	14,5	11,0	10,0	0,05	0,14	1,0	34	
1985/86		Max.	OB	0,38	11,9	20,5	0,23	34,5	113,6	22,1	0,27	0,21	1,5	107	
1985/86		Max.	UB	0,36	14,3	17,7	0,11	35,1	22,2	36,1	0,36	0,30	1,2	66	
1985/86		Median	OB	0,38	11,2	17,6	0,21	27,1	63,3	20,2	0,10	0,14	1,2	88	
1985/86		Median	UB	0,30	11,2	13,2	0,10	25,1	14,0	21,0	0,12	0,16	1,0	42	
1985/86	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	0,60	12,6	39,2	0,33	44,8	66,3	33,9	0,09	0,18	1,0	88	
1985/86		Mittelwert	UB	0,50	12,3	30,5	0,24	33,0	40,2	31,7	0,29	0,15	0,7	52	
1985/86	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	0,61	14,9	26,6	0,23	36,5	85,2	31,5	0,20	0,30	1,3	119	
1985/86		Mittelwert	UB	0,77	14,1	26,8	0,19	33,9	68,2	31,2	0,32	0,27	1,2	98	
1985/86		Min.	OB	0,45	10,0	12,0	0,18	27,7	28,1	27,5	0,12	0,16	0,8	98	
1985/86		Min.	UB	0,42	10,5	7,7	0,10	26,1	26,0	30,0	0,29	0,16	0,8	52	
1985/86		Max.	OB	0,80	23,6	44,7	0,29	47,3	116,8	37,2	0,26	0,52	1,6	135	
1985/86		Max.	UB	1,46	18,5	51,3	0,24	40,9	109,8	33,2	0,37	0,47	1,4	130	
1985/86		Median	OB	0,58	11,2	23,0	0,23	34,4	110,7	29,7	0,23	0,22	1,4	125	
1985/86		Median	UB	0,42	13,2	21,5	0,23	34,9	68,8	30,3	0,31	0,19	1,3	111	

PN	Nutz.	STAT	Sch	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Tl	U	Zn	
1996-99	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	0,36	9,8	24,6	0,29	35,0	17,9	23,1	0,11			67	
1996-99		Mittelwert	UB	0,31	10,3	21,2	0,21	35,8	18,2	26,5	0,07			65	
1996-99		Min.	OB	0,03	1,8	8,2	0,05	9,7	3,8	3,8	0,01			18	
1996-99		Min.	UB	0,03	1,8	6,5	0,01	9,2	2,8	2,4	0,01			18	
1996-99		Max.	OB	2,07	29,6	98,9	2,40	105,3	58,3	90,2	0,30			428	
1996-99		Max.	UB	2,16	37,1	102,5	3,69	127,3	84,0	112,2	0,26			583	
1996-99		5%-Perz.	OB	0,11	3,8	12,0	0,12	17,5	7,6	7,9	0,04			31	
1996-99		5%-Perz.	UB	0,06	2,8	8,3	0,04	15,4	6,3	9,0	0,01			22	
1996-99		Median	OB	0,32	8,5	22,6	0,21	32,6	16,6	20,7	0,08			58	
1996-99		Median	UB	0,27	8,1	19,2	0,11	33,5	16,0	24,5	0,06			53	
1996-99		95%-Perz.	OB	0,65	20,8	45,8	0,47	61,9	34,4	42,4	0,25			123	
1996-99		95%-Perz.	UB	0,61	27,8	39,9	0,43	62,5	33,5	48,1	0,16			107	
1996-99		Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	0,46	11,3	38,4	0,56	48,5	21,0	29,7	0,16			103
1996-99			Mittelwert	UB	0,54	8,6	25,7	0,28	47,8	17,6	36,6	0,11			81
1996-99	Min.		OB	0,14	3,6	14,8	0,20	18,7	13,5	10,2	0,06			67	
1996-99	Min.		UB	0,19	4,1	18,3	0,12	25,9	10,2	17,8	0,05			57	
1996-99	Max.		OB	1,07	30,7	56,2	1,11	153,9	40,4	102,3	0,49			152	
1996-99	Max.		UB	1,48	17,3	40,5	0,62	166,2	24,8	124,9	0,17			106	
1996-99	5%-Perz.		OB	0,19	4,8	21,3	0,27	26,0	14,4	15,0	0,08			70	
1996-99	5%-Perz.		UB	0,19	4,2	18,9	0,13	27,9	11,0	18,6	0,06			57	
1996-99	Median		OB	0,40	7,7	39,2	0,54	43,5	19,2	23,8	0,13			99	
1996-99	Median		UB	0,42	7,4	25,3	0,24	33,7	18,2	26,5	0,10			77	
1996-99	95%-Perz.		OB	0,80	27,5	55,4	0,99	81,3	29,1	78,1	0,28			148	
1996-99	95%-Perz.		UB	1,29	17,0	34,9	0,51	95,7	24,0	94,4	0,17			106	
1996-99	Hopfen (3 BDF)		Mittelwert	OB	0,20	9,5	15,8	0,20	25,2	80,9	16,0	0,19			74
1996-99			Mittelwert	UB	0,18	10,9	14,8	0,11	27,7	20,1	21,6	0,13			55
1996-99		Min.	OB	0,07	7,3	8,5	0,08	10,0	26,9	5,2	0,05			37	
1996-99		Min.	UB	0,06	7,9	9,0	0,08	12,6	14,5	7,4	0,07			29	
1996-99		Max.	OB	0,27	11,5	20,7	0,27	37,2	137,5	22,2	0,40			106	
1996-99		Max.	UB	0,29	13,8	19,5	0,14	45,4	25,5	36,1	0,23			77	
1996-99		Median	OB	0,26	9,7	18,2	0,24	28,2	78,4	20,6	0,14			80	
1996-99		Median	UB	0,19	10,9	15,9	0,12	25,1	20,4	21,2	0,08			59	
1996-99	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	0,49	10,7	38,8	0,32	49,9	72,4	34,9	0,11			80	
1996-99	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	0,62	14,4	30,9	0,28	38,6	111,0	33,6	0,24			120	
1996-99		Mittelwert	UB	0,73	14,7	30,3	0,24	38,4	88,8	33,4	0,20			98	
1996-99		Min.	OB	0,39	10,7	13,8	0,24	30,2	51,5	27,1	0,13			91	
1996-99		Min.	UB	0,30	11,1	11,6	0,16	31,3	39,0	29,2	0,17			64	
1996-99		Max.	OB	1,06	21,8	52,7	0,30	49,1	143,1	40,2	0,32			136	
1996-99		Max.	UB	1,52	21,2	52,9	0,30	47,8	129,9	38,0	0,22			119	
1996-99		Median	OB	0,42	10,9	26,3	0,29	36,5	138,4	33,5	0,28			132	
1996-99		Median	UB	0,36	12,0	26,3	0,25	36,1	97,7	32,9	0,20			113	

PN	Nutz.	STAT	Sch	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	TI	U	Zn	
2005/06	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	0,51	8,3	25,4	0,30	33,6	17,7	22,0	0,11	0,28	1,3	75	
2005/06		Mittelwert	UB	0,39	8,8	19,8	0,21	33,5	17,0	25,6	0,06	0,31	1,2	69	
2005/06		Min.	OB	0,10	2,5	12,6	0,09	10,2	4,9	1,7	0,04	0,08	0,6	29	
2005/06		Min.	UB	0,10	1,7	6,5	0,02	3,4	3,0	1,9	0,01	0,07	0,4	17	
2005/06		Max.	OB	1,43	22,7	92,6	2,57	99,2	56,3	87,4	0,36	3,43	4,2	502	
2005/06		Max.	UB	1,83	24,9	90,8	4,31	113,1	74,4	102,7	0,17	4,43	3,6	596	
2005/06		5%-Perz.	OB	0,10	3,3	14,1	0,15	14,2	7,7	7,5	0,06	0,12	0,7	37	
2005/06		5%-Perz.	UB	0,10	2,9	9,5	0,04	11,1	6,1	7,6	0,03	0,09	0,6	25	
2005/06		Median	OB	0,44	8,3	22,9	0,22	31,2	16,4	19,9	0,11	0,21	1,2	64	
2005/06		Median	UB	0,30	8,3	18,5	0,12	31,3	16,3	23,5	0,06	0,23	1,1	58	
2005/06		95%-Perz.	OB	1,15	15,5	40,2	0,57	58,5	31,3	40,8	0,19	0,46	2,5	134	
2005/06		95%-Perz.	UB	1,06	16,7	32,6	0,34	65,3	34,5	46,1	0,10	0,51	2,8	119	
2005/06		Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	0,93	9,9	38,0	0,56	47,6	21,3	29,6	0,22	0,37	1,9	109
2005/06			Min.	OB	0,25	4,8	21,6	0,24	15,4	14,0	8,0	0,10	0,15	0,9	61
2005/06	Max.		OB	1,89	20,6	50,1	1,03	159,4	48,4	108,2	0,48	1,00	2,8	160	
2005/06	5%-Perz.		OB	0,34	5,8	24,9	0,25	24,8	14,3	14,4	0,12	0,17	1,0	73	
2005/06	Median		OB	0,77	8,4	39,9	0,53	40,1	19,9	23,0	0,19	0,30	1,9	109	
2005/06	95%-Perz.		OB	1,82	18,6	49,3	0,99	83,0	31,7	81,8	0,35	0,70	2,6	145	
2005/06	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB	0,39	10,0	17,7	0,20	24,2	127,7	16,6	0,15	0,17	1,2	84	
2005/06		Mittelwert	UB	0,34	11,0	14,3	0,10	26,4	18,7	23,2	0,12	0,22	1,0	57	
2005/06		Min.	OB	0,16	7,2	10,8	0,12	10,1	70,6	6,3	0,05	0,14	0,8	51	
2005/06		Min.	UB	0,10	9,1	10,5	0,05	12,0	9,3	9,0	0,04	0,16	0,9	30	
2005/06		Max.	OB	0,54	12,1	22,3	0,28	36,2	183,7	23,0	0,29	0,22	1,4	111	
2005/06		Max.	UB	0,49	12,9	19,0	0,14	43,8	27,0	38,9	0,27	0,32	1,2	82	
2005/06		Median	OB	0,45	10,6	20,1	0,21	26,1	128,9	20,4	0,11	0,16	1,3	90	
2005/06		Median	UB	0,45	11,0	13,5	0,12	23,5	19,8	21,8	0,04	0,17	1,0	57	
2005/06		Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	0,80	12,8	43,2	0,35	47,6	76,0	34,2	0,12	0,20	0,9	91
2005/06	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	1,21	14,2	31,9	0,29	37,3	116,3	31,6	0,30	0,32	1,2	131	
2005/06		Mittelwert	UB	0,47	13,5	28,1	0,28	36,1	85,9	32,0	0,21	0,35	1,2	99	
2005/06		Min.	OB	0,56	9,9	14,1	0,19	28,3	57,9	27,4	0,14	0,18	0,9	95	
2005/06		Min.	UB	0,33	11,6	11,3	0,13	29,1	38,0	28,7	0,14	0,19	0,8	62	
2005/06		Max.	OB	2,44	22,8	54,8	0,35	46,7	153,4	37,6	0,39	0,56	1,5	153	
2005/06		Max.	UB	0,58	16,5	43,9	0,41	45,1	135,5	37,6	0,30	0,63	1,4	129	
2005/06		Median	OB	0,64	10,0	26,7	0,34	36,8	137,7	29,7	0,38	0,23	1,4	146	
2005/06		Median	UB	0,49	12,4	29,2	0,32	34,0	84,2	29,7	0,19	0,22	1,3	106	

PN	Nutz.	STAT	Sch	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Tl	U	Zn
2015/16	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	0,44	8,7	23,1	0,27	31,5	16,2	21,4	0,08	0,26	1,4	69
2015/16		Mittelwert	UB	0,37	9,1	18,3	0,19	33,2	15,1	24,9	0,05	0,30	1,3	62
2015/16		Min.	OB	0,12	2,6	8,8	0,09	11,9	5,4	3,4	0,03	0,07	0,6	8
2015/16		Min.	UB	0,05	1,9	4,1	0,03	4,1	2,3	2,4	0,01	0,07	0,4	4
2015/16		Max.	OB	1,66	25,2	98,9	2,23	75,9	48,8	72,4	0,25	2,94	3,6	503
2015/16		Max.	UB	1,66	32,6	108,1	3,99	81,9	57,2	82,4	0,13	3,81	3,8	572
2015/16		5%-Perz.	OB	0,18	3,8	12,9	0,13	15,0	7,1	6,4	0,04	0,11	0,6	28
2015/16		5%-Perz.	UB	0,12	3,3	7,5	0,05	15,0	5,5	9,8	0,02	0,11	0,6	13
2015/16		Median	OB	0,38	8,2	20,8	0,20	29,5	14,7	18,3	0,08	0,20	1,3	57
2015/16		Median	UB	0,34	8,6	16,6	0,11	30,7	13,8	22,5	0,04	0,25	1,2	52
2015/16		95%-Perz.	OB	0,79	15,6	34,5	0,51	55,8	31,2	42,0	0,14	0,45	2,8	132
2015/16		95%-Perz.	UB	0,73	16,4	31,7	0,33	57,3	28,4	40,9	0,11	0,48	2,9	120
2015/16	Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	0,75	9,5	35,6	0,47	41,1	18,8	27,1	0,14	0,34	1,8	102
2015/16		Mittelwert	UB	0,61	8,9	26,3	0,32	37,6	16,2	28,0	0,11	0,33	1,8	74
2015/16		Min.	OB	0,26	5,1	17,5	0,15	17,5	11,7	9,1	0,08	0,15	0,9	53
2015/16		Min.	UB	0,19	4,1	16,8	0,10	11,9	6,6	6,8	0,06	0,10	0,7	43
2015/16		Max.	OB	1,64	19,8	52,5	0,86	124,1	38,6	93,6	0,36	0,91	2,7	145
2015/16		Max.	UB	1,23	22,1	37,4	0,64	127,1	42,7	101,4	0,21	0,76	2,8	99
2015/16		5%-Perz.	OB	0,33	5,2	22,4	0,21	22,0	13,1	13,9	0,08	0,15	1,0	61
2015/16		5%-Perz.	UB	0,20	4,7	19,0	0,10	14,9	7,6	9,8	0,06	0,15	0,9	47
2015/16		Median	OB	0,58	7,9	36,8	0,48	35,5	17,2	21,6	0,12	0,29	1,7	102
2015/16		Median	UB	0,53	7,7	25,5	0,36	31,7	13,5	21,3	0,10	0,31	1,6	74
2015/16		95%-Perz.	OB	1,42	19,3	50,3	0,84	65,0	29,5	65,3	0,24	0,66	2,6	139
2015/16		95%-Perz.	UB	1,18	17,6	34,2	0,48	65,3	25,9	73,4	0,18	0,54	2,7	99
2015/16	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB	0,32	9,5	17,2	0,17	24,1	113,9	16,4	0,11	0,16	1,2	78
2015/16		Mittelwert	UB	0,45	10,8	22,4	0,12	25,7	38,2	20,8	0,10	0,21	1,1	60
2015/16		Min.	OB	0,15	8,5	9,8	0,10	13,1	63,5	7,7	0,03	0,14	1,0	43
2015/16		Min.	UB	0,12	8,3	8,6	0,06	10,3	12,7	6,2	0,03	0,14	0,9	25
2015/16		Max.	OB	0,43	10,8	21,7	0,22	32,1	167,3	20,9	0,22	0,19	1,4	112
2015/16		Max.	UB	0,84	12,9	40,3	0,19	39,7	70,9	34,7	0,22	0,34	1,2	93
2015/16		Median	OB	0,37	9,0	20,2	0,21	27,1	110,9	20,6	0,07	0,15	1,2	80
2015/16		Median	UB	0,38	11,1	18,4	0,11	27,2	31,0	21,5	0,04	0,15	1,1	63
2015/16	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	0,59	13,4	39,3	0,33	53,1	70,1	33,8	0,09	0,20	1,0	87
2015/16		Mittelwert	UB	0,64	14,2	39,0	0,31	51,5	55,7	34,5	0,08	0,20	0,9	76
2015/16	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	1,23	15,7	43,1	0,28	39,2	103,5	32,7	0,23	0,30	1,3	130
2015/16		Mittelwert	UB	1,12	16,8	38,5	0,24	43,2	92,4	35,9	0,23	0,33	1,3	100
2015/16		Min.	OB	0,50	9,4	13,3	0,19	33,9	43,7	30,0	0,11	0,21	1,0	86
2015/16		Min.	UB	0,44	10,4	9,9	0,14	40,1	32,4	31,2	0,07	0,24	1,1	57
2015/16		Max.	OB	2,55	24,3	92,7	0,41	44,6	161,7	36,1	0,30	0,46	1,5	189
2015/16		Max.	UB	2,39	24,1	81,4	0,33	47,5	150,7	39,4	0,43	0,51	1,6	141
2015/16		Median	OB	0,65	13,3	23,3	0,24	39,0	105,1	32,0	0,27	0,23	1,3	116
2015/16		Median	UB	0,54	15,8	24,3	0,25	42,0	94,1	37,1	0,17	0,26	1,3	103

Tab. 59: Statistische Parameter für Gesamtgehalte (Königswasserextrakt) der übrigen Elemente im Boden, differenziert nach Nutzung, Ober(OB)- und Unterböden(UB) [Angaben in mg kg⁻¹ TM bzw. % TM bei Al und Fe](PN: Jahr der Probenahme).

PN	Nutz.	STAT	Sch	Al	B	Ba	Be	Bi	Co	Fe	Mn	Mo	Rb	Se	Sn	Sr	V
1985/86	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	2,1	12,0	101	0,9	0,2	8,7	2,5	938	0,7	31,0	0,35	1,3	28,1	41,4
1985/86		Mittelwert	UB	2,4	13,9	103	1,1	0,2	10,6	2,6	778	0,7	35,7	0,39	1,3	40,5	37,0
1985/86		Min.	OB	0,5	1,8	31	0,2	0,1	1,4	0,5	267	0,2	8,2	0,13	0,5	5,6	15,5
1985/86		Min.	UB	0,4	2,0	29	0,2	0,0	3,8	0,5	27	0,1	8,9	0,12	0,4	4,7	8,6
1985/86		Max.	OB	4,8	77,3	456	2,1	0,4	24,1	7,0	3675	13,8	107,1	1,49	4,5	190,7	155,4
1985/86		Max.	UB	5,4	93,1	412	2,9	0,4	32,2	7,7	4687	15,0	132,3	1,68	7,1	525,6	150,7
1985/86		5%-Perz.	OB	0,7	3,0	47	0,4	0,1	3,1	0,9	399	0,3	11,7	0,16	0,7	7,6	22,4
1985/86		5%-Perz.	UB	0,9	2,5	48	0,4	0,1	4,9	1,0	211	0,2	10,8	0,18	0,6	6,0	16,1
1985/86		Median	OB	2,0	7,9	82	0,9	0,2	8,7	2,3	848	0,4	26,2	0,32	1,2	17,4	37,8
1985/86		Median	UB	2,4	8,7	88	1,1	0,2	9,9	2,5	748	0,4	33,0	0,36	1,1	17,8	35,5
1985/86		95%-Perz.	OB	3,8	36,7	189	1,8	0,3	16,4	4,2	1762	1,4	74,7	0,58	2,7	95,4	65,5
1985/86		95%-Perz.	UB	4,1	39,2	234	1,9	0,3	16,7	4,3	1360	1,7	76,9	0,62	2,4	156,4	61,9
1985/86	Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	2,5	12,7	99	1,0	0,3	10,4	2,8	1013	1,2	36,7	0,47	1,7	29,0	67,1
1985/86		Min.	OB	1,3	2,8	51	0,6	0,2	4,9	1,2	440	0,3	18,2	0,29	0,8	10,6	28,5
1985/86		Max.	OB	3,9	53,1	230	1,8	0,6	33,8	5,7	1633	3,3	70,5	0,70	2,8	73,5	138,9
1985/86		5%-Perz.	OB	1,5	4,3	56	0,6	0,2	5,8	1,6	483	0,4	19,5	0,29	1,1	11,8	30,7
1985/86		Median	OB	2,4	9,4	89	0,9	0,3	7,9	2,5	893	0,9	31,3	0,43	1,6	20,9	62,6
1985/86		95%-Perz.	OB	3,7	30,7	193	1,8	0,5	20,0	4,7	1591	3,2	64,6	0,66	2,5	63,0	110,1
1985/86	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB	1,6	8,8	67	0,7	0,2	7,1	1,9	683	0,4	20,8	0,30	1,1	28,8	35,0
1985/86		Mittelwert	UB	2,0	9,2	82	0,9	0,2	8,8	2,2	600	0,4	25,5	0,35	1,6	25,8	30,4
1985/86		Min.	OB	0,8	6,7	44	0,5	0,1	4,0	0,9	359	0,2	16,8	0,20	0,6	13,2	17,8
1985/86		Min.	UB	0,9	6,0	54	0,6	0,1	7,3	1,3	430	0,3	17,3	0,17	0,8	8,6	20,3
1985/86		Max.	OB	2,3	11,6	97	1,0	0,2	10,4	2,5	997	0,5	28,3	0,42	1,4	45,0	48,0
1985/86		Max.	UB	3,3	14,9	130	1,4	0,3	10,5	3,4	772	0,5	39,4	0,60	2,8	44,5	42,1
1985/86		Median	OB	1,8	8,0	62	0,7	0,2	7,0	2,2	692	0,4	17,2	0,27	1,3	28,2	39,4
1985/86		Median	UB	1,8	6,7	63	0,7	0,1	8,4	2,1	597	0,3	19,6	0,26	1,3	24,5	28,6
1985/86	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	1,9	10,7	83	0,7	0,2	7,8	2,5	936	0,5	26,2	0,35	2,6	87,3	54,4
1985/86		Mittelwert	UB	1,6	8,1	69	0,7	0,2	8,7	2,2	758	0,5	21,5	0,31	2,0	132,1	35,1
1985/86	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	2,7	38,2	196	1,3	0,2	10,4	3,5	718	0,6	50,9	0,31	4,4	94,3	41,3
1985/86		Mittelwert	UB	2,6	37,3	179	1,2	0,2	12,7	2,9	635	0,7	47,6	0,31	5,8	103,2	36,8
1985/86		Min.	OB	1,4	8,9	163	0,8	0,2	7,8	2,0	455	0,4	25,2	0,27	0,8	21,9	30,8
1985/86		Min.	UB	1,2	6,9	124	0,6	0,1	9,0	2,2	461	0,3	23,1	0,22	0,6	21,0	29,6
1985/86		Max.	OB	4,8	85,9	253	2,2	0,3	12,7	4,6	1076	0,7	100,8	0,36	9,9	168,8	49,7
1985/86		Max.	UB	4,5	86,6	245	2,0	0,3	18,7	3,8	825	1,0	90,6	0,39	14,6	192,3	43,9
1985/86		Median	OB	1,8	19,9	173	0,9	0,2	10,5	4,0	624	0,7	26,7	0,30	2,3	92,3	43,4
1985/86		Median	UB	2,0	18,5	167	0,9	0,2	10,4	2,8	619	0,8	29,0	0,33	2,3	96,3	37,0

PN	Nutz.	STAT	Sch	Al	B	Ba	Be	Bi	Co	Fe	Mn	Mo	Rb	Se	Sn	Sr	V	
1996-99	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	2,2	19,0	97			10,0	2,4	880			0,17				
1996-99		Mittelwert	UB	2,5	19,6	98			10,8	2,7	751			0,16				
1996-99		Min.	OB	0,3	1,2	19			1,4	0,3	129			0,05				
1996-99		Min.	UB	0,3	0,9	21			1,8	0,3	69			0,03				
1996-99		Max.	OB	5,4	193,5	392			28,2	7,1	4329			0,83				
1996-99		Max.	UB	5,6	193,1	326			29,9	6,8	4710			1,68				
1996-99		5%-Perz.	OB	0,7	2,1	41			3,5	0,8	455			0,06				
1996-99		5%-Perz.	UB	0,9	2,5	43			3,6	1,0	198			0,05				
1996-99		Median	OB	2,0	11,7	80			9,5	2,4	787			0,14				
1996-99		Median	UB	2,4	13,1	80			10,1	2,8	692			0,13				
1996-99		95%-Perz.	OB	3,8	64,0	192			18,7	4,2	1602			0,29				
1996-99		95%-Perz.	UB	4,2	56,1	211			20,6	4,2	1404			0,30				
1996-99		Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	2,8	28,8	94			11,7	2,9	976			0,29			
1996-99			Mittelwert	UB	3,0	10,0	98			14,5	3,3	970			0,24			
1996-99	Min.		OB	1,5	4,4	43			4,5	1,5	453			0,08				
1996-99	Min.		UB	2,0	1,1	47			7,6	2,1	270			0,11				
1996-99	Max.		OB	4,3	126,8	194			41,3	5,6	1588			0,48				
1996-99	Max.		UB	4,3	52,6	202			49,3	6,5	1472			0,40				
1996-99	5%-Perz.		OB	2,0	9,2	53			5,9	1,8	460			0,13				
1996-99	5%-Perz.		UB	2,1	1,8	54			7,7	2,2	343			0,12				
1996-99	Median		OB	2,7	14,6	84			9,4	2,6	951			0,29				
1996-99	Median		UB	2,9	4,8	90			10,3	2,7	1078			0,23				
1996-99	95%-Perz.	OB	3,9	114,2	178			24,1	4,6	1535			0,42					
1996-99	95%-Perz.	UB	4,1	31,4	170			30,9	5,6	1456			0,39					
1996-99	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB	1,7	14,8	62			6,9	2,0	565			0,08				
1996-99		Mittelwert	UB	2,1	15,8	62			8,3	2,4	529			0,08				
1996-99		Min.	OB	0,6	9,5	34			2,4	0,7	231			0,05				
1996-99		Min.	UB	0,7	9,6	59			4,4	0,8	277			0,06				
1996-99		Max.	OB	2,5	19,5	91			10,9	2,8	870			0,10				
1996-99		Max.	UB	3,6	21,7	64			11,6	3,7	723			0,10				
1996-99		Median	OB	1,9	15,5	60			7,3	2,5	593			0,08				
1996-99		Median	UB	2,1	16,0	63			8,8	2,6	587			0,08				
1996-99	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	1,9	13,0	74			8,3	2,5	881			0,19				
1996-99	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	2,8	42,7	182			11,3	3,5	680			0,15				
1996-99		Mittelwert	UB	2,8	42,3	191			11,5	3,5	621			0,14				
1996-99		Min.	OB	1,4	12,3	149			7,3	2,3	438			0,13				
1996-99		Min.	UB	1,5	11,7	153			8,4	2,4	446			0,08				
1996-99		Max.	OB	4,7	86,2	233			14,5	4,1	1011			0,16				
1996-99		Max.	UB	4,6	83,8	259			14,2	4,0	819			0,17				
1996-99		Median	OB	2,3	29,6	163			12,1	4,0	592			0,15				
1996-99		Median	UB	2,4	31,5	159			11,9	4,0	598			0,17				

PN	Nutz.	STAT	Sch	Al	B	Ba	Be	Bi	Co	Fe	Mn	Mo	Rb	Se	Sn	Sr	V	
2005/06	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB		23,7	102			10,6	2,4	990	0,5		0,17				
2005/06		Mittelwert	UB		24,3	103			11,4	2,7	783	0,5		0,16				
2005/06		Min.	OB		7,9	29			1,9	0,5	240	0,3		0,10				
2005/06		Min.	UB		9,3	20			1,1	0,4	56	0,3		0,10				
2005/06		Max.	OB		87,8	408			28,6	7,1	3815	10,6		0,95				
2005/06		Max.	UB		99,6	386			31,7	7,6	4146	14,9		1,57				
2005/06		5%-Perz.	OB		12,3	45			4,1	0,9	468	0,3		0,10				
2005/06		5%-Perz.	UB		10,4	41			3,7	1,0	199	0,3		0,10				
2005/06		Median	OB		20,4	83			10,3	2,2	927	0,3		0,10				
2005/06		Median	UB		19,1	84			11,5	2,7	742	0,3		0,10				
2005/06		95%-Perz.	OB		48,6	197			18,4	4,5	1715	1,2		0,39				
2005/06		95%-Perz.	UB		52,9	266			19,6	4,7	1510	1,2		0,29				
2005/06		Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB		23,9	97			11,9	2,7	986	1,0		0,30			
2005/06			Min.	OB		11,1	49			4,9	1,2	452	0,3		0,10			
2005/06	Max.		OB		67,6	222			42,3	6,3	1630	2,6		1,10				
2005/06	5%-Perz.		OB		14,4	60			6,4	1,7	519	0,3		0,10				
2005/06	Median		OB		20,1	84			8,7	2,1	944	0,7		0,26				
2005/06	95%-Perz.		OB		42,4	197			22,4	4,7	1580	2,4		0,57				
2005/06	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB		19,5	63			8,2	1,9	672	0,3		0,10				
2005/06		Mittelwert	UB		20,8	87			9,4	2,2	566	0,3		0,10				
2005/06		Min.	OB		14,5	42			4,2	0,9	347	0,3		0,10				
2005/06		Min.	UB		13,9	63			5,7	1,2	337	0,3		0,10				
2005/06		Max.	OB		22,0	88			11,9	2,5	990	0,3		0,10				
2005/06		Max.	UB		30,5	134			12,8	3,3	736	0,3		0,10				
2005/06		Median	OB		21,9	61			8,5	2,1	680	0,3		0,10				
2005/06		Median	UB		18,0	65			9,7	2,2	625	0,3		0,10				
2005/06	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB		17,3	84			9,0	2,3	976	0,3		0,33				
2005/06	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB		49,8	200			11,9	3,3	732	0,3		0,21				
2005/06		Mittelwert	UB		49,1	211			12,0	3,4	705	0,5		0,11				
2005/06		Min.	OB		20,9	156			8,7	2,0	499	0,3		0,10				
2005/06		Min.	UB		20,6	145			9,2	2,0	499	0,3		0,10				
2005/06		Max.	OB		95,0	281			14,7	4,4	1021	0,4		0,30				
2005/06		Max.	UB		96,9	334			14,1	4,3	955	0,7		0,13				
2005/06		Median	OB		33,6	161			12,3	3,5	677	0,3		0,23				
2005/06		Median	UB		29,8	153			12,7	3,7	659	0,5		0,10				

PN	Nutz.	STAT	Sch	Al	B	Ba	Be	Bi	Co	Fe	Mn	Mo	Rb	Se	Sn	Sr	V	
2015/16	Acker (80 BDF)	Mittelwert	OB	2,1	13,5	105	0,9	0,2	8,8	2,2	915	0,7	32,8	0,43	1,7	27,3	41,7	
2015/16		Mittelwert	UB	2,5	15,2	108	1,1	0,2	9,2	2,4	744	0,8	36,2	0,42	1,4	39,1	39,6	
2015/16		Min.	OB	0,5	2,7	35	0,2	0,1	1,4	0,4	220	0,2	8,0	0,13	0,7	6,6	17,9	
2015/16		Min.	UB	0,4	1,5	27	0,2	0,0	0,7	0,3	93	0,1	6,7	0,11	0,3	3,3	6,1	
2015/16		Max.	OB	4,9	87,2	361	2,0	0,4	26,6	6,0	4068	12,1	96,6	1,31	10,2	145,2	139,8	
2015/16		Max.	UB	5,1	84,6	361	2,5	0,4	26,4	6,3	4248	18,4	105,2	1,69	10,5	850,9	177,8	
2015/16		5%-Perz.	OB	0,9	4,0	48	0,4	0,1	3,1	0,8	423	0,2	12,7	0,19	0,8	7,8	22,1	
2015/16		5%-Perz.	UB	1,0	4,0	54	0,4	0,1	2,9	0,8	226	0,2	11,4	0,16	0,6	7,5	16,4	
2015/16		Median	OB	1,9	9,2	90	0,9	0,2	8,1	2,0	845	0,4	27,8	0,40	1,4	17,4	38,6	
2015/16		Median	UB	2,5	10,7	95	1,1	0,2	9,1	2,5	690	0,4	34,2	0,37	1,3	18,1	36,4	
2015/16		95%-Perz.	OB	3,8	41,0	196	1,7	0,3	16,0	3,6	1706	1,5	64,5	0,72	3,7	97,5	64,7	
2015/16		95%-Perz.	UB	4,1	44,6	201	1,9	0,3	16,9	3,9	1313	1,6	62,5	0,71	2,0	118,1	61,0	
2015/16		Grünland (18 BDF)	Mittelwert	OB	2,7	14,6	97	1,0	0,3	9,8	2,6	963	1,2	36,6	0,55	1,7	24,4	57,9
2015/16			Mittelwert	UB	2,8	14,0	95	1,1	0,2	10,5	2,6	929	1,0	36,4	0,49	1,5	30,4	49,9
2015/16	Min.		OB	1,4	4,9	49	0,6	0,2	4,4	1,2	456	0,3	19,1	0,30	0,9	11,0	26,8	
2015/16	Min.		UB	1,0	4,4	33	0,5	0,1	3,2	0,8	283	0,3	15,5	0,24	0,8	8,3	17,7	
2015/16	Max.		OB	4,3	53,7	205	1,7	0,5	31,6	5,8	1588	3,4	67,9	0,82	2,8	56,9	113,8	
2015/16	Max.		UB	5,0	48,4	217	1,9	0,4	33,4	5,9	1792	2,9	73,7	0,84	2,5	70,8	109,7	
2015/16	5%-Perz.		OB	1,8	5,6	60	0,6	0,2	5,9	1,7	530	0,4	19,2	0,39	1,2	11,6	28,7	
2015/16	5%-Perz.		UB	1,5	5,9	35	0,6	0,1	3,6	1,2	368	0,3	20,1	0,29	0,9	11,9	27,1	
2015/16	Median		OB	2,6	10,9	84	0,9	0,3	7,4	2,2	941	0,8	31,3	0,54	1,7	19,3	55,9	
2015/16	Median		UB	2,6	11,5	84	1,0	0,2	8,1	2,3	917	0,7	35,4	0,46	1,5	17,7	47,4	
2015/16	95%-Perz.		OB	4,2	33,3	193	1,7	0,4	19,9	4,1	1469	3,0	66,5	0,78	2,7	46,0	89,2	
2015/16	95%-Perz.	UB	4,6	26,6	173	1,6	0,4	26,3	4,9	1602	2,6	65,7	0,74	2,3	65,3	79,6		
2015/16	Hopfen (3 BDF)	Mittelwert	OB	1,6	9,2	72	0,6	0,1	6,7	1,9	630	0,4	20,6	0,33	1,4	20,9	33,8	
2015/16		Mittelwert	UB	2,2	11,6	91	0,8	0,2	6,9	2,2	551	0,4	26,0	0,33	1,3	25,8	33,4	
2015/16		Min.	OB	0,7	6,1	47	0,4	0,1	3,8	0,9	303	0,3	18,2	0,17	0,6	9,2	16,5	
2015/16		Min.	UB	0,7	5,9	45	0,4	0,1	3,4	0,7	282	0,2	16,3	0,13	0,5	8,5	15,2	
2015/16		Max.	OB	2,1	10,8	96	0,8	0,2	9,4	2,5	929	0,5	25,5	0,45	2,0	35,0	46,8	
2015/16		Max.	UB	3,9	19,1	152	1,4	0,3	10,3	3,7	731	0,6	42,5	0,52	1,7	42,6	49,0	
2015/16		Median	OB	1,9	10,6	73	0,6	0,2	6,9	2,3	657	0,4	18,3	0,36	1,7	18,7	38,1	
2015/16		Median	UB	1,9	9,7	75	0,7	0,2	7,0	2,3	639	0,5	19,2	0,35	1,6	26,4	35,9	
2015/16	Obst (1 BDF)	Mittelwert	OB	1,9	10,8	81	0,8	0,3	8,1	2,2	948	0,5	29,3	0,37	2,9	86,0	58,3	
2015/16		Mittelwert	UB	1,9	9,7	85	0,8	0,3	8,2	2,3	905	0,5	30,5	0,36	3,5	110,8	55,5	
2015/16	Wein (3 BDF)	Mittelwert	OB	2,6	39,1	211	1,2	0,3	10,7	3,0	673	0,8	47,3	0,49	12,3	97,7	43,5	
2015/16		Mittelwert	UB	2,8	43,3	224	1,3	0,2	11,6	3,2	675	0,7	54,0	0,49	6,0	100,7	46,5	
2015/16		Min.	OB	1,5	10,0	165	0,7	0,2	9,3	2,0	490	0,5	26,5	0,37	1,2	19,4	36,9	
2015/16		Min.	UB	1,6	11,4	182	0,8	0,1	10,2	2,0	488	0,3	30,6	0,39	0,8	16,6	43,9	
2015/16		Max.	OB	4,4	84,9	263	1,8	0,3	12,6	3,6	904	1,1	80,4	0,56	33,2	197,9	47,6	
2015/16		Max.	UB	4,8	93,1	301	1,9	0,3	13,5	3,7	914	1,1	89,4	0,56	14,5	206,3	50,4	
2015/16		Median	OB	1,9	22,4	204	1,1	0,3	10,4	3,5	624	0,7	34,9	0,53	2,5	75,6	46,0	
2015/16		Median	UB	2,0	25,5	189	1,3	0,3	11,0	3,7	624	0,8	42,0	0,52	2,5	79,2	45,2	

Tab. 60: Entwicklung der Gehalte ausgewählter Elemente in Oberböden der Acker-BDF mit Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$ in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ - Abnahmen grün, Zunahmen rot.

Element	BDF	Mittelw.	Initialw.	Diff.	Trend	p-Wert	r ²	von	bis
Sb	9	0,635	0,714	-0,146	-0,0044	5,723E-05	0,70	1987	2016
Sb	10	0,555	0,639	-0,154	-0,0041	3,603E-03	0,47	1986	2016
Sb	95	0,417	0,434	-0,023	-0,0008	4,668E-02	0,34	1986	2016
Sb	100	0,449	0,391	0,077	0,0029	1,658E-02	0,37	1988	2016
Sb	110	0,412	0,386	0,068	0,0032	3,806E-03	0,46	1987	2015
As	51	19,727	20,925	-3,800	-0,1986	6,001E-05	0,38	1987	2016
As	103	10,186	13,660	-5,325	-0,1751	2,469E-05	0,73	1986	2015
As	33	5,428	7,825	-3,064	-0,0996	3,707E-03	0,46	1987	2015
As	9	9,634	10,179	-2,339	-0,0732	1,934E-02	0,33	1987	2016
As	20	8,517	9,658	-1,904	-0,0577	2,832E-05	0,73	1986	2015
As	77	8,958	9,279	-1,022	-0,0479	2,743E-02	0,30	1988	2016
As	39	8,577	9,329	-1,372	-0,0412	3,850E-04	0,61	1986	2015
As	105	6,355	6,584	-0,833	-0,0322	4,879E-03	0,44	1988	2015
As	46	4,552	5,097	-0,695	-0,0235	6,215E-03	0,42	1986	2015
As	78	6,343	6,707	-0,422	-0,0164	1,465E-02	0,36	1986	2015
As	100	4,374	4,137	0,974	0,0338	2,517E-03	0,52	1988	2016
As	63	14,260	12,918	1,558	0,0580	1,016E-02	0,39	1986	2016
As	86	12,703	12,670	1,525	0,0615	1,945E-02	0,33	1987	2016
As	76	11,386	10,843	2,260	0,0666	5,711E-03	0,43	1986	2016
As	115	11,585	11,410	1,923	0,0781	1,079E-02	0,38	1987	2015
Pb	51	88,769	101,045	-15,618	-0,6793	1,942E-05	0,42	1987	2016
Pb	56	21,847	25,010	-7,110	-0,1968	4,092E-03	0,46	1986	2015
Pb	103	24,544	25,448	-4,345	-0,1319	7,002E-03	0,42	1986	2015
Pb	20	22,660	23,103	-2,853	-0,1013	4,294E-03	0,45	1986	2015
Pb	87	18,734	19,558	-2,560	-0,0951	6,007E-03	0,43	1986	2016
Pb	115	19,252	17,198	3,478	0,1068	2,142E-03	0,50	1987	2015
Pb	49	21,939	17,158	5,928	0,1786	1,792E-02	0,34	1987	2016
Cd	46	0,229	0,248	-0,041	-0,0019	5,867E-04	0,58	1986	2015
Cd	10	0,178	0,204	-0,043	-0,0018	1,072E-03	0,55	1986	2016
Cd	58	0,163	0,192	-0,046	-0,0014	1,433E-03	0,53	1987	2016
Cd	107	0,128	0,152	-0,051	-0,0013	2,611E-02	0,31	1986	2015
Cd	95	0,150	0,161	-0,018	-0,0006	4,595E-03	0,57	1986	2016
Cd	114	0,216	0,199	0,024	0,0009	2,264E-02	0,32	1988	2015
Cd	115	0,132	0,109	0,032	0,0012	2,101E-02	0,33	1987	2015
Cd	49	0,181	0,158	0,041	0,0013	1,999E-05	0,74	1987	2016
Cd	111	0,198	0,173	0,037	0,0015	1,023E-02	0,39	1986	2016
Cd	110	0,235	0,205	0,042	0,0016	1,160E-03	0,54	1987	2015
Cd	73	0,334	0,287	0,074	0,0023	1,231E-04	0,66	1986	2016
Cd	72	0,472	0,407	0,095	0,0043	1,012E-02	0,39	1988	2016
Cr	46	71,306	82,108	-25,088	-0,8110	7,162E-07	0,84	1986	2015
Cr	56	38,484	42,615	-9,087	-0,3310	7,143E-05	0,69	1986	2015
Cr	103	37,499	39,758	-7,240	-0,2628	1,751E-03	0,51	1986	2015
Cr	20	28,080	30,255	-5,105	-0,2003	1,310E-05	0,75	1986	2015
Cr	33	19,580	22,518	-5,068	-0,1654	4,189E-03	0,45	1987	2015
Cr	87	13,009	14,613	-2,698	-0,1310	4,530E-03	0,45	1986	2016
Cr	39	31,846	32,490	-3,785	-0,1246	4,553E-03	0,45	1986	2015
Cr	107	23,827	24,843	-2,760	-0,1235	4,283E-03	0,45	1986	2015
Cr	18	31,811	32,944	-1,972	-0,1141	2,136E-03	0,67	1998	2015
Cr	5	21,613	23,295	-2,895	-0,1018	1,645E-02	0,35	1986	2015
Cr	49	13,807	12,828	2,245	0,0582	7,927E-03	0,41	1987	2016
Cr	124	20,794	19,488	2,535	0,0819	6,444E-04	0,58	1987	2015
Cr	131	33,284	31,085	3,568	0,0984	2,761E-02	0,30	1986	2015
Cr	19	37,171	34,430	2,878	0,1034	2,342E-02	0,32	1986	2015
Cr	94	32,997	30,983	4,561	0,1324	9,504E-03	0,42	1986	2015
Cr	32	27,508	24,645	2,928	0,1484	2,459E-07	0,55	1986	2016
Cr	119	28,944	25,433	6,205	0,1897	1,644E-04	0,65	1986	2015
Cr	86	49,305	45,690	5,750	0,1918	8,948E-05	0,68	1987	2016
Cr	118	27,398	24,648	7,010	0,2012	8,371E-04	0,56	1987	2015
Cr	110	40,258	34,620	8,100	0,2227	1,489E-02	0,35	1987	2015
Cr	115	44,691	39,928	8,445	0,2805	4,310E-07	0,85	1987	2015
Cr	112	42,471	36,463	8,968	0,2846	3,233E-03	0,50	1988	2015
Cr	125	52,555	44,285	11,483	0,3196	5,028E-03	0,44	1987	2015
Cr	106	39,960	33,765	13,793	0,3885	2,698E-04	0,62	1987	2016
Cu	46	29,037	31,695	-5,750	-0,1737	8,362E-05	0,68	1986	2015
Cu	56	16,931	19,925	-4,390	-0,1203	1,027E-02	0,39	1986	2015
Cu	87	8,032	8,737	-1,622	-0,0588	1,239E-03	0,54	1986	2016
Cu	100	6,591	6,082	0,825	0,0383	2,740E-03	0,51	1988	2016
Cu	49	7,398	6,464	1,255	0,0401	9,036E-03	0,40	1987	2016
Cu	95	8,466	7,734	1,227	0,0420	6,650E-03	0,54	1986	2016
Cu	45	10,892	10,362	1,336	0,0478	1,689E-03	0,52	1986	2016
Cu	57	13,753	12,108	1,600	0,0569	2,018E-02	0,33	1987	2016
Cu	74	11,493	10,923	1,735	0,0691	1,279E-03	0,54	1988	2016
Cu	73	14,090	12,070	2,565	0,0698	2,572E-02	0,31	1986	2016
Cu	75	12,093	10,593	2,224	0,0791	1,033E-03	0,61	1986	2016

Element	BDF	Mittelw.	Initialw.	Diff.	Trend	p-Wert	r ²	von	bis
Ni	46	32,196	36,530	-6,915	-0,2434	4,786E-04	0,59	1986	2015
Ni	33	12,638	15,130	-4,108	-0,1294	2,139E-02	0,32	1987	2015
Ni	78	16,757	17,398	-2,320	-0,1048	1,017E-02	0,39	1986	2015
Ni	107	17,123	17,640	-2,568	-0,0981	3,496E-03	0,47	1986	2015
Ni	20	16,762	17,615	-2,263	-0,0966	6,567E-04	0,58	1986	2015
Ni	30	16,955	17,705	-1,780	-0,0727	2,359E-02	0,34	1987	2015
Ni	87	7,009	7,260	-0,823	-0,0480	2,645E-02	0,31	1986	2016
Ni	95	12,198	11,330	1,585	0,0526	1,278E-05	0,86	1986	2016
Ni	49	10,610	9,367	2,049	0,0626	2,155E-04	0,64	1987	2016
Ni	75	9,607	8,159	2,318	0,0747	6,257E-04	0,64	1986	2016
Ni	40	27,283	25,455	2,425	0,0824	6,114E-03	0,43	1987	2016
Ni	32	18,456	15,638	2,260	0,0947	5,948E-05	0,38	1986	2016
Ni	94	17,844	15,940	3,433	0,0982	2,619E-03	0,51	1986	2015
Ni	77	23,794	20,860	3,583	0,1190	1,214E-02	0,37	1988	2016
Ni	84	31,000	28,638	4,380	0,1303	2,142E-03	0,50	1988	2016
Ni	86	41,060	38,148	3,760	0,1332	9,209E-03	0,39	1987	2016
Ni	57	15,433	12,273	2,868	0,1382	1,847E-02	0,34	1987	2016
Ni	74	16,944	14,528	4,260	0,1437	4,018E-03	0,46	1988	2016
Ni	67	40,786	38,048	5,245	0,1533	2,102E-02	0,33	1988	2016
Ni	115	30,736	26,968	5,350	0,1662	1,169E-02	0,37	1987	2015
Ni	68	48,544	44,585	7,833	0,2244	7,235E-05	0,69	1987	2016
Ni	76	28,922	26,245	8,328	0,3079	1,432E-02	0,36	1986	2016
Hg	9	0,112	0,193	-0,120	-0,0037	1,972E-04	0,64	1987	2016
Hg	74	0,186	0,183	-0,050	-0,0025	1,637E-02	0,35	1988	2016
Hg	56	0,094	0,133	-0,076	-0,0020	4,184E-03	0,45	1986	2015
Hg	81	0,116	0,123	-0,047	-0,0016	1,080E-02	0,38	1986	2016
Hg	95	0,111	0,128	-0,045	-0,0013	2,135E-03	0,63	1986	2016
Hg	87	0,083	0,100	-0,043	-0,0011	2,204E-03	0,50	1986	2016
Hg	51	0,111	0,138	-0,031	-0,0011	2,236E-05	0,42	1987	2016
Hg	50	0,109	0,114	-0,030	-0,0010	1,350E-02	0,36	1986	2016
Hg	120	0,092	0,115	-0,035	-0,0010	1,398E-02	0,36	1988	2016
Hg	46	0,081	0,099	-0,033	-0,0009	3,569E-03	0,47	1986	2015
Hg	80	0,069	0,089	-0,033	-0,0008	1,236E-02	0,37	1986	2016
Hg	73	0,079	0,088	-0,021	-0,0006	2,118E-02	0,32	1986	2016
Tl	51	3,107	3,495	-0,559	-0,0213	1,146E-03	0,30	1987	2016
Tl	46	0,557	0,604	-0,081	-0,0028	8,704E-03	0,51	1986	2015
Tl	56	0,302	0,345	-0,072	-0,0025	1,198E-04	0,79	1986	2015
Tl	18	0,249	0,259	-0,020	-0,0022	7,113E-03	0,73	2006	2015
Tl	78	0,281	0,302	-0,046	-0,0014	5,620E-02	0,32	1986	2015
Tl	20	0,242	0,252	-0,033	-0,0009	4,333E-02	0,35	1986	2015
Tl	33	0,124	0,137	-0,025	-0,0009	9,098E-03	0,51	1987	2015
Tl	107	0,147	0,154	-0,021	-0,0006	1,519E-02	0,46	1986	2015
Tl	4	0,147	0,141	0,013	0,0005	6,564E-03	0,54	1988	2015
Tl	124	0,123	0,117	0,015	0,0005	9,334E-03	0,51	1987	2015
Tl	123	0,131	0,125	0,015	0,0005	1,771E-02	0,45	1987	2015
Tl	117	0,129	0,121	0,016	0,0005	1,936E-03	0,63	1986	2016
Tl	72	0,140	0,133	0,016	0,0005	1,601E-02	0,46	1988	2016
Tl	39	0,194	0,186	0,017	0,0005	4,025E-02	0,36	1986	2015
Tl	95	0,181	0,170	0,020	0,0007	2,534E-03	0,61	1986	2016
Tl	100	0,158	0,145	0,018	0,0007	6,540E-03	0,58	1988	2016
Tl	119	0,174	0,163	0,028	0,0009	2,218E-02	0,42	1986	2015
Tl	40	0,193	0,180	0,027	0,0009	3,622E-03	0,59	1987	2016
Tl	131	0,170	0,155	0,029	0,0009	5,073E-03	0,56	1986	2015
Tl	73	0,199	0,184	0,034	0,0011	4,362E-03	0,57	1986	2016
Tl	125	0,251	0,233	0,028	0,0011	3,864E-03	0,58	1987	2015
Tl	75	0,140	0,122	0,032	0,0011	1,438E-02	0,50	1986	2016
Tl	118	0,174	0,160	0,037	0,0011	1,863E-03	0,64	1987	2015
Tl	32	0,195	0,165	0,026	0,0012	5,930E-06	0,50	1986	2016
Tl	111	0,275	0,257	0,041	0,0013	1,788E-03	0,64	1986	2016
Tl	74	0,340	0,317	0,038	0,0014	8,493E-03	0,52	1988	2016
Tl	115	0,241	0,227	0,046	0,0014	1,213E-02	0,48	1987	2015
Tl	49	0,249	0,219	0,034	0,0015	1,178E-02	0,49	1987	2016
Tl	112	0,260	0,241	0,043	0,0015	1,536E-03	0,65	1988	2015
Tl	94	0,200	0,178	0,045	0,0015	1,544E-05	0,89	1986	2015
Tl	106	0,210	0,190	0,047	0,0015	5,365E-04	0,71	1987	2016
Tl	38	0,227	0,201	0,045	0,0016	6,427E-05	0,81	1987	2016
Tl	84	0,433	0,401	0,043	0,0017	3,093E-02	0,39	1988	2016
Tl	110	0,255	0,231	0,057	0,0018	3,734E-03	0,59	1987	2015
Tl	68	0,377	0,353	0,060	0,0019	9,570E-04	0,68	1987	2016
Tl	67	0,374	0,347	0,066	0,0022	4,737E-04	0,72	1988	2016
Tl	19	0,226	0,197	0,071	0,0022	5,647E-03	0,55	1986	2015
Tl	57	0,382	0,331	0,047	0,0022	3,434E-02	0,37	1987	2016
Tl	76	0,261	0,222	0,089	0,0027	9,678E-04	0,68	1986	2016

Element	BDF	Mittelw.	Initialw.	Diff.	Trend	p-Wert	r ²	von	bis
U	51	3,777	4,733	-1,106	-0,0453	1,425E-05	0,47	1987	2016
U	56	3,277	3,869	-0,813	-0,0317	5,932E-04	0,71	1986	2015
U	58	1,844	1,945	-0,252	-0,0077	3,953E-02	0,36	1987	2016
U	39	1,351	1,467	-0,155	-0,0060	2,395E-02	0,41	1986	2015
U	33	0,869	0,953	-0,156	-0,0055	3,346E-02	0,38	1987	2015
U	9	1,343	1,401	-0,138	-0,0044	1,239E-03	0,66	1987	2016
U	50	1,515	1,568	-0,155	-0,0043	1,576E-02	0,46	1986	2016
U	10	1,212	1,251	-0,108	-0,0032	2,491E-02	0,41	1986	2016
U	45	0,873	0,936	-0,076	-0,0030	3,179E-02	0,38	1986	2016
U	107	0,641	0,673	-0,062	-0,0020	3,579E-03	0,59	1986	2015
U	125	1,303	1,263	0,073	0,0026	3,783E-02	0,36	1987	2015
U	49	1,105	1,057	0,073	0,0027	2,639E-02	0,40	1987	2016
U	120	0,847	0,800	0,100	0,0034	6,367E-02	0,30	1988	2016
U	131	1,188	1,125	0,121	0,0040	4,407E-03	0,57	1986	2015
U	112	0,913	0,881	0,136	0,0043	4,471E-02	0,34	1988	2015
U	22	1,114	1,043	0,124	0,0043	1,552E-04	0,78	1986	2015
U	38	1,282	1,225	0,143	0,0046	5,805E-02	0,31	1987	2016
U	68	1,171	1,112	0,147	0,0046	4,483E-03	0,57	1987	2016
U	123	0,992	0,922	0,155	0,0051	2,325E-03	0,62	1987	2015
U	93	1,198	1,135	0,167	0,0055	7,955E-03	0,52	1988	2015
U	100	1,025	0,945	0,169	0,0058	1,515E-03	0,69	1988	2016
U	32	1,460	1,330	0,105	0,0065	8,588E-04	0,31	1986	2016
U	75	1,679	1,589	0,214	0,0066	4,065E-04	0,77	1986	2016
U	106	0,778	0,675	0,194	0,0066	1,379E-05	0,86	1987	2016
U	118	1,122	1,037	0,220	0,0069	2,915E-03	0,60	1987	2015
U	115	0,892	0,808	0,227	0,0073	1,242E-03	0,66	1987	2015
U	73	1,361	1,257	0,245	0,0075	2,277E-03	0,62	1986	2016
U	74	2,733	2,609	0,224	0,0080	1,169E-04	0,79	1988	2016
U	57	1,749	1,571	0,214	0,0088	4,404E-03	0,57	1987	2016
U	72	1,108	0,983	0,263	0,0090	1,651E-05	0,86	1988	2016
U	19	1,115	0,971	0,316	0,0103	2,746E-03	0,61	1986	2015
U	110	1,229	1,084	0,342	0,0111	3,683E-03	0,59	1987	2015
U	18	1,310	1,260	0,100	0,0111	1,005E-03	0,86	2006	2015
U	31	1,920	1,680	0,460	0,0150	3,167E-02	0,38	1986	2016
Zn	107	35,930	65,160	-50,638	-1,5758	7,750E-05	0,68	1986	2015
Zn	46	114,956	147,400	-47,043	-1,4203	4,482E-04	0,60	1986	2015
Zn	104	69,232	84,998	-33,788	-1,1250	2,404E-05	0,73	1988	2015
Zn	105	61,627	76,940	-30,140	-0,9446	5,532E-06	0,78	1988	2015
Zn	56	77,026	96,705	-27,655	-0,9125	1,789E-04	0,65	1986	2015
Zn	84	103,279	119,025	-31,198	-0,8933	2,127E-03	0,50	1988	2016
Zn	53	57,939	70,280	-24,428	-0,8234	7,942E-03	0,41	1988	2016
Zn	98	25,620	33,293	-25,766	-0,8166	1,035E-04	0,67	1986	2015
Zn	22	62,920	68,908	-17,205	-0,6215	7,619E-06	0,77	1986	2015
Zn	20	56,405	65,333	-18,880	-0,6116	9,511E-07	0,83	1986	2015
Zn	103	45,277	54,595	-19,663	-0,5642	3,307E-04	0,61	1986	2015
Zn	5	40,768	48,650	-17,065	-0,5528	5,741E-07	0,84	1986	2015
Zn	33	38,251	49,105	-16,468	-0,4761	2,359E-02	0,32	1987	2015
Zn	87	43,559	50,290	-14,690	-0,4593	2,376E-05	0,73	1986	2016
Zn	106	38,553	43,228	-14,463	-0,4517	9,850E-05	0,67	1987	2016
Zn	26	48,773	55,630	-17,593	-0,4508	1,827E-02	0,34	1987	2016
Zn	34	65,354	68,093	-12,963	-0,3882	6,927E-03	0,42	1988	2016
Zn	63	68,564	68,090	-10,020	-0,3551	2,507E-02	0,31	1986	2016
Zn	119	54,779	58,428	-12,020	-0,3332	3,663E-03	0,46	1986	2015
Zn	4	59,878	57,573	3,450	0,1823	1,026E-02	0,39	1988	2015
Zn	125	67,241	66,813	6,367	0,2606	1,582E-02	0,35	1987	2015
Zn	49	46,875	45,288	6,415	0,3164	5,495E-03	0,43	1987	2016
Zn	40	81,555	78,765	8,285	0,3179	2,485E-03	0,49	1987	2016
Zn	29	66,670	60,573	8,705	0,3181	1,584E-04	0,65	1986	2015
Zn	75	49,312	45,553	9,458	0,3270	1,441E-04	0,71	1986	2016
Zn	77	71,545	66,218	12,253	0,5238	2,059E-03	0,50	1988	2016
Zn	73	74,376	67,120	18,288	0,6665	6,552E-07	0,84	1986	2016
Zn	74	101,234	96,020	19,080	0,7138	7,069E-05	0,69	1988	2016
Zn	112	88,372	83,723	20,478	0,7907	6,991E-04	0,60	1988	2015
Zn	115	78,377	70,863	27,128	0,9744	1,580E-03	0,52	1987	2015
Zn	72	189,075	190,475	27,875	1,2056	2,319E-02	0,32	1988	2016

Tab. 61: Entwicklung der Gehalte ausgewählter Elemente in Oberböden der Grünland-BDF mit Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$ in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ - Abnahmen grün, Zunahmen rot.

Element	BDF	Mittelw.	Initialw.	Diff.	Trend	p-Wert	r ²	von	bis
Sb	36	1,024	0,300	0,859	0,0398	4,026E-02	0,36	1996	2016
As	17	21,657	23,073	-3,260	-0,1234	3,425E-03	0,47	1986	2016
As	12	12,688	13,895	-3,190	-0,0837	3,690E-03	0,46	1986	2016
As	36	12,267	12,918	-1,290	-0,0642	3,289E-06	0,89	1996	2016
As	2	12,899	13,990	-1,878	-0,0624	1,306E-03	0,53	1987	2016
As	44	6,588	7,564	-1,336	-0,0471	3,638E-04	0,61	1986	2015
As	96	5,799	6,490	-1,219	-0,0294	2,505E-02	0,31	1986	2015
Pb	2	53,266	57,808	-7,898	-0,3140	6,271E-05	0,69	1987	2016
Pb	17	47,145	49,673	-7,575	-0,2461	3,328E-04	0,61	1986	2016
Pb	128	28,238	28,793	-3,570	-0,1204	7,074E-03	0,41	1986	2016
Pb	14	46,767	43,818	8,698	0,2553	2,027E-02	0,33	1986	2015
Cd	36	0,990	1,110	-0,277	-0,0140	6,430E-06	0,88	1996	2016
Cd	128	0,525	0,580	-0,113	-0,0048	1,431E-03	0,53	1986	2016
Cd	96	0,601	0,631	-0,107	-0,0047	2,374E-02	0,31	1986	2015
Cd	3	0,527	0,549	-0,064	-0,0024	5,871E-03	0,43	1986	2016
Cr	36	40,822	46,302	-11,447	-0,5729	7,652E-08	0,95	1996	2016
Cr	47	66,224	72,308	-17,798	-0,5501	2,194E-04	0,64	1986	2015
Cr	44	51,417	58,065	-17,093	-0,5261	1,840E-05	0,74	1986	2015
Cr	128	41,472	46,780	-11,183	-0,3732	1,415E-04	0,66	1986	2016
Cr	3	43,599	46,973	-9,340	-0,2643	1,865E-03	0,51	1986	2016
Cr	65	58,553	59,883	-6,971	-0,2344	2,994E-03	0,50	1986	2016
Cr	2	17,865	19,930	-2,480	-0,1065	1,734E-02	0,34	1987	2016
Cu	36	17,780	19,479	-2,872	-0,1405	5,494E-04	0,71	1996	2016
Cu	44	23,074	24,033	-3,305	-0,1232	7,591E-04	0,57	1986	2015
Ni	44	25,464	27,988	-4,818	-0,1622	1,023E-08	0,91	1986	2015
Ni	126	21,270	23,728	-3,955	-0,1016	9,504E-03	0,39	1986	2016
Ni	2	9,407	10,293	-1,153	-0,0555	1,978E-02	0,33	1987	2016
Tl	36	0,396	0,425	-0,058	-0,0052	1,291E-01	0,34	2005	2016
Tl	12	0,439	0,453	-0,068	-0,0019	5,585E-02	0,32	1986	2016
Tl	44	0,476	0,496	-0,037	-0,0013	1,121E-03	0,67	1986	2015
U	36	2,292	2,395	-0,206	-0,0187	4,752E-02	0,51	2005	2016
U	12	1,943	2,109	-0,423	-0,0130	8,749E-04	0,69	1986	2016
U	17	2,522	2,655	-0,281	-0,0090	5,242E-02	0,33	1986	2016
U	2	1,717	1,780	-0,197	-0,0061	5,615E-03	0,55	1987	2016
U	128	1,459	1,552	-0,159	-0,0054	2,770E-02	0,40	1986	2016
U	3	0,955	1,014	-0,136	-0,0043	8,181E-04	0,69	1986	2016
U	126	1,436	1,343	0,209	0,0066	1,932E-03	0,63	1986	2016
Zn	44	118,713	161,375	-59,425	-1,7333	9,183E-04	0,56	1986	2015
Zn	47	153,524	200,650	-55,325	-1,6772	1,009E-02	0,39	1986	2015
Zn	2	132,776	162,900	-47,050	-1,3978	1,567E-04	0,65	1987	2016
Zn	132	103,690	129,875	-41,383	-1,1794	1,844E-03	0,51	1987	2016
Zn	17	155,671	173,075	-35,025	-0,9925	4,690E-04	0,59	1986	2016
Zn	12	143,986	155,125	-24,675	-0,8058	2,133E-06	0,81	1986	2016
Zn	8	117,626	134,550	-23,750	-0,7475	5,727E-03	0,43	1986	2015
Zn	128	72,647	81,965	-19,158	-0,5414	4,481E-04	0,60	1986	2016
Zn	96	119,155	130,025	-15,300	-0,4365	1,513E-02	0,35	1986	2015
Zn	42	92,961	101,410	-11,418	-0,3495	1,437E-03	0,53	1986	2015
Zn	36	104,278	100,625	8,775	0,4446	1,089E-03	0,67	1996	2016
Zn	129	105,197	86,175	11,425	0,8791	2,338E-05	0,41	1986	2016

Tab. 62: Entwicklung der Gehalte ausgewählter Elemente in Oberböden der Sonderkultur-BDF mit Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,3$ in $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ - Abnahmen grün, Zunahmen rot.

Element	BDF	Mittelw.	Initialw.	Diff.	Trend	p-Wert	r ²	von	bis
Sb	108	1,709	0,800	1,745	0,0685	3,085E-06	0,80	1986	2015
As	61	10,112	11,158	-2,116	-0,0555	5,977E-03	0,43	1986	2015
Pb	108	61,228	44,700	48,013	1,4862	2,118E-03	0,50	1986	2015
Cd	108	0,334	0,289	0,123	0,0043	6,894E-03	0,42	1986	2015
Cr	102	36,680	34,443	4,545	0,1401	4,641E-04	0,60	1986	2016
Cr	108	30,018	27,735	6,158	0,1681	4,465E-03	0,45	1986	2015
Cu	97	45,310	28,145	15,550	0,5678	2,698E-02	0,30	1986	2015
Cu	83	47,405	28,640	34,890	1,4979	3,280E-05	0,72	1986	2016
Cu	108	142,187	110,670	50,980	1,6923	9,523E-05	0,67	1986	2015
Cu	62	95,344	63,263	47,613	2,0202	4,729E-05	0,71	1986	2015
Cu	61	150,523	113,550	53,750	2,1682	2,769E-05	0,73	1986	2015
Ni	108	28,512	27,510	4,515	0,1390	5,045E-03	0,44	1986	2015
Tl	108	0,182	0,158	0,049	0,0016	2,556E-03	0,61	1986	2015
U	83	1,014	1,174	-0,148	-0,0069	4,816E-02	0,34	1986	2016
U	97	1,349	1,413	-0,132	-0,0043	1,863E-02	0,44	1986	2015
U	102	1,541	1,611	-0,104	-0,0037	6,046E-02	0,31	1986	2016
U	61	1,451	1,505	-0,104	-0,0035	5,661E-03	0,55	1986	2015
U	127	0,966	1,024	-0,060	-0,0027	4,989E-02	0,33	1986	2015
U	108	0,888	0,755	0,286	0,0092	2,651E-04	0,75	1986	2015
Zn	83	50,348	70,523	-27,733	-0,6815	1,489E-02	0,35	1986	2016
Zn	102	92,360	97,583	-11,705	-0,3070	8,638E-03	0,40	1986	2016
Zn	108	148,067	125,130	64,220	2,1121	9,989E-03	0,39	1986	2015

Tab. 63: Entwicklung der PAK-Gehalte in BDF-Oberböden in $\mu\text{g kg}^{-1}$ im Beobachtungszeitraum - Abnahmen grün, Zunahmen rot.

	BDF	1996-99			2012			2016			Diff. 2016-1996	
		Humus %	B(a)P	ΣPAK_{16}	Humus %	B(a)P	ΣPAK_{16}	Humus %	B(a)P	ΣPAK_{16}	B(a)P	ΣPAK_{16}
Acker	24	2,5	7,1	209	2,4	5,1	130	2,4	3,8	56	-3,3	-154
Acker	34	3,3	1,9	128	2,9	4,0	73	3,0	4,7	30	2,9	-97
Acker	40	3,1	220,4	3279	2,5	121,3	2270	2,7	103,1	1964	-117,4	-1315
Acker	72	4,8	66,4	1230	4,8	62,1	957	4,8	43,5	694	-22,9	-536
Acker	100	2,7	13,3	197	2,6	8,6	157	2,6	7,3	129	-6,0	-68
Acker	111	1,9	84,8	867	1,8	12,3	567	2,1	12,0	133	-72,8	-734
Grünland	3	6,9	13,2	875	9,5	8,1	121	7,2	5,8	69	-7,4	-807
Grünland	129	11,1	27,2	638	12,7	25,9	353	11,7	20,7	251	-6,5	-387
Grünland	132	10,1	139,6	2270	10,2	118,5	1614	10,0	111,5	1382	-28,1	-888
Nutzungsänderung	21	5,2	221,0	2643	8,5	62,6	856	8,6	66,9	740	-154,1	-1904
Nutzungsänderung	27	67,4	17,3	1041	63,0	67,4	1178	68,2	13,0	165	-4,3	-876
Nutzungsänderung	69	6,8	66,9	1233	7,6	41,1	743	6,9	24,7	389	-42,2	-844

Tab. 64: Entwicklung der CKW-Gehalte in BDF-Oberböden in $\mu\text{g kg}^{-1}$ im Beobachtungszeitraum - Abnahmen grün, Zunahmen rot (Mb.=Metaboliten).

	BDF	1985/86			2012			2016			Diff. 2016-1996		
		$\Sigma\text{DDT+Mb.}$	Lindan	HCB	$\Sigma\text{DDT+Mb.}$	Lindan	HCB	$\Sigma\text{DDT+Mb.}$	Lindan	HCB	$\Sigma\text{DDT+Mb.}$	Lindan	HCB
Acker	34	0,5	0,8	22,0	1,5	0,3	18,4	1,5	0,3	4,0	1,0	-0,5	-18,0
Acker	40	1,0	1,0	6,0	1,5	0,3	1,2	1,5	0,3	0,7	0,5	-0,8	-5,3
Acker	72	0,5	0,0	0,0	1,5	0,3	3,6	1,5	0,3	2,6	1,0	0,3	2,6
Acker	100	41,8	0,8	0,0	4,5	0,3	2,1	2,7	0,3	1,7	-39,1	-0,5	1,7
Acker	111	6,0	0,0	0,0	3,7	0,3	1,3	2,0	0,3	0,7	-4,0	0,3	0,7
Grünland	36	102,3	1,0	0,0	1,5	0,3	0,3	1,5	0,3	0,2	-100,8	-0,8	0,2
Grünland	129	20,4	1,8	0,0	1,6	0,3	3,2	1,5	0,3	1,5	-18,9	-1,5	1,5
Nutzungsänderung	21	1,8	1,5	0,0	1,5	0,3	3,0	1,5	0,3	1,5	-0,3	-1,3	1,5
Nutzungsänderung	27	5,3	10,8	2,3	5,6	0,3	19,7	1,5	0,3	1,4	-3,8	-10,5	-0,9
Nutzungsänderung	69	2,3	0,0	0,0	1,5	0,3	1,7	1,5	0,3	0,9	-0,8	0,3	0,9

Tab. 65: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe in Rindergülle in mg kg⁻¹ (PN=Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).

PN	N	STAT	Al	Sb	As	Ba	Pb	B	Cd	Cr	Fe	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	Hg	Se	Tl	U	Zn
1985/86	60	Mittelwert					7,6	32,3	0,48	8,6		1,15	43		0,8	7,0	0,114				238
		Median					7,0	25,0	0,41	8,0		1,00	38		0,4	6,0	0,120				230
		5%-Perz.					3,0	20,5	0,20	5,0		0,74	22		0,1	3,0	0,040				120
		95%-Perz.					14,0	69,5	1,08	15,1		2,00	68		2,6	13,1	0,170				459
		Min.					2,0	20,0	0,16	4,0		0,60	15		0,1	2,0	0,030				101
		Max.					17,0	96,0	1,66	26,0		2,00	134		3,0	31,0	0,290				762
1993	50	Mittelwert					13,3		0,29	4,9		1,31	46	257	3,2	5,0	0,076	0,43			221
		Median					12,0		0,28	4,0		1,40	39	273	2,1	4,5	0,065	0,37			188
		5%-Perz.					6,0		0,10	2,0		0,79	21	212	1,4	3,0	0,030	0,10			104
		95%-Perz.					24,1		0,59	9,6		1,77	83	291	6,5	8,0	0,150	0,86			450
		Min.					6,0		0,07	2,0		0,70	18	209	1,3	3,0	0,020	0,10			79
		Max.					33,0		0,72	12,0		1,90	132	292	6,6	10,0	0,170	0,87			853
1999	42	Mittelwert		0,21	0,65		10,7	26,4	0,25	5,2	1733	2,36	46	257	2,9	5,2	0,005	0,78			304
		Median		0,15	0,46		10,0	25,9	0,25	5,0	1445	2,48	38	244	2,3	5,0	0,005	0,74			261
		5%-Perz.		0,05	0,07		8,0	14,2	0,15	3,0	729	0,52	24	185	0,5	3,0	0,005	0,19			115
		95%-Perz.		0,46	1,71		15,0	42,0	0,40	8,0	3829	3,58	92	352	7,8	8,0	0,005	1,55			606
		Min.		0,05	0,03		5,0	12,7	0,12	3,0	598	0,23	11	169	0,5	3,0	0,005	0,08			61
		Max.		1,24	2,85		18,0	52,5	0,43	9,0	5162	5,88	112	401	17,0	9,0	0,020	2,29			642
2005/06	45	Mittelwert	1150	0,21	0,56	48,7	2,4	34,1	0,26	4,2	1896	1,45	46	280	2,2	4,0	0,021	0,77	0,057	0,541	256
		Median	1041	0,10	0,30	47,3	2,2	33,6	0,20	3,8	1804	1,29	41	266	1,7	3,7	0,020	0,75	0,052	0,422	250
		5%-Perz.	422	0,10	0,30	22,0	1,0	19,3	0,20	2,1	1052	0,48	27	171	0,1	2,1	0,005	0,24	0,014	0,143	132
		95%-Perz.	2322	0,56	1,19	77,3	4,5	53,1	0,40	7,2	3187	3,41	72	415	6,6	7,1	0,040	1,60	0,133	1,089	448
		Min.	306	0,10	0,30	15,3	1,0	14,9	0,10	1,2	919	0,26	21	129	0,1	1,8	0,005	0,10	0,005	0,114	104
		Max.	3099	0,71	2,07	95,1	6,6	60,8	0,80	11,9	3906	4,70	109	546	13,1	10,6	0,050	2,08	0,149	1,596	479
2012	35	Mittelwert	1060	0,68	1,91	41,7	4,5	29,7	0,24	3,6	1619	0,15	45	262	6,0	3,6	0,033	0,43	0,002	0,004	244
		Median	825	0,40	2,10	38,0	1,7	27,0	0,21	3,0	1398	0,10	40	247	3,4	3,1	0,020	0,30	0,002	0,004	203
		5%-Perz.	358	0,10	0,77	16,6	0,6	15,8	0,12	1,4	667	0,10	20	147	1,3	1,3	0,005	0,10	0,002	0,004	96
		95%-Perz.	2295	1,73	2,83	67,0	4,9	49,0	0,44	7,9	2784	0,37	74	386	18,4	8,1	0,073	1,37	0,002	0,004	367
		Min.	208	0,10	0,60	12,6	0,5	11,7	0,11	1,3	425	0,10	16	136	1,0	1,2	0,005	0,10	0,002	0,004	78
		Max.	2973	1,80	4,20	128,0	90,0	78,7	0,69	14,5	2989	0,41	213	858	31,7	9,0	0,090	2,50	0,002	0,009	1376
2018	40	Mittelwert		0,08	0,96	41,2	1,8	25,3	0,17	3,9		1,07	45	218	3,6	4,6	0,024	1,55	0,056	0,256	219
		Median		0,06	0,66	40,5	1,5	24,2	0,16	3,4		0,96	37	203	2,5	3,9	0,022	1,51	0,048	0,166	185
		5%-Perz.		0,04	0,32	14,8	0,8	16,3	0,10	2,0		0,54	24	145	1,2	2,7	0,012	0,57	0,020	0,058	122
		95%-Perz.		0,15	1,53	72,3	3,6	37,9	0,34	7,6		1,92	82	341	10,2	7,7	0,037	2,61	0,136	0,602	353
		Min.		0,03	0,16	8,3	0,3	14,0	0,08	1,0		0,43	16	141	0,9	1,8	0,009	0,40	0,014	0,034	101
		Max.		0,42	9,41	83,5	7,9	56,7	0,39	12,0		2,12	159	360	11,9	15,4	0,067	3,28	0,157	0,858	872

Tab. 66: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe in Schweinegülle in mg kg⁻¹ (PN=Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).

PN	N	STAT	Al	Sb	As	Ba	Pb	B	Cd	Cr	Fe	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	Hg	Se	Tl	U	Zn		
1985/86	15	Mittelwert					6,3	40,8	0,68	10,8		1,83	529		2,8	12,3	0,073					1185	
		Median					7,0	37,0	0,64	10,0		2,00	595		2,0	12,0	0,060						1187
		5%-Perz.					1,0	28,0	0,22	5,7		1,00	62		1,0	8,4	0,030						449
		95%-Perz.					11,5	64,8	1,13	20,3		2,75	897		6,3	15,6	0,123						1754
		Min.					1,0	28,0	0,22	5,0		1,00	57		1,0	7,0	0,030						394
		Max.					15,0	72,0	1,23	21,0		3,00	899		7,0	17,0	0,130						2100
1993	29	Mittelwert					9,8		0,36	8,1		2,82	236	414	4,2	9,9	0,034	4,18				437	
		Median					10,0		0,32	8,0		3,05	215	404	4,0	9,0	0,020	4,06				425	
		5%-Perz.					6,0		0,20	1,8		0,94	108	207	2,1	6,0	0,007	1,75				41	
		95%-Perz.					13,0		0,62	14,6		4,95	452	690	7,0	17,0	0,120	6,73				866	
		Min.					5,0		0,17	1,0		0,80	82	126	2,0	4,0	0,005	1,20				23	
		Max.					14,0		0,91	19,0		5,40	582	793	8,0	24,0	0,160	6,75				899	
1999	29	Mittelwert		0,62	0,62		16,9	60,3	0,30	9,7	1861	3,78	425	469	6,9	11,0	0,006	2,58				1206	
		Median		0,23	0,50		17,0	61,1	0,30	9,0	1862	3,60	317	489	6,7	11,0	0,005	2,50				1209	
		5%-Perz.		0,11	0,16		13,4	32,2	0,16	5,0	902	1,96	126	237	4,2	5,4	0,005	1,23				508	
		95%-Perz.		0,63	1,37		21,8	95,5	0,54	18,2	2873	5,99	1284	762	10,7	17,0	0,010	4,02				1886	
		Min.		0,08	0,13		11,0	29,4	0,01	3,0	664	1,83	47	89	2,6	4,0	0,005	0,99				226	
		Max.		11,62	1,64		26,0	98,2	0,59	22,0	3062	9,55	1650	924	11,6	18,0	0,030	5,11				2350	
2005/06	24	Mittelwert	980	0,20	0,46	44,9	3,1	84,3	0,33	8,5	2624	3,70	322	546	6,5	9,5	0,024	2,47	0,030	4,373	969		
		Median	905	0,10	0,30	44,6	2,8	77,2	0,30	8,4	2602	2,89	218	554	6,2	10,0	0,010	2,40	0,028	4,017	914		
		5%-Perz.	478	0,10	0,30	19,9	1,2	36,3	0,17	4,4	1353	1,02	99	300	3,7	5,0	0,005	1,44	0,008	0,767	434		
		95%-Perz.	1435	0,52	0,86	59,9	4,3	139,3	0,59	14,7	3827	7,88	749	795	10,9	13,8	0,092	4,04	0,061	8,679	1613		
		Min.	263	0,10	0,30	18,2	1,0	20,5	0,10	2,4	1087	0,87	84	244	2,4	3,4	0,005	1,03	0,007	0,585	338		
		Max.	2328	0,57	1,48	116,9	11,5	167,4	0,64	15,2	3906	8,83	1179	810	11,7	17,2	0,100	4,38	0,063	11,895	1801		
2012	10	Mittelwert	1274	0,86	3,01	50,7	2,0	64,1	0,38	6,3	2927	0,23	289	647	15,9	10,3	0,063	1,09	0,002	0,005	1012		
		Median	935	0,75	2,55	44,0	1,6	55,5	0,32	5,2	2260	0,20	204	557	8,1	9,2	0,065	1,05	0,002	0,004	1000		
		5%-Perz.	594	0,19	1,08	34,9	1,2	2,5	0,23	3,5	2011	0,10	80	342	4,5	4,0	0,016	0,10	0,002	0,004	397		
		95%-Perz.	2825	2,01	6,25	92,4	4,1	155,9	0,71	12,4	5152	0,42	584	1205	44,3	21,2	0,111	2,07	0,002	0,007	1777		
		Min.	587	0,10	0,90	34,0	1,1	2,0	0,22	3,0	1925	0,10	43	324	4,1	3,7	0,005	0,10	0,002	0,004	226		
		Max.	3378	2,50	7,60	103,0	5,1	191,0	0,96	13,5	5298	0,44	598	1473	57,0	29,0	0,120	2,20	0,002	0,010	2256		
2018	20	Mittelwert		0,15	1,34	55,9	1,5	58,8	0,23	6,2		1,64	362	532	7,3	13,6	0,025	5,07	0,050	1,615	969		
		Median		0,11	0,86	57,9	1,5	57,2	0,23	5,3		1,35	216	511	7,1	11,1	0,016	4,58	0,030	0,908	852		
		5%-Perz.		0,02	0,36	35,9	0,4	36,2	0,04	3,0		1,00	41	301	4,3	8,3	0,009	2,09	0,007	0,146	192		
		95%-Perz.		0,24	6,12	73,6	2,7	79,0	0,36	14,1		3,34	1013	751	10,2	21,0	0,058	10,81	0,162	4,239	1885		
		Min.		0,02	0,36	27,4	0,4	25,9	0,04	2,3		1,00	41	301	4,3	6,3	0,008	2,09	0,007	0,146	192		
		Max.		0,80	6,12	76,0	2,7	128,3	0,42	14,8		3,34	1331	792	11,0	52,8	0,063	10,81	0,162	4,283	2622		

Tab. 67: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe sonstiger Wirtschaftsdünger aus der Rinder- und Schweinehaltung in mg kg⁻¹ (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, PN= Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswählelemente des Bodenteils sind blau markiert).

Table with columns: WDA, PN, N, STAT, Al, Sb, As, Ba, Pb, B, Cd, Cr, Fe, Co, Cu, Mn, Mo, Ni, Hg, Se, Tl, U, Zn. It contains statistical data for various elements across different agricultural sectors (e.g., Rindermist, Rinderjauche) and sampling years.

WDA	PN	N	STAT	Al	Sb	As	Ba	Pb	B	Cd	Cr	Fe	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	Hg	Se	Tl	U	Zn	
Schweinemist	1985/86	3	Mittelwert					3,3	23,7	0,46	10,7		0,83	797		1,5	12,7	0,060				1762	
			Median					1,0	21,0	0,43	11,0		1,00	740		2,0	13,0	0,060					1220
			5%-Perz.					1,0	12,9	0,35	8,3		0,55	419		0,7	9,4	0,042					847
			95%-Perz.					7,3	36,3	0,59	12,8		1,00	1214		2,0	15,7	0,078					3055
			Min.					1,0	12,0	0,34	8,0		0,50	383		0,6	9,0	0,040					806
				Max.					8,0	38,0	0,61	13,0		1,00	1267		2,0	16,0	0,080				3259
	1993	1	Mittelwert					6,0		0,25	3,0				125			4,0	0,020				478
			Median					6,0		0,25	3,0				125			4,0	0,020				478
			5%-Perz.					6,0		0,25	3,0				125			4,0	0,020				478
			95%-Perz.					6,0		0,25	3,0				125			4,0	0,020				478
			Min.					6,0		0,25	3,0				125			4,0	0,020				478
				Max.					6,0		0,25	3,0			125			4,0	0,020				478
	1999	1	Mittelwert		0,21	1,01		8,0	26,9	0,24	7,0	1418	1,95	69	222	3,2	6,0	0,005	0,93				442
			Median	0,21	1,01		8,0	26,9	0,24	7,0	1418	1,95	69	222	3,2	6,0	0,005	0,93					442
			5%-Perz.	0,21	1,01		8,0	26,9	0,24	7,0	1418	1,95	69	222	3,2	6,0	0,005	0,93					442
			95%-Perz.	0,21	1,01		8,0	26,9	0,24	7,0	1418	1,95	69	222	3,2	6,0	0,005	0,93					442
			Min.	0,21	1,01		8,0	26,9	0,24	7,0	1418	1,95	69	222	3,2	6,0	0,005	0,93					442
				Max.	0,21	1,01		8,0	26,9	0,24	7,0	1418	1,95	69	222	3,2	6,0	0,005	0,93				442
	2005/06	1	Mittelwert	778	0,10	0,30	26,4	3,7	33,3	0,20	2,7	2201	3,65	91	479	1,4	8,5	0,030	1,05	0,015	0,658		392
			Median	778	0,10	0,30	26,4	3,7	33,3	0,20	2,7	2201	3,65	91	479	1,4	8,5	0,030	1,05	0,015	0,658		392
5%-Perz.			778	0,10	0,30	26,4	3,7	33,3	0,20	2,7	2201	3,65	91	479	1,4	8,5	0,030	1,05	0,015	0,658		392	
95%-Perz.			778	0,10	0,30	26,4	3,7	33,3	0,20	2,7	2201	3,65	91	479	1,4	8,5	0,030	1,05	0,015	0,658		392	
Min.			778	0,10	0,30	26,4	3,7	33,3	0,20	2,7	2201	3,65	91	479	1,4	8,5	0,030	1,05	0,015	0,658		392	
			Max.	778	0,10	0,30	26,4	3,7	33,3	0,20	2,7	2201	3,65	91	479	1,4	8,5	0,030	1,05	0,015	0,658	392	
Schweinejauche	1999	1	Mittelwert		2,22	1,75		32,0	72,9	0,35	8,0	2420	3,05	101	288	7,7	14,0	0,005	2,72			550	
			Median	2,22	1,75		32,0	72,9	0,35	8,0	2420	3,05	101	288	7,7	14,0	0,005	2,72				550	
			5%-Perz.	2,22	1,75		32,0	72,9	0,35	8,0	2420	3,05	101	288	7,7	14,0	0,005	2,72				550	
			95%-Perz.	2,22	1,75		32,0	72,9	0,35	8,0	2420	3,05	101	288	7,7	14,0	0,005	2,72				550	
			Min.	2,22	1,75		32,0	72,9	0,35	8,0	2420	3,05	101	288	7,7	14,0	0,005	2,72				550	
			Max.	2,22	1,75		32,0	72,9	0,35	8,0	2420	3,05	101	288	7,7	14,0	0,005	2,72				550	
Gemisch aus Rinder- und Schweinemist	1999	2	Mittelwert		0,10	0,55		11,5	28,9	0,25	4,5	1573	1,98	35	240	5,3	4,0	0,005	0,50			211	
			Median		0,10	0,55		11,5	28,9	0,25	4,5	1573	1,98	35	240	5,3	4,0	0,005	0,50				211
			5%-Perz.		0,04	0,42		7,5	26,9	0,19	2,3	459	1,53	13	103	2,0	2,2	0,005	0,48				93
			95%-Perz.		0,17	0,68		15,6	30,9	0,31	6,8	2687	2,42	58	377	8,6	5,8	0,005	0,53				329
			Min.		0,03	0,41		7,0	26,7	0,18	2,0	336	1,48	10	88	1,6	2,0	0,005	0,48				80
			Max.		0,18	0,69		16,0	31,2	0,32	7,0	2811	2,47	60	392	9,0	6,0	0,005	0,53			342	

Tab. 68: Statistische Kennwerte Spurenstoffe und anorganische Schadstoffe sonstiger Wirtschaftsdünger in mg kg⁻¹ (WDA=Art des Wirtschaftsdüngers, PN= Jahr der Probenahme, N=Anzahl untersuchter Proben, die 11 Auswahlelemente des Bodenteils sind blau markiert).

WDA	PN	N	STAT	Al	Sb	As	Ba	Pb	B	Cd	Cr	Fe	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	Hg	Se	Tl	U	Zn	
Hühnermist	1983/86	2	Mittelwert					1,0	32,0	0,36	11,5		2,00	59		1,6	9,0	0,045				406	
			Median					1,0	32,0	0,36	11,5		2,00	59		1,6	9,0	0,045					406
			5%-Perz.					1,0	20,3	0,31	11,1		1,10	32		0,2	9,0	0,023					131
			95%-Perz.					1,0	43,7	0,41	12,0		2,90	85		2,9	9,0	0,068					681
			Min.					1,0	19,0	0,30	11,0		1,00	29		0,1	9,0	0,020					100
			Max.					1,0	45,0	0,42	12,0		3,00	88		3,0	9,0	0,070					712
	2005/06	1	Mittelwert	156	0,10	0,30	27,5	1,0	28,9	0,20	4,2	611	2,03	63	409	1,2	3,2	0,010	0,69	0,023	5,895	366	
			Median	156	0,10	0,30	27,5	1,0	28,9	0,20	4,2	611	2,03	63	409	1,2	3,2	0,010	0,69	0,023	5,895	366	
			5%-Perz.	156	0,10	0,30	27,5	1,0	28,9	0,20	4,2	611	2,03	63	409	1,2	3,2	0,010	0,69	0,023	5,895	366	
			95%-Perz.	156	0,10	0,30	27,5	1,0	28,9	0,20	4,2	611	2,03	63	409	1,2	3,2	0,010	0,69	0,023	5,895	366	
			Min.	156	0,10	0,30	27,5	1,0	28,9	0,20	4,2	611	2,03	63	409	1,2	3,2	0,010	0,69	0,023	5,895	366	
			Max.	156	0,10	0,30	27,5	1,0	28,9	0,20	4,2	611	2,03	63	409	1,2	3,2	0,010	0,69	0,023	5,895	366	
	2012	1	Mittelwert	190	0,90	1,60	15,0	0,1	42,0	0,16	3,4	610	0,10	67	452	3,9	2,0	0,050	0,10	0,002	0,004	390	
			Median	190	0,90	1,60	15,0	0,1	42,0	0,16	3,4	610	0,10	67	452	3,9	2,0	0,050	0,10	0,002	0,004	390	
			5%-Perz.	190	0,90	1,60	15,0	0,1	42,0	0,16	3,4	610	0,10	67	452	3,9	2,0	0,050	0,10	0,002	0,004	390	
			95%-Perz.	190	0,90	1,60	15,0	0,1	42,0	0,16	3,4	610	0,10	67	452	3,9	2,0	0,050	0,10	0,002	0,004	390	
			Min.	190	0,90	1,60	15,0	0,1	42,0	0,16	3,4	610	0,10	67	452	3,9	2,0	0,050	0,10	0,002	0,004	390	
			Max.	190	0,90	1,60	15,0	0,1	42,0	0,16	3,4	610	0,10	67	452	3,9	2,0	0,050	0,10	0,002	0,004	390	
Ziegenmist	2018	3	Mittelwert		0,10	1,69	52,4	2,8	27,7	0,25	11,9		4,63	38	534	3,2	11,0	0,031	1,51	0,031	0,737	200	
			Median		0,10	1,69	52,4	2,8	27,7	0,25	11,9		4,63	38	534	3,2	11,0	0,031	1,51	0,031	0,737	200	
			5%-Perz.		0,10	1,69	52,4	2,8	27,7	0,25	11,9		4,63	38	534	3,2	11,0	0,031	1,51	0,031	0,737	200	
			95%-Perz.		0,10	1,69	52,4	2,8	27,7	0,25	11,9		4,63	38	534	3,2	11,0	0,031	1,51	0,031	0,737	200	
			Min.		0,10	1,69	52,4	2,8	27,7	0,25	11,9		4,63	38	534	3,2	11,0	0,031	1,51	0,031	0,737	200	
			Max.		0,10	1,69	52,4	2,8	27,7	0,25	11,9		4,63	38	534	3,2	11,0	0,031	1,51	0,031	0,737	200	
Ziegenjauche	2018	3	Mittelwert		0,17	2,38	20,9	2,5	46,2	0,17	21,6		17,92	32	602	2,2	35,6	0,046	3,14	0,018	0,324	245	
			Median		0,17	2,38	20,9	2,5	46,2	0,17	21,6		17,92	32	602	2,2	35,6	0,046	3,14	0,018	0,324	245	
			5%-Perz.		0,17	2,38	20,9	2,5	46,2	0,17	21,6		17,92	32	602	2,2	35,6	0,046	3,14	0,018	0,324	245	
			95%-Perz.		0,17	2,38	20,9	2,5	46,2	0,17	21,6		17,92	32	602	2,2	35,6	0,046	3,14	0,018	0,324	245	
			Min.		0,17	2,38	20,9	2,5	46,2	0,17	21,6		17,92	32	602	2,2	35,6	0,046	3,14	0,018	0,324	245	
			Max.		0,17	2,38	20,9	2,5	46,2	0,17	21,6		17,92	32	602	2,2	35,6	0,046	3,14	0,018	0,324	245	
Pferdemist	2005/06	1	Mittelwert	1743	0,34	0,30	42,1	4,2	37,8	0,60	4,5	2263	0,64	18	227	3,4	3,0	0,050	0,10	0,075	0,216	113	
			Median	1743	0,34	0,30	42,1	4,2	37,8	0,60	4,5	2263	0,64	18	227	3,4	3,0	0,050	0,10	0,075	0,216	113	
			5%-Perz.	1743	0,34	0,30	42,1	4,2	37,8	0,60	4,5	2263	0,64	18	227	3,4	3,0	0,050	0,10	0,075	0,216	113	
			95%-Perz.	1743	0,34	0,30	42,1	4,2	37,8	0,60	4,5	2263	0,64	18	227	3,4	3,0	0,050	0,10	0,075	0,216	113	
			Min.	1743	0,34	0,30	42,1	4,2	37,8	0,60	4,5	2263	0,64	18	227	3,4	3,0	0,050	0,10	0,075	0,216	113	
			Max.	1743	0,34	0,30	42,1	4,2	37,8	0,60	4,5	2263	0,64	18	227	3,4	3,0	0,050	0,10	0,075	0,216	113	
Pferdejauche	2005/06	1	Mittelwert	135	0,27	0,82	13,4	1,0	107,4	0,20	1,4	844	1,14	7	111	2,8	3,5	0,050	0,10	0,009	0,244	49	
			Median	135	0,27	0,82	13,4	1,0	107,4	0,20	1,4	844	1,14	7	111	2,8	3,5	0,050	0,10	0,009	0,244	49	
			5%-Perz.	135	0,27	0,82	13,4	1,0	107,4	0,20	1,4	844	1,14	7	111	2,8	3,5	0,050	0,10	0,009	0,244	49	
			95%-Perz.	135	0,27	0,82	13,4	1,0	107,4	0,20	1,4	844	1,14	7	111	2,8	3,5	0,050	0,10	0,009	0,244	49	
			Min.	135	0,27	0,82	13,4	1,0	107,4	0,20	1,4	844	1,14	7	111	2,8	3,5	0,050	0,10	0,009	0,244	49	
			Max.	135	0,27	0,82	13,4	1,0	107,4	0,20	1,4	844	1,14	7	111	2,8	3,5	0,050	0,10	0,009	0,244	49	
Hopfenbeerbäcksel	2012	3	Mittelwert	1072	4,37	4,93	44,0	5,8	67,4	0,15	27,8	26298	0,34	92	537	7,6	13,9	0,049	0,16	0,002	0,004	68	
			Median	1232	4,60	6,50	21,0	3,8	55,3	0,15	27,0	33415	0,44	122	461	5,8	12,9	0,050	0,10	0,002	0,004	68	
			5%-Perz.	439	1,00	1,82	14,7	1,3	52,3	0,13	9,0	11594	0,13	31	349	2,3	6,7	0,028	0,10	0,002	0,004	68	
			95%-Perz.	1593	7,57	6,95	89,3	11,6	91,0	0,17	47,1	36021	0,48	131	777	14,3	21,9	0,068	0,27	0,002	0,004	69	
			Min.	351	0,60	1,30	14,0	1,0	52,0	0,13	7,0	9169	0,10	21	337	1,9	6,0	0,026	0,10	0,002	0,004	68	
			Max.	1633	7,90	7,00	96,9	12,5	95,0	0,17	49,3	36310	0,48	132	812	15,2	22,9	0,070	0,29	0,002	0,004	69	
	2018	2	Mittelwert		0,10	0,65	35,0	0,7	40,8	0,03	4,6			0,56	14	219	0,4	3,7	0,027	0,23	0,008	0,038	35
			Median		0,10	0,65	35,0	0,7	40,8	0,03	4,6			0,56	14	219	0,4	3,7	0,027	0,23	0,008	0,038	35
			5%-Perz.		0,04	0,40	17,1	0,6	37,4	0,02	2,1			0,29	10	70	0,2	1,7	0,024	0,10	0,006	0,031	26
			95%-Perz.		0,17	0,90	52,9	0,9	44,3	0,05	7,1			0,82	17	368	0,7	5,8	0,030	0,35	0,010	0,044	44
			Min.		0,03	0,37	15,1	0,5	37,0	0,01	1,8			0,26	10	53	0,1	1,4	0,024	0,09	0,006	0,030	25
			Max.		0,17	0,92	54,9	0,9	44,6	0,05	7,4			0,85	17	384	0,7	6,0	0,031	0,36	0,010	0,045	45
Biogasgärrest	2005/06	7	Mittelwert	1087	0,10	0,65	53,9	2,3	47,6	0,29	4,5	2164	1,49	122	308	2,6	5,0	0,026	0,81	0,053	0,732	323	
			Median	970	0,10	0,30	46,4	2,5	41,8	0,30	3,4	2327	1,18	44	307	2,0	4,0	0,020	0,53	0,032	0,577	216	
			5%-Perz.	601	0,10	0,30	31,2	1,0	25,8	0,17	2,2	1261	0,68	36	202	1,4	2,8	0,011	0,41	0,009	0,186	186	
			95%-Perz.	1803	0,10	1,87	98,2	3,7	75,0	0,40	8,9	2807	2,96	335	449	4,7	8,8	0,047	1,67	0,019	1,746	671	
			Min.	536	0,10	0,30	31,0	1,0	23,9	0,15	2,2	1201	0,58	36	189	1,4	2,8	0,010	0,40	0,004	0,181	178	
			Max.	1974	0,10	2,36	112,9	4,0	81,0	0,40	10,0	2922	3,46	401	486	5,0	9,8	0,050	1,81	0,135	1,963	797	
	2012	11	Mittelwert	1805	0,46	1,92	58,1	2,1	30,1	0,31	6,2	2601	0,13	58	309	6,5	5,1	0,026	0,43	0,002	0,004	257	
			Median	1396	0,40	1,80	52,0	1,7	32,8	0,27	5,4	2126	0,10	46	276	6,1	4,6	0,030	0,24	0,002	0,004	203	
			5%-Perz.	465	0,25	0,75	32,5	1,1	10,5	0,20	3,2	1290	0,10	22	200	4,3	3,2	0,010	0,10	0,002	0,004	135	
			95%-Perz.	4089	0,85	3,85	107,0	3,8	44,4	0,50	10,8	3962	0,27	123	498	9,5	8,6	0,045	1,33	0,002	0,004	458	
			Min.	420	0,20	0,60	30,0	0,9	9,0	0,19	2,4	1089	0,10	22	190	3,4	3,0	0,010	0,10	0,002	0,004	129	
			Max.	4836	0,90	4,00	113,0	4,7	45,8	0,51	12,6	4204	0,28	170	550	11,0	10,0	0,050	2,10	0,002	0,		