

TEXTE

90/2011

# Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze

Teil B: Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3707 71 203  
UBA-FB 001572/B

**Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für  
Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung  
räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer  
Messnetze**

**Teil B:**

**Datenauswertung und Weiterentwicklung  
des Monitorings**

von

**Carsten Schilli**  
**Prof. Dr. Jörg Rinklebe**  
Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal

**Prof. Dr. Gunnar Lischeid**  
ZALF Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.,  
Müncheberg

Universität Potsdam, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften –  
Geoökologie, Potsdam

**Carolin Kaufmann-Boll**  
**Dr. Silvia Lazar**  
ahu AG Wasser · Boden · Geomatik, Aachen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter  
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4233.html>  
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung  
der Studie:

ahu AG Wasser · Boden · Geomatik  
Kirberichshofer Weg 6  
52066 Aachen

Bergische Universität Wuppertal  
Pauluskirchstraße 7  
42285 Wuppertal

ZALF e.V.  
Eberswalder Straße 84  
15374 Müncheberg

Universität Potsdam - Institut  
für Erd- und Umweltwissenschaften  
Karl-Liebknecht-Str. 24-25  
14476 Potsdam-Golm

Abschlussdatum:

Juni 2011

Herausgeber:

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion:

Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring  
Stephan Marahrens

Dessau-Roßlau, Dezember 2011

**INHALT**

|          |                                                                                  |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>FRAGESTELLUNG UND VORGEHEN</b>                                                | <b>9</b>  |
| <b>2</b> | <b>SACHSTAND AUF BASIS DER LITERATURRECHERCHE</b>                                | <b>11</b> |
| 2.1      | Durchgeführte länderübergreifende Auswertungen                                   | 12        |
| 2.2      | Identifizierung von Zeitintervallen und Trends                                   | 16        |
| 2.3      | Indikatoreignung Parameter                                                       | 17        |
| <b>3</b> | <b>DATENGRUNDLAGE BASIS-BDF</b>                                                  | <b>19</b> |
| <b>4</b> | <b>METHODEN</b>                                                                  | <b>21</b> |
| 4.1      | Selbst organisierende Karte mit Sammons Mapping                                  | 22        |
| 4.2      | Isometric feature mapping                                                        | 26        |
| <b>5</b> | <b>DATENAUSWERTUNG BASIS-BDF</b>                                                 | <b>28</b> |
| 5.1      | Datenauswahl und -bearbeitung                                                    | 28        |
| 5.1.1    | Datenauswahl und -bearbeitung: Anorganik                                         | 28        |
| 5.1.2    | Datenauswahl und -bearbeitung: Organik / Anorganik                               | 31        |
| 5.2      | Ergebnisse der Auswertungen ausgewählter anorganischer Parameter                 | 32        |
| 5.2.1    | Darstellung der Ergebnisse                                                       | 32        |
| 5.2.2    | Räumliche und zeitliche Trends                                                   | 43        |
| 5.2.3    | Diskussion und Schlussfolgerungen                                                | 53        |
| 5.3      | Ergebnisse der Auswertungen ausgewählter anorganischer und organischer Parameter | 57        |
| 5.3.1    | Darstellung der Ergebnisse                                                       | 57        |
| 5.3.2    | Räumliche Muster und zeitliche Trends                                            | 66        |
| 5.3.3    | Schlussfolgerungen                                                               | 67        |
| <b>6</b> | <b>DATENAUSWERTUNG INTENSIVMONITORING</b>                                        | <b>69</b> |
| 6.1      | Datengrundlage                                                                   | 69        |
| 6.2      | Darstellung der Ergebnisse                                                       | 70        |
| 6.2.1    | Erste Komponente: Deposition                                                     | 72        |
| 6.2.2    | Zweite Komponente: Versauerung                                                   | 74        |
| 6.2.3    | Dritte Komponente: Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Deposition     | 75        |
| 6.2.4    | Vierte Komponente: Wechselwirkungen zwischen Bodenlösung und -festphase          | 76        |
| 6.2.5    | Fünfte Komponente: Umsetzung organischer Substanz                                | 78        |
| 6.2.6    | Relevanz der Prozesse für einzelne Parameter                                     | 80        |
| 6.2.7    | Diskussion und Schlussfolgerungen                                                | 80        |
| <b>7</b> | <b>FAZIT</b>                                                                     | <b>82</b> |

|                                                                                   |                                                                              |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8</b>                                                                          | <b>HANDLUNGS- UND FORSCHUNGSBEDARF ZUR WEITERENTWICKLUNG DES MONITORINGS</b> | <b>85</b>  |
| 8.1                                                                               | Methodendokumentation                                                        | 85         |
| 8.2                                                                               | Anpassung des Zeitpunktes der Beprobung                                      | 86         |
| 8.3                                                                               | Datenaustausch                                                               | 87         |
| 8.4                                                                               | Datennacherhebung und Qualitätssicherung                                     | 88         |
| 8.5                                                                               | Ausrichtung auf die Aufgaben der Boden-Dauerbeobachtung                      | 89         |
| 8.6                                                                               | Vernetzung von Messnetzen                                                    | 90         |
| 8.7                                                                               | Identifizierung von Trends                                                   | 91         |
| 8.8                                                                               | Forschung                                                                    | 91         |
| 8.9                                                                               | Fortführung des Monitorings                                                  | 92         |
| <b>9</b>                                                                          | <b>ZUSAMMENFASSUNG</b>                                                       | <b>93</b>  |
| <b>10</b>                                                                         | <b>DANKSAGUNG</b>                                                            | <b>95</b>  |
| <b>11</b>                                                                         | <b>QUELLEN</b>                                                               | <b>96</b>  |
|                                                                                   |                                                                              |            |
| <b>Anlage 1: Beschreibung der vorliegenden Messergebnisse obligater Parameter</b> |                                                                              | <b>109</b> |
| <b>Anlage 2: Einzelstandorte in der SOK-SAM</b>                                   |                                                                              | <b>125</b> |
| <b>Anlage 3: Statistische Kennwerte</b>                                           |                                                                              | <b>129</b> |

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|               |                                                                                                                     |    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | Boden-Dauerbeobachtungsflächen – Stand 2010                                                                         | 12 |
| Abbildung 2:  | Initiales Netz der SOK                                                                                              | 23 |
| Abbildung 3:  | Training der SOK – Zuordnung einer Zeile des Beobachtungsdatensatzes zum ähnlichsten Knotenvektor der SOK           | 23 |
| Abbildung 4:  | Trainiertes Netz der SOK mit veränderten Knotenvektoren                                                             | 24 |
| Abbildung 5:  | Übernahme der Koordinaten der Knotenvektoren, denen jeweils eine Zeile des Beobachtungsdatensatzes zugeordnet wurde | 25 |
| Abbildung 6:  | Lage der Datenvektoren nach Sammon's Mapping                                                                        | 25 |
| Abbildung 7:  | Darstellung der SOK-SAM Koordinaten                                                                                 | 33 |
| Abbildung 8:  | Darstellung der SOK-SAM-Koordinaten des Kernbereiches                                                               | 34 |
| Abbildung 9:  | TOC- und Nges-Gehalte                                                                                               | 35 |
| Abbildung 10: | Flächennutzung                                                                                                      | 36 |
| Abbildung 11: | pH-Werte                                                                                                            | 37 |
| Abbildung 12: | Darstellung Schwermetallgehalte                                                                                     | 38 |
| Abbildung 13: | Gegenüberstellung der Cd und Cr-Gehalte getrennt nach Nutzung                                                       | 40 |
| Abbildung 14: | Hauptbodenarten                                                                                                     | 41 |
| Abbildung 15: | Proben organischer Horizonte                                                                                        | 42 |
| Abbildung 16: | Niederschlag und Temperatur                                                                                         | 43 |
| Abbildung 17: | Bodenausgangsgestein                                                                                                | 44 |
| Abbildung 18: | Gegenüberstellung maßgeblich geogen und depositionsgeprägter Standorte unter forstwirtschaftlicher Nutzung          | 46 |
| Abbildung 19: | Pb- und Cr-Gehalte der A-Horizonte unter Wald                                                                       | 47 |
| Abbildung 20: | Trendanalyse ausgewählter Zeiträume                                                                                 | 49 |
| Abbildung 21: | Ergebnisse der Trendanalyse                                                                                         | 51 |
| Abbildung 22: | Verschiebung zwischen Erstbeprobung und aktuellster Wiederholungsbeprobung                                          | 52 |
| Abbildung 23: | Darstellung der Proben                                                                                              | 57 |
| Abbildung 24: | Organische Horizonte                                                                                                | 58 |
| Abbildung 25: | Darstellung der Flächennutzung und der klassifizierten TOC-Gehalte                                                  | 59 |
| Abbildung 26: | Darstellung der pH-Werte                                                                                            | 60 |
| Abbildung 27: | Darstellung der PCB-Gehalte                                                                                         | 61 |
| Abbildung 28: | Darstellung der PAK- und Hexachlorbenzol-Gehalte                                                                    | 62 |
| Abbildung 29: | Darstellung der Schwermetallgehalte                                                                                 | 63 |
| Abbildung 30: | Horizonthauptsymbole                                                                                                | 64 |

|               |                                                                                                   |     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 31: | Stoffliche Gehalte der A-Horizonte unter Wald                                                     | 65  |
| Abbildung 32: | Darstellung der Bodenausgangsgesteine                                                             | 66  |
| Abbildung 33: | Ladungen der interpretierten Komponenten                                                          | 71  |
| Abbildung 34: | Mediane der ersten Komponente im Zeitverlauf                                                      | 72  |
| Abbildung 35: | Tiefenverläufe                                                                                    | 73  |
| Abbildung 36: | Tiefenverlauf der Standorte Coulissenhieb und Gemös                                               | 74  |
| Abbildung 37: | Werte der dritten Komponente                                                                      | 76  |
| Abbildung 38: | Werte der vierten Komponente getrennt nach Monaten, bezogen auf den Gesamtdatenbestand            | 77  |
| Abbildung 39: | Flächenspezifische Werte der vierten Komponente der Tiefenstufe 90 cm bzw. 100 cm                 | 78  |
| Abbildung 40: | Flächenspezifische Komponentenwerte der fünften Komponente der Tiefenstufe 90 cm bzw. 100 cm      | 79  |
| Abbildung 41: | Zeitpunkt der ersten Messung an Flächen der Boden-Dauerbeobachtung                                | 114 |
| Abbildung 42: | Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für Zink im Königswasserextrakt                        | 115 |
| Abbildung 43: | Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für die mikrobielle Biomasse                           | 116 |
| Abbildung 44: | Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für Benzo(a)pyren                                      | 116 |
| Abbildung 45: | Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für die Trockenrohdichte                               | 117 |
| Abbildung 46: | Räumliche Verteilung von gemessenen Parametern der Gruppe Anorganik                               | 119 |
| Abbildung 47: | Räumliche Verteilung von gemessenen Parametern der Gruppe Biologie                                | 119 |
| Abbildung 48: | Räumliche Verteilung von gemessenen Parametern der Gruppe Organik                                 | 119 |
| Abbildung 49: | Räumliche Verteilung von gemessenen Parametern der Gruppe Physik                                  | 119 |
| Abbildung 50: | Darstellung von einzelnen Proben drei verschiedener Standorte unter forstwirtschaftlicher Nutzung | 125 |



**TABELLENVERZEICHNIS**

|             |                                                                                                                                           |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 1:  | Stand der Umsetzung der bisherigen Anforderungen an die BDF                                                                               | 14  |
| Tabelle 2:  | Zusammenfassung von Analysemethoden                                                                                                       | 29  |
| Tabelle 3:  | Anzahlen der Ergänzung fehlender Parameter – Anorganik                                                                                    | 30  |
| Tabelle 4:  | Anzahlen der Ergänzung fehlender Parameter – Organik / Anorganik                                                                          | 31  |
| Tabelle 5:  | Wiederholungsuntersuchungen                                                                                                               | 48  |
| Tabelle 6:  | Beispiel zur Probenauswahl                                                                                                                | 50  |
| Tabelle 7:  | Standortbeschreibung (verändert nach Schilli et al. 2010)                                                                                 | 69  |
| Tabelle 8:  | Erklärte Varianzen mittels Isomap                                                                                                         | 70  |
| Tabelle 9:  | Identifizierbare Regelmäßigkeiten der identifizierten Prozesse und Einflüsse                                                              | 81  |
| Tabelle 10: | Anzahl der Messungen obligater anorganischer Parameter                                                                                    | 109 |
| Tabelle 11: | Anzahl der Messungen obligater organischer Schadstoffe                                                                                    | 111 |
| Tabelle 12: | Anzahl der Messungen obligater biologischer Parameter                                                                                     | 112 |
| Tabelle 13: | Anzahl der Messungen obligater physikalischer Parameter                                                                                   | 112 |
| Tabelle 14: | Beispiele der mitgeteilten Methoden zur Erfassung von Cd, dem pH-Wert und der mikrobiellen Basalatmung                                    | 113 |
| Tabelle 15: | Beispiele für die Problematik der unterschiedlichen Beprobungszeitpunkte                                                                  | 118 |
| Tabelle 16: | Anzahl der Messungen obligater anorganischer Parameter seit Einrichtung der jeweiligen Flächen                                            | 120 |
| Tabelle 17: | Anzahl der Messungen obligater organischer Schadstoffe seit Einrichtung der jeweiligen Flächen                                            | 122 |
| Tabelle 18: | Anzahl der Messungen obligater biologischer Parameter seit Einrichtung der jeweiligen Flächen                                             | 123 |
| Tabelle 19: | Anzahl der Messungen obligater physikalischer Parameter seit Einrichtung der jeweiligen Flächen                                           | 123 |
| Tabelle 20: | Anzahl der Flächen mit Wiederholungsuntersuchungen                                                                                        | 124 |
| Tabelle 21: | Profilbeschreibung und Analysenergebnisse der in Abbildung 50 dargestellten Standorte                                                     | 128 |
| Tabelle 22: | Statistische Kennwerte der untersuchten Parameter – Datenbestand der Auswertung von ausschließlich anorganischen Parametern (Kap. 5.2.1)  | 129 |
| Tabelle 23: | Statistische Kennwerte der untersuchten Parameter – Datenbestand der Auswertung von anorganischen und organischen Parametern (Kap. 5.3.1) | 130 |
| Tabelle 24: | Tiefen- und flächenspezifische Mediane des Datenbestandes für die Analyse mit Isomap (Kap. 6)                                             | 131 |

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

|                   |                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------|
| B(a)p             | Benzo(a)pyren                                    |
| BBodSchG          | Bundes-Bodenschutzgesetz                         |
| BBodSchV          | Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung      |
| BDF               | Boden-Dauerbeobachtungsfläche                    |
| C                 | Kohlenstoff                                      |
| CaCl <sub>2</sub> | Calciumchlorid                                   |
| Cd                | Cadmium                                          |
| Cr                | Chrom                                            |
| Cu                | Kupfer                                           |
| Isomap            | Isometric feature mapping                        |
| KAK               | Kationenaustauschkapazität                       |
| KCl               | Kaliumchlorid                                    |
| KW                | Königswasser                                     |
| n                 | Stichprobenanzahl                                |
| N <sub>ges</sub>  | gesamt Stickstoff                                |
| Ni                | Nickel                                           |
| PAK               | Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe     |
| PCB               | Polychlorierte Biphenyle                         |
| Pb                | Blei                                             |
| SOK               | Selbst organisierende Karte                      |
| SOK-SAM           | Selbst organisierende Karte mit Sammon`s Mapping |
| TIC               | gesamter anorganischer Kohlenstoff               |
| TOC               | gesamter organischer Kohlenstoff                 |
| UBA               | Umweltbundesamt                                  |
| Zn                | Zink                                             |

## EINLEITUNG

Ein wesentliches Ziel des Bodenschutzes in Deutschland ist nach § 1 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) die nachhaltige Sicherung der Bodenfunktionen und die Abwehr schädlicher Bodenveränderungen. Grundlage des vorsorgenden Bodenschutzes sind Informationen zur Bodenverbreitung und zum Bodenzustand. Darüber hinaus werden Daten zur Entwicklung und Veränderung von Böden im Zeitablauf zu Überwachungszwecken benötigt, auf deren Grundlage Prognosen über die zukünftige Entwicklung gegeben werden sollen.

Ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung dieses Bodenschutz-Ziels ist die Überwachung und Beobachtung des Bodenzustands durch den Betrieb eines Boden-Dauerbeobachtungsnetzes. Dieses Netz besteht in Deutschland aus 794 Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF), welche die regionalen Bodenformen, Hauptnutzungen sowie spezielle Belastungsszenarien widerspiegeln. Wichtige Ziele bei der Einrichtung der Flächen waren die allgemeine Statuserhebung der Böden und die Erfassung der Hintergrundbelastung. Dementsprechend waren die Landschaftsrepräsentanz sowie für die Fragestellung typische Flächen Hauptauswahlkriterien. Einrichtung und Betrieb der Messflächen liegen in der Zuständigkeit der Bundesländer und sind zumeist in den jeweiligen Landesbodenschutzgesetzen geregelt. Auf der Grundlage einer Verwaltungsvereinbarung über den Datenaustausch im Umweltbereich (VwV Datenaustausch; Anhang Boden) werden Daten der Boden-Dauerbeobachtung zwischen Bund und Ländern für länderübergreifende Auswertungen übermittelt.

Die ersten Messungen der Boden-Dauerbeobachtung wurden Mitte der 1980er Jahre mit dem Fokus auf den vorsorgenden Bodenschutz durchgeführt. Die Boden-Dauerbeobachtung kann als ein Instrument zur langfristigen Überwachung der Veränderung von Bodenzuständen und Funktionen im Sinne des BBodSchG angesehen werden. Seit dem Jahr 2001 liegt eine auf Basis der „Ad-hoc-AG“ BDF der Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) abgestimmte Handlungsanweisung zum Betrieb der Flächen vor (Barth et al. 2001). Diese beinhaltet eine Rahmenkonzeption für die Untersuchung und für das zu erhebende Parameterspektrum. Jedoch existieren keine verbindlichen Vereinbarungen zu Untersuchungsmethoden, zum datentechnischen Austausch und zur Einheitlichkeit der Daten.

Die Boden-Dauerbeobachtung hat die drei folgenden wesentlichen Ziele (Barth et al. 2001):

- 1) den aktuellen Zustand des Bodens zu erfassen und darzustellen,
- 2) die langfristigen Änderungen der Böden zu beschreiben und
- 3) zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren.

Die Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) werden in Basis-BDF und Intensiv-BDF unterschieden.

Die Basis-BDF dienen der langfristigen Erfassung von Veränderungen des Bodenzustands. An diesen Flächen erfolgt eine umfassende und wiederholte Erhebung von biologischen, chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften an der Bodenfestphase (Merkmalsdokumentation) sowie von relevanten Zusatzinformationen (z.B. auf landwirtschaftlich genutzten Flächen bewirtschaftungsbezogene Stoffein- und -austräge). Die Untersuchungen erfolgen in Abhängigkeit der untersuchten Parameter und Fragestellung einmalig oder in Zyklen von ein bis zehn Jahren.

Die Intensiv-BDF erfüllen alle Anforderungen einer Basis-BDF. Zusätzlich zur Ausstattung einer Basis-BDF sind Intensiv-BDF mit zahlreichen dauerhaften Messeinrichtungen ausgestattet und dienen der kontinuierlichen, langfristigen Erfassung von Bodenveränderungen und deren Ursachenklärung. Neben der Festphase des Bodens werden auch die Deposition und die Bodenlösung untersucht. An Intensiv-BDF sollen insbesondere dynamische Bodenprozesse dokumentiert werden, da diese Veränderungen (z.B. Stoffhaushalt) meist frühzeitiger auftreten. Aufgrund des höheren Kostenaufwands für Material und Personal beschränkt sich die Prozesserforschung und -dokumentation auf wenige Intensiv-BDF.

Die Messdaten aus der Boden-Dauerbeobachtung haben – neben den jeweiligen länderspezifischen Einsatzbereichen – einen hohen Stellenwert für länderübergreifende Fragestellungen. Hervorzuheben sind hier z.B. aktuelle Themen zum Monitoring der Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenzustand und die Bodenfunktionen, Fragen zur Biodiversität sowie die Erfassung des Kohlenstoffstatus und des Einflusses der Nutzung auf den Kohlenstoffhaushalt. Grundsätzlich lässt sich durch die Zusammenführung von Daten aus mehreren Ländern der Datenpool vergrößern, so dass bundesweite Aussagen statistisch besser ausgewertet und abgesichert werden können. Durch eine Vergrößerung der Stichprobenanzahl können evtl. Gruppen, die bei länderinternen Auswertungen nicht oder nur in geringem Umfang berücksichtigt werden, betrachtet und mit z.B. regionalen Gegebenheiten verglichen werden.

Länderübergreifende Auswertungen machen einen Austausch und eine Zusammenführung der Daten der Boden-Dauerbeobachtungsflächen notwendig, die in ein oder mehreren Institutionen der jeweiligen Bundesländer verwaltet werden. Im Fachinformationssystem Bodenschutz (bBIS-UBA) werden zurzeit Daten der bundesweiten Basis-BDF für länderübergreifende Auswertungen zusammengeführt.

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) wurde das F+E-Vorhaben „Auswertung der Veränderungen des Bodenzustandes für Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze“ (FKZ 3707 71 203) bearbeitet. Ziele des F+E-Vorhabens sind:

- Schaffung von Grundlagen zur Unterstützung einer länderübergreifenden Vereinheitlichung von Untersuchungsmethoden und ihrer Dokumentation, so dass eine einfache und nachvollziehbare Fortschreibung und eine Prüfung der Auswertungsvoraussetzungen möglich werden (Themengebiet „Methodische Anforderungen“).
- Aufzeigen von Möglichkeiten eines effizienteren Betriebes der BDF und von Synergieeffekten sowie von Hilfestellungen zur Interpretation der Zeitreihendaten (Themengebiet „Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings“).

In Teil A (siehe separater Bericht) des Projektes werden die Ergebnisse des Themengebietes „Methodische Anforderungen“ dargestellt. Hierzu gehören die Entwicklung eines Methoden-Codes unter Berücksichtigung bestehender theoretischer und praktischer Ansätze und eine Darstellung des Sachstands im Hinblick auf Verfahren zum Methodenvergleich bzw. zur Umrechnung bei Methodenwechseln.

Der vorliegende Teil B umfasst die Ergebnisse des Themengebietes „Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings“. Bestandteile sind hier Auswertungen von Messdaten der Basis-BDF und aus einem Intensiv-Monitoring-Programm sowie eine Zusammenfassung des Handlungs- und Forschungsbedarfs zur Weiterentwicklung des Monitorings.

## 1 FRAGESTELLUNG UND VORGEHEN

Bei der Bearbeitung und Auswertung eines länderübergreifenden Datenbestandes zur Boden-Dauerbeobachtung – und insbesondere bei der Ermittlung von Trends beim Bodenzustand – sind Herausforderungen zu berücksichtigen, die sich aus den unterschiedlichen Startzeitpunkten und damit den Laufzeiten der Untersuchung in den jeweiligen Ländern ergeben. Mögliche identifizierbare zeitliche und räumliche Trends oder Auffälligkeiten können verschiedene Ursachen haben. Zum einen kommen tatsächliche Zustandsveränderungen durch natürliche (z.B. Ausgangsgestein, pedogene Prozesse) oder anthropogene Einflüsse (z.B. Deposition, Umlagerung) in Frage; zum anderen können auch abweichende Analysemethoden verschiedener Beteiligter oder Wechsel der Methoden im Lauf des Untersuchungszeitraumes zu räumlichen und/oder zeitlichen Mustern führen. Bei bundesweiten Auswertungen muss daher eine Vergleichbarkeit der Daten gewährleistet sein. Folglich müssen zusätzlich Aspekte der Vergleichbarkeit der Methoden berücksichtigt werden. Hierbei ist insbesondere die Berücksichtigung der verwendeten Untersuchungs- und Messmethoden zu beachten.

Ziele des Teils B des Projektes sind:

- Literaturrecherche zu bereits durchgeführten Untersuchungen, Ergebnissen und bekannten Problemstellungen der Boden-Dauerbeobachtung,
- Prüfung und Bewertung der vorliegenden Datengrundlagen, besonders im Hinblick auf eine Anwendbarkeit für die statistische Auswertung,
- Zusammenstellung von Datensätzen zur statistischen Auswertung,
- Auswertung der Datensätze mit explorativen Datenanalysen,
- Identifikation von räumlichen Mustern und zeitlichen Trends und deren Interpretation,
- Bewertung der Ergebnisse.

Explorative statistische Ansätze sollen zeigen, wie auf Basis der bisher in der Boden-Dauerbeobachtung erhobenen Daten länderübergreifende Auswertungen sinnvoll möglich sind und welche Ergebnisse erzielt werden können. Als Grundlagen dienen ein vom UBA zusammengeführter Datenbestand der Boden-Dauerbeobachtung (Basis-BDF) und ausgewählte Daten aus einem Intensiv-Monitoring-Programm. Die Daten der Basis-BDF wurden dem UBA von den verschiedenen Betreibern der BDF in den einzelnen Bundesländern zur Verfügung gestellt. Die Daten der BDF sollen im Hinblick auf die Möglichkeit einer bundesweiten Auswertung analysiert und bewertet werden. Die Auswertung hat zum Ziel, maßgebliche räumliche und/oder zeitliche Veränderungen zu identifizieren und zu erklären. Da multivariate bundesweite Auswertungen bisher noch nicht durchgeführt wurden und die bundesweit relevanten Einflussgrößen auf die verschiedenen Parameter nicht zwingend bekannt sind, werden explorative Datenanalysen verwendet. Eine solche explorative Herangehensweise ermöglicht die unvoreingenommene Analyse des Datensatzes. Auf gezielte Datenauswahl und Auswertungen hinsichtlich spezieller Fragestellungen wird bewusst verzichtet, um den bundesweiten Charakter beizubehalten und die Ergebnisse nicht bereits vor der Auswertung zu beeinflussen.

Aus den Erfahrungen bei der Auswertung sollen darüber hinaus eventuelle Defizite hinsichtlich der Anwendbarkeit der Daten aufgezeigt und Vorschläge für deren Behebung erarbeitet werden. Aus den durch die Datenanalyse, die statistischen Auswertungen sowie Literaturarbeiten gewonnenen Erkenntnissen sollen Empfehlungen für bestehende Verfahrensabläufe und eine Weiterentwicklung des Monitorings gegeben werden. Verfahren der explorativen multivariaten Statistik bieten sich besonders für die Erfassung räumlicher und zeitlicher Trends des Bodenzustandes an, da i.d.R. Wechselwirkungen zwischen einzelnen Stoffen bzw. Messgrößen bestehen und Ursachen für die möglichen Trends nicht bekannt sind. Die Betrachtung mehrerer Parameter hat gegenüber univariaten Auswertungen (Auswertungen zu Einzelparametern) somit den Vorteil, dass unerwartete Veränderungen und Wechselwirkungen identifiziert und berücksichtigt werden können. Zusätzlich sind die Ergebnisse durch bereits bekannte Wechselwirkungen oder Trends häufig einfacher zu interpretieren.

Die Erkenntnisse und daraus abgeleiteten Hinweise zur fachlichen Weiterentwicklung des Monitorings sind in erster Linie darauf ausgerichtet, die Auswertungen länderübergreifend angelegter Fragestellungen zu unterstützen, können aber gleichwohl nützlich für den Einsatz in landesspezifischen (ausreichend großen) Datenbeständen sein.

Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Ermittlung des Sachstands: bisherige Arbeiten und Datengrundlagen,
- Konzeption der Auswertungen, Auswahl statistischer Verfahren,
- Datenauswahl und -bearbeitung,
- statistische Auswertungen,
- Ergebnisinterpretation und Bewertung,
- Ableitung von Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung des Monitorings.

Konzeption und Zwischenergebnisse wurden den BDF-Betreibern der Länder vorgestellt und mit ihnen abgestimmt. Anregungen der beteiligten Institutionen im Hinblick auf die Auswertungszielrichtung und -anforderungen konnten berücksichtigt werden.

## 2 SACHSTAND AUF BASIS DER LITERATURRECHERCHE

Das Programm der Boden-Dauerbeobachtung umfasst zzt. 699 Basis-BDF und 95 Intensiv-BDF, an denen Messungen stattfinden. Die Flächen erstrecken sich über alle deutschen Bundesländer und geographischen Landschaftsräume. Die Verteilung der Standorte über die Bundesrepublik ist regional nicht einheitlich. Die unterschiedlichen Zielsetzungen der Bundesländer bei der Flächeneinrichtung bedingen die Heterogenität. So unterscheidet sich die Dichte des Messnetzes von Bundesland zu Bundesland deutlich. Bezogen auf die Fläche werden im Nordosten und im (Süd-)Westen der Bundesrepublik verhältnismäßig weniger Flächen betrieben (Abbildung 1 – Rheinland-Pfalz betreibt ein neu angelegtes Messnetz). Die Verteilung der aktiven Flächen ändert sich jedoch mit der Zeit. Die Pläne der Bundesländer umfassen beispielsweise die Neueinrichtung von Flächen, eine Intensivierung der Messung an Einzelflächen sowie ein Aussetzen der Messungen an anderen BDF. Die föderale Struktur des Betriebes der BDF bedingt, dass die Daten bislang vorrangig auf der Ebene der einzelnen Bundesländer erhoben, gehalten und ausgewertet werden. Anlässlich überregionaler Fragestellungen (z.B. Versauerung, Veränderungen der Gehalte und Vorräte an organischer Bodensubstanz) oder zur Vergrößerung von Datenbeständen für robuste statistische Aussagen stellte sich in der Vergangenheit mehrfach die Frage nach der Notwendigkeit von länderübergreifenden Auswertungen.

Länderübergreifende Auswertungen sind besonders vor dem bereits genannten Hintergrund der nachhaltigen Sicherung der Bodenfunktionen und der Abwehr schädlicher Bodenveränderungen (§ 1 BBodSchG) aus bundesweiter Sicht erforderlich. Verschiedene Untersuchungen (vgl. Kap. 2.1) der BDF und deren Daten wurden bereits durchgeführt, um deren Eignung zur bundesweiten Analyse festzustellen. Beispielsweise wurde für einzelne Stoffe der zum Zeitpunkt der jeweiligen Auswertung vorliegende Datenbestand der Basis-BDF ausgewertet. Länderübergreifende multivariate Auswertungen wurden auf Basis von Daten der BDF bisher noch nicht durchgeführt.

Mit dem Programm der Boden-Dauerbeobachtung steht ein in dieser Form einmaliges Monitoring-Programm mit einer sehr hohen Anzahl an berücksichtigten Parametern zur Verfügung. Die erhobenen Parameter bieten die Möglichkeit, Wechselwirkungen und Veränderungen der untersuchten Bodencharakteristika zu erfassen und zu analysieren. Durch das sehr breite, biologische, physikalische und chemische Parameter erfassende Spektrum der Untersuchung ist auch eine Detektion von unerwarteten Veränderungen denkbar. Diese Möglichkeit bietet bundesweit kein anderes Monitoringsystem.

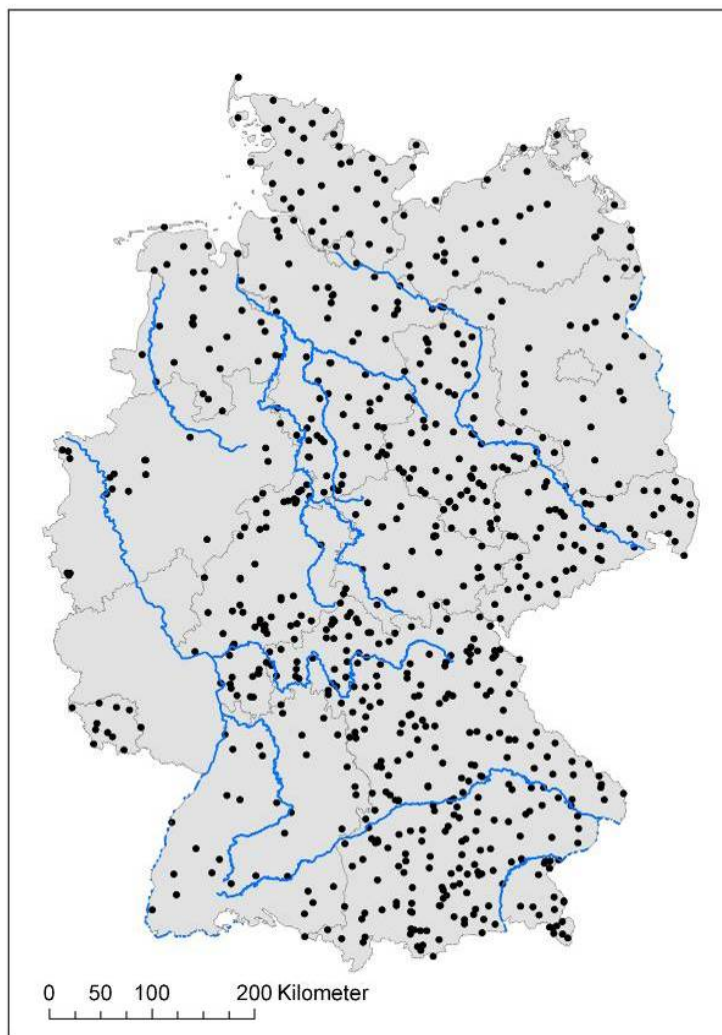


Abbildung 1: Boden-Dauerbeobachtungsflächen – Stand 2010 (RP betreibt ein neu-angelegtes Messnetz)

## 2.1 Durchgeführte länderübergreifende Auswertungen

Seit den 1990er Jahren wurden verschiedene Arbeiten verfasst, die sich mit der Boden-Dauerbeobachtung und der Möglichkeit von länderübergreifenden Auswertungen befassen haben (z.B. Spatz 2001, Huschek et al. 2004, Schröder et al. 2003).

Durch einen länderübergreifenden Abstimmungsprozess seit den 1990er Jahren wurde ein gemeinsamer Rahmen für die Auswahl, Einrichtung und den Betrieb der BDF in den Boden-Dauerbeobachtungsprogrammen gesetzt. So wurde mit Barth et al. 2001 eine abgestimmte Handlungsanweisung zum Betrieb von BDF vorgelegt und von der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) zur Berücksichtigung empfohlen. Die Arbeit beschreibt die von der Beprobung bis zur Analyse empfohlenen Arbeitsschritte und Methoden. Zusätzlich sind obligate und empfohlene Untersuchungsparameter sowie deren Messintervalle definiert.



Grundlegende Voraussetzung für Auswertungen aller Art ist die Vergleichbarkeit der Daten aus einer oder mehreren Quellen untereinander. Mögliche Abweichungen in untersuchten Parametern (z.B. Betrachtung der Gesamtgehalte anstatt der obligaten durch Königswasser extrahierbaren Gehalte) und/oder verwendeten Methoden können die Vergleichbarkeit der Daten verschiedener Quellen einschränken oder unmöglich machen. Mit der abgestimmten Konzeption (Barth et al. 2001) sollte solchen Problemen vorgebeugt werden. Entsprechend konnte den im Rahmen des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms erhobenen Daten auf Basis einer Fragebogenerhebung bei den Betreibern ein hohes Maß an Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit festgestellt werden (Schröder et al. 2003). Trotz der beschriebenen hohen Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit konnten jedoch auch Unterschiede der Datenqualität, z.B. hinsichtlich der Analyse- und Beprobungsmethoden, erkannt werden (Spatz 2001). Die Hinweise auf Abweichungen von einzelnen Schritten, von der Beprobung bis hin zur Analysemethode, weisen auf eine mögliche Einschränkung der Vergleichbarkeit der Daten des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms hin. Eine sorgfältige Auswahl der Daten hinsichtlich ihrer gemeinsamen Verwendbarkeit vor länderübergreifenden Auswertungen ist angeraten (Spatz 2001).

Die Merkmalsdokumentation der BDF ist nahezu vollständig. Für fast alle Standorte liegen komplette bodenkundliche Profilbeschreibungen vor. Zusätzlich sind weitere Standortinformationen wie Lage, Nutzung und Bodentyp erfasst. Erste Auswertungen eines Gesamtdatenbestandes der BDF im Jahr 2001 belegen, dass eine flächendeckende Erfassung der obligatorischen Parameter nach LABO-BDF-Konzeption für die Parameter Korngröße, Trockenrohdichte, pH-Wert, C- und N-Gehalte und Schwermetalle durchgeführt wurde. Für die anderen Parameter sind in der länderübergreifenden Datenzusammenstellung Lücken festgestellt worden (Spatz 2001). Dementsprechend steht für bundesweite, flächendeckende Auswertungen, welche die gesamte Laufzeit der Boden-Dauerbeobachtung erfassen sollen, nur ein begrenzter Parametersatz zur Verfügung. Die nach Barth et al. 2001 auf BDF obligaten Parameter werden nur in seltenen Fällen vollständig erhoben. Folglich waren keine bundesweiten Auswertungen mit allen Parametern unter Berücksichtigung aller Flächen möglich.

Auswertungen von länderübergreifenden Daten beschränkten sich bisher auf univariate Auswertungen (Spatz 2001, Huschek et al. 2004). Die in Spatz 2001 veröffentlichten länderübergreifenden Auswertungen umfassten aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit und Datenlücken nur die Oberböden von vier Bundesländern und nur den Stoff Cadmium. Erste bundesweite univariate Auswertungen sind im Jahr 2004 durchgeführt worden. Die Untersuchung bezog sich auf physikalische und chemisch-anorganische Parameter, da bodenbiologische Parameter und Daten zu organischen Schadstoffen nur in sehr geringem Umfang vorlagen. Die Daten der BDF konnten erstmals zur Auswertung bodenschutzrelevanter, bundesweiter Fragestellungen erfolgreich herangezogen werden. Auf Basis der Daten wurde ein länderübergreifender Bericht zum Status der Böden verschiedener ausgewählter Parameter (Schwermetalle, Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor) erstellt.

Im Verlauf der univariaten Betrachtung der Stoffgehalte von Oberböden an verschiedenen Schwermetallen, Kohlenstoff und Stickstoff (Huschek et al. 2004) wurde gezielt nach Einflüssen der Faktoren Nutzung, Bodenart und Ausgangsgestein gesucht. Die Gehalte der untersuchten Stoffe konnten Zusammenhänge mit genannten Faktoren belegen, die sich (je nach Stoff) in unterschiedlicher Deutlichkeit ausprägten. Die Auswertung zeigte auch, dass verschiedene auffällige Gehalte von Einzelstoffen durch weitere Faktoren, wie z.B. abweichende Depositionsmengen oder Klärschlammaufbringung, verursacht werden können.

Die verschiedenen länderübergreifenden Datenauswertungen zeigten neben den Ergebnissen zu Einzelstoffen aber auch einen Handlungsbedarf, vor allem im Hinblick auf die Datenkommunikation wie auch auf die Vereinheitlichung von Datenerhebung, -haltung und -dokumentation. Im Hinblick auf bundesweite Auswertungen sind verschiedene Defizite festgestellt und Anforderungen formuliert worden (Spatz 2001, Huschek et al. 2004). Die formulierten Anforderungen und der Stand der aktuellen Umsetzung sind in Tabelle 1 dargestellt bzw. bewertet.

Tabelle 1: Stand der Umsetzung der bisherigen Anforderungen an die BDF

| Anforderung                                                                                                                                                                       | Umsetzung                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Definition eines Schemas zum Austausch der Daten                                                                                                                                  | ☺ - ☹<br>Eine 1. Version steht auf Basis eines xml-Schemas zur freien Verfügung:<br><i><a href="http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/daten/xml-schema.htm">http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/daten/xml-schema.htm</a></i> |
| genaue Dokumentation der verschiedenen angewandten Methoden zur Erhöhung der Qualität und der Vergleichbarkeit von erhobenen Daten                                                | ☺ - ☹<br>Angewandte Methoden meist gut, teilweise aber nicht eindeutig dokumentiert.<br>Für die zukünftige, einheitliche Dokumentation kann der Methodencode (siehe Teil A des Berichts) verwendet werden.                                                         |
| Harmonisierung der angewandten Analysemethoden oder Nachweis der Vergleichbarkeit                                                                                                 | ☺ - ☹<br>Bei bundesweiten Auswertungen können auf Grund nicht einheitlicher Methoden teilweise nicht alle Daten verglichen werden (vgl. Anl. 1).                                                                                                                   |
| Erstellung und regelmäßige Aktualisierung eines länderübergreifenden Datenbestandes                                                                                               | ☹<br>Die aktuell beim UBA vorgehaltenen Daten (vgl. Kap. 3) sind umfangreich und länderübergreifend, aber nicht auf aktuellem Stand.                                                                                                                               |
| Auffüllen von durch mangelnde Dokumentation verursachten Datenlücken                                                                                                              | ☹<br>Eine intensive Methodenrecherche wurde teilweise für Einzelprojekte durchgeführt                                                                                                                                                                              |
| Prüfung kritischer Altdaten hinsichtlich der verwendeten Methoden zur Bewertung der Vergleichbarkeit aus Gründen der Qualitätssicherung bzw. Umrechnung vergleichbarer Ergebnisse | ☹ - ☹<br>Systematische Aufarbeitung nur in Einzelfällen.                                                                                                                                                                                                           |

| Anforderung                                                                                    | Umsetzung                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nacherhebung nicht gemessener Parameter                                                        | ☹<br>Für verschiedene Parameter ist eine Nacherhebung nicht mehr möglich, da die Probenlagerung die Konzentrationen beeinflussen kann.                                                                                                       |
| Länderübergreifende Synchronisation der Beprobungszeitpunkte zur verbesserten Vergleichbarkeit | ☹<br>Keine länderübergreifenden Vereinbarungen.<br>Teilweise länderinterne Abweichung der Beprobungszeitpunkte zur Bestimmung der Parameter der verschiedenen Gruppen aus Praktikabilitätsgründen (Anorganik, Organik, Physik und Biologie). |

Neben der Vergleichbarkeit der Daten ist die Verteilung und Repräsentanz für länderübergreifende Auswertungen ein wichtiges Kriterium. Durch den abweichenden Zeitpunkt der Aufnahme der Boden-Dauerbeobachtungsprogramme und einer den unterschiedlichen Zielen der Bundesländer entsprechenden Anlage des Messnetzes fand von Beginn an keine koordinierte Abstimmung in Bezug auf länderübergreifende Fragestellungen statt. Das BDF-Messnetz wurde dementsprechend nicht als bundesweite, systematische Stichprobenerhebung konzipiert (Spatz 2001). Eine der ersten Aufgaben bei länderübergreifenden Arbeiten war somit die Prüfung der generellen Eignung eines BDF-Datenkollektivs zur bundesweiten Auswertung sowie die Feststellung der Repräsentativität der Flächen bezogen auf die Bundesebene. Eine solche Eignung der BDF für länderübergreifende Auswertungen im Hinblick auf die naturräumliche Gliederung konnte durch verschiedene Arbeiten belegt werden (Schröder et al. 1997, Spatz 2001). Ferner konnte nachgewiesen werden, dass das BDF-Messnetz auch aus bundesweiter Sicht ökosystemar angelegt ist. Die räumliche Verteilung der Flächen ist jedoch bei bundesweiter Betrachtung verbesserungswürdig (Schröder 2003).

Für länderübergreifende Auswertungen sollten nach Möglichkeit alle zur Verfügung stehenden Daten der BDF berücksichtigt werden und nicht auf Teilmengen zurückgegriffen werden (Spatz 2001). Es ist jedoch zu beachten, dass spezielle Fragestellungen verschiedene Anforderungen an die Daten und damit an das Messnetz stellen. Die Erarbeitung einheitlicher Zielvorgaben für länderübergreifende Auswertungen ist somit sinnvoll. Repräsentanzkriterien bzw. zu untersuchende Flächen sind an den Themen / Fragestellungen für solche Auswertungen evtl. neu zu bewerten.

## 2.2 Identifizierung von Zeitintervallen und Trends

Als eine wesentliche Aufgabe des BDF-Programms ist die Erfassung von zeitlichen Trends anzusehen (Barth et al. 2001). Bisher ermöglichte die Datenlage eine bundesweite Auswertung im Hinblick auf zeitliche Trends nicht (Spatz 2001, Huschek et al. 2004). Die zum Zeitpunkt der jeweiligen Untersuchungen vorliegenden Daten konnten nicht auf eine ausreichende Zahl an verwendbaren Wiederholungsuntersuchungen zurückgreifen, um einen zeitlichen Trend abzubilden. Auswertungen einzelner Bundesländer hingegen konnten dem Anspruch der Beschreibung langfristiger Änderungen in Böden inzwischen gerecht werden. Die Datengrundlage zur statistischen Auswertung ist für bodenbiologische Parameter – hinsichtlich zeitlicher Trends – meist günstiger. Der Grund dafür sind zum einen die häufigeren Messungen aufgrund des empfohlenen Beprobungsintervalls von  $\geq 1$  Jahr. Im Gegensatz dazu werden die chemischen und physikalischen Parameter (empfohlenes Beprobungsintervall  $\geq 5$  Jahr) seltener gemessen. Zum anderen reagieren die bodenbiologischen Parameter meist schneller auf Veränderungen als viele andere Parameter (z.B. Schwermetallgehalte). So stehen in Nordrhein-Westfalen (NRW) bei einer Laufzeit von 16 Jahren bis zu zehn Analyseergebnisse verschiedener bodenbiologischer Parameter von einzelnen Flächen zur Verfügung (LANUV 2009). Die in den Ländern vorliegenden Ergebnisse von teilweise mehr als 20 Jahre laufenden Messungen ergaben verschiedene Ergebnisse hinsichtlich der Trendanalysen.

Für mikrobiologische Parameter konnten bereits auf BDF in Niedersachsen vereinzelt signifikante Trends festgestellt werden (NLfB 2001). Signifikante Veränderungen auf Einzelflächen, wie z.B. ein schwacher Anstieg der Katalaseaktivität sowie eine Abnahme der Bodenatmung, sind auf Flächen in Thüringen gemessen worden (TMLNU 2006). Ein genereller Trend für einzelne biologische Parameter kann jedoch nicht festgestellt werden. So zeigten z.B. alle Flächen in NRW trotz guter Datengrundlage weder für die bodenmikrobiologischen noch für die zoologischen Parameter signifikante Trends (LANUV 2009).

Zur Trendanalyse der chemischen organischen und anorganischen Parameter liegen aufgrund der empfohlenen Beprobungshäufigkeit von  $\geq 5$  Jahren bisher meist nur wenige Wiederholungsuntersuchungen vor. Dennoch wurden auch für diese Parameter bereits Trends beschrieben. Für organische Schadstoffe sind mit steigender Laufzeit der BDF sinkende Konzentrationen und Vorräte der organischen Schadstoffe in Auflage und oberem Mineralboden an Einzelstandorten von Waldflächen beschrieben (LBEG 2007). Ebenfalls sinkende Gehalte konnten für die in Bayern an einigen Standorten zusätzlich untersuchten Radionuklide Cäsium 137 und Strontium 90 im untersuchten Zeitraum festgestellt werden (Henkelmann et al. 2005). Die geringe Anzahl an vorliegenden Wiederholungsuntersuchungen erschwert jedoch einen Nachweis signifikanter Veränderungen. In Gebieten niedriger Schadstoffeinträge ist eine erkennbare signifikante Veränderung der Konzentrationen in der Festphase möglicherweise erst in mehreren Jahrzehnten zu erwarten. Nachweisbar sind Trends (z.B. Abnahme von Pb-Gehalt und -Vorrat) in Auflagehorizonten, welche die Veränderungen der Deposition wiedergeben (LUBW 2008). Schwierigkeiten bei der Untersuchung von Trends bestehen bei vielen Parametern aufgrund einer hohen Variabilität, die aus Abweichungen bei der Durchführung der Wiederholungsbeprobung (z.B. Probenahme) oder aus einer hohen Messunsicherheit resultieren (Desaules et al. 2010).

Auf Basis der in den Ländern vorliegenden Daten hat das Programm der Boden-Dauerbeobachtung die Aufgabe der Identifikation von langfristigen Änderungen des Bodenzustandes, wie die verschiedenen, bereits publizierten Ergebnisse zeigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch das Belegen eines unveränderten Bodenzustandes die Aufgabe eines überwachenden Monitorings erfüllt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass nicht veränderte Konzentrationen eines Stoffes nicht bedeuten, dass kein Trend hinsichtlich der Stoffflüsse auftritt. Eine langfristige Betrachtung der Stoffvorräte und -flüsse ist angeraten, wobei Letzteres nur für Flächen der Intensiv-BDF erfüllt werden kann.

Die Veröffentlichungen der Betreiber der BDF der verschiedenen Bundesländer zeigen, dass teilweise eine ausreichende Anzahl an Wiederholungsuntersuchungen zur Zeitreihenanalyse für einzelne Parametergruppen oder Parameter vorliegt. Es konnte allerdings auch festgestellt werden, dass dies nicht bundesweit der Fall ist, da die Länder nicht immer das identische Parameterset erhoben haben. Durch die Auswertung eines länderübergreifenden Datenbestandes sind möglicherweise Entwicklungen und Regelmäßigkeiten zu erkennen, die bei ausschließlicher Betrachtung eines Datenbestandes nur eines Bundeslandes nicht erkennbar sind.

### **2.3 Indikatoreignung Parameter**

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl von Daten für Auswertungen ist die Identifikation geeigneter Parameter. Verschiedene Arbeiten konnten bereits belegen, dass einzelne, an Flächen der BDF gemessene Parameter als Indikatoren für Einflüsse oder Prozesse angesehen werden können. Als Indikator werden hier einzelne Parameter aufgefasst, die einen bestimmten Prozess oder Einfluss erwarten lassen. Voraussetzung für die Indikation von Einflüssen oder Prozessen ist, dass sich Änderungen in Raum und/oder Zeit in ausreichender Größenordnung in gemessenen Parametern abzeichnen. Die Effizienz von Einzelparametern zur Indikation von Einflüssen oder Prozessen kann durch zeitliche oder räumliche Effekte sowie die Fragestellung beeinflusst werden. Die Identifikation von geeigneten Indikatoren ist ihrer Aussage entsprechend in Abhängigkeit von der Fragestellung durchzuführen.

Als typisch für geogene Belastungen von Böden gelten z.B. hohe Konzentrationen von Cr und Ni (Utermann et al. 2010). Da diese Metalle auf anderem Weg, z.B. durch Deposition, meist nur in vergleichsweise geringen Mengen in Böden eingetragen werden, können sie als ein Indikator für geogene Belastungen angesehen werden. Erhöhte Konzentrationen von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) weisen aufgrund ihrer Herkunft aus unvollständigen Verbrennungsprozessen (z.B. Hausbrand, Abgase aus Verkehr, Industrie und Gewerbe) auf verstärkte, anthropogen bedingte Belastungen hin (Fliegner & Reinirzens 1993). Auch Pb-Konzentrationen geben häufig Hinweise auf (ehemalige) Depositionseinflüsse. Das durch Deposition eingetragene, aus der Kraftstoffverbrennung stammende Pb war bis zur schrittweisen Umsetzung des Benzin-Blei-Gesetzes in den Jahren 1976 und 1988 die Hauptquelle von Pb in Böden. Auf den Straßenverkehr zurückzuführende erhöhte Pb-Gehalte sind auch heute noch in Böden feststellbar. Die deutliche Veränderung der Pb-Konzentrationen in der Deposition durch die Einführung des Benzin-Blei-Gesetzes verringert jedoch langfristig die Eignung von Pb als Indikator für Depositionseinflüsse. An Waldstandorten konnte ein Rückgang der Pb-Gehalte in Auflagehorizonten bereits nachgewiesen werden (LUBW 2008). Ähnliches gilt auch für Sulfat. Durch die seit den 1970er Jahren gesetzlich vorgeschriebene Rauchgasentschwefelung und die Großfeuerungsanlagenverordnung

wurden die  $\text{SO}_4$ -Einträge in Böden drastisch reduziert (z.B. LfU 2008). Aus der Entwicklung resultierende Konzentrationsänderungen verschiedener Parameter konnten bereits mehrfach nachgewiesen werden (Meesenburg et al. 1995). Die Indikatoreignung von Pb und  $\text{SO}_4$ , bzw. der durch sie angezeigte Einfluss hat sich somit im Zeitraum der Untersuchungen an BDF geändert.

Neben den organischen und anorganischen Parametern dienen auch biologische Parameter z.B. als Indikatoren der Lebensraum- und Nutzungsfunktionen (Pawlitzki & Heim 2005). Bodenmikroorganismen reagieren schneller als z.B. die anorganischen Parameter der Festphase auf Veränderungen im Nährstoff- und Wasserhaushalt von Böden (NLfB 2001, Rinklebe 2004). Für verschiedene Fragestellungen, gerade im Hinblick auf kurzfristige Veränderungen, sind die biologischen Parameter somit besser geeignet als die meist träge reagierenden physikalischen oder chemischen Parameter.

Oft reicht jedoch ein einzelner Parameter nicht als Indikator aus und sollte im Verhältnis zu anderen Parametern betrachtet werden. Ein typisches Beispiel ist das C/N-Verhältnis (organischer Kohlenstoff im Bezug zu Gesamt-Stickstoff). Das C/N-Verhältnis gibt Hinweise auf die biologische Aktivität sowie die Qualität der organischen Substanz. So wird das C/N-Verhältnis beispielsweise im Waldbau als Standortindikator verwendet (Beyer 2002). Weite C/N-Verhältnisse sprechen für einen gehemmten Abbau an organischer Substanz; enge Verhältnisse werden häufig an Proben fruchtbarer, oft biologisch sehr aktiver Böden gemessen. Weitere Beispiele aus der Gruppe der mikrobiologischen Parameter sind der metabolische Quotient (Verhältnis von Basal-atmung zur Biomasse) und der Atmungsaktivierungsquotient (Quotient aus BAT und Substrat induzierter Respiration). Beide können beispielsweise Hinweise auf eine gehemmte mikrobielle Aktivität geben, die z.B. durch Stressfaktoren wie stoffliche Belastung oder Versauerung verursacht werden kann (LANUV 2009).

Auch das Untersuchungsgebiet (Historie und Nutzung) kann bei Identifikation geeigneter Parameter zur Bewertung einer oder mehrerer Flächen von Relevanz sein. So kann die Auswahl der zu betrachtenden, geeigneten bodenmikrobiologischen Untersuchungsparameter von der Art der Landnutzung abhängen. Aus den Ergebnissen der BDF in NRW lässt sich ableiten, dass für Proben von Waldflächen und Grünlandflächen ein unterschiedliches Set an zu untersuchenden Stoffen empfohlen werden kann. Auf Grünlandflächen sollten neben den obligatorischen Parametern zusätzlich die zur Messung empfohlene Argininammonifikation sowie die Dehydrogenaseaktivität erhoben werden (LANUV 2009).

Für Aussagen zu räumlichen oder zeitlichen Trends geeignete Indikatoren sollten also immer entsprechend der Fragestellung sowie dem Untersuchungsgebiet gewählt werden. Eingehende Parameter sind auf die zu erwartende Höhe der Veränderungen (z.B. durch Bilanzrechnungen) und Messunsicherheiten zu prüfen. Umgekehrt kann bei einem bestehenden Datenbestand mit bestimmtem Parameterspektrum nicht jede Fragestellung beantwortet werden. Die Auswertung ist somit den Grundlagen anzupassen.

### 3 DATENGRUNDLAGE BASIS-BDF

Als Basis für die statistischen Auswertungen dient ein vom Umweltbundesamt im April 2010 übergebener Datenbestand (Stand UBA April 2010). Darin enthalten sind Analysenergebnisse und Daten zu Profilen und Standorten der BDF der Länder, die bis zum Zeitpunkt der Übermittlung an die Bergische Universität Wuppertal dem Umweltbundesamt vorlagen und in eine einheitliche Datenstruktur überführt werden konnten.

Die Datenbank enthält drei Tabellen mit den Informationen über:

- Stammdaten der Standorte,
- Profilinformatoren,
- Analysenergebnisse der gewonnenen Proben.

Die Stammdaten umfassen neben der Bezeichnung und der Lage weitere standortbezogene Informationen wie z.B. die Flächennutzung und den Bodentyp. Zusätzlich wurden den Standorten Informationen zu verschiedenen räumlichen Einheiten wie Klima- und Naturraum, Ökoklasse oder Bodenregion zugewiesen. Vorliegende Standortinformationen wurden um klimatologische Daten wie z.B. Jahresniederschlag, Sonnenscheindauer und Temperatur ergänzt, die von nahe gelegenen Stationen des deutschen Wetterdienstes übernommen wurden. Es liegen Daten für 778 BDF vor.

Die Profilinformatoren beinhalten u.a. die Horizontbeschreibungen der einzelnen Flächen. Die Horizont Haupt- und Zusatzsymbole, Ober- und Untergrenzen sowie die Hauptbodenart liegen für nahezu alle Horizonte vor. Angaben der Horizontansprache nach KA5 im Gelände, wie z.B. Lagerungsdichte, Humusgehalt und Ausgangsgestein sind nur sehr lückenhaft vorhanden. Es wurden 4.353 Horizonte erfasst.

Die Analysenergebnisse wurden, wenn mehr als eine Messung vorlag, als Mittelwert und Median der durchgeführten Parallelmessungen mitgeteilt. Dies ist für etwa 50 % der mitgeteilten Werte der Fall. Meist konnten zwei bis sechs Werte zur Berechnung von Mittelwert und Median herangezogen werden. Bei den zu aggregierenden Werten wurden in Einzelfällen deutliche Abweichungen einzelner Werte festgestellt. Aus diesem Grund wurden für die Auswertungen in dieser Arbeit die vorliegenden Mediane verwendet.

Bei der Einrichtung der BDF wurde neben der Fläche selbst, der bei Anlage eröffnete Schurf beprobt. Die Proben wurden separat dokumentiert und analysiert. Die Proben von Schurf und Fläche werden jeweils dem entsprechenden Horizont der Profilbeschreibung zugeordnet. Insgesamt wurden 8.380 Bodenproben den verschiedenen Horizonten zugeordnet. Die Anzahl der analysierten Parameter kann von Probe zu Probe stark abweichen. Ergebnisse von 339.790 Messungen verschiedener Parameter liegen vor.

Voraussetzung für die Auswertbarkeit der Messdaten ist eine eindeutige Zuordnung zur jeweiligen Fläche und zu einem Bodenhorizont. Die in der Datenbank enthaltenen Informationen sind jedoch nicht immer eindeutig miteinander zu verknüpfen. Ebenfalls sind in der Datenbank Horizonte einzelner Flächen beschrieben, ohne korrespondierende Analysenergebnisse einer Probe. Nach Ausschluss von Daten, für die nicht alle Informationen (also Flächen- und Profilinformatoren sowie Analysenergebnisse) vorliegen, verbleiben Ergebnisse von:

- 733 Boden-Dauerbeobachtungsflächen,
- 3.792 Horizonten,
- 8.191 Bodenproben,
- 336.306 Messungen.

Die Daten enthalten Messergebnisse für mehr als 400 verschiedene Parameter mit jeweils unterschiedlicher Anzahl an durchgeführten Messungen. Der am häufigsten gemessene Parameter ist mit 5.627 Messungen der pH-Wert in  $\text{CaCl}_2$ . Protactinium ( $^{234}\text{Pa}$ ), ein radioaktives Zerfallsprodukt des Urans, wurde mit drei Messungen am seltensten erfasst. Für über 100 Parameter liegen weniger als 100 Messungen vor. Die Vielzahl der erhobenen Parameter und die differierende Anzahl sind durch das breit angelegte Untersuchungsspektrum mit chemischen, physikalischen und biologischen Messgrößen, die unterschiedlichen Zielsetzungen der Messprogramme der Länder sowie durch spezielle Untersuchungen an einzelnen BDF zu erklären. In Anlage 1 werden die vorliegenden Daten der Messergebnisse mit dem Fokus auf die nach Barth et al. 2001 obligaten Parameter näher beschrieben und bewertet.



## 4 METHODEN

Mit den in Kapitel 3 und der Anlage 1 beschriebenen Daten der Basis-BDF liegt ein großer Datenbestand vor. Ziel der im Rahmen des Projektes durchgeführten Auswertungen ist es, mit Hilfe explorativ statistischer Verfahren, auffällige Strukturen in den Daten zu identifizieren. Dies bedeutet, dass der bundesweite Datenbestand im Hinblick auf Einflüsse untersucht werden soll, die zu Unterschieden in den gemessenen Werten führen. Es gilt zu identifizieren, ob die Änderungen durch räumliche oder zeitliche Heterogenitäten oder andere Ursachen hervorgerufen werden.

Multivariate Verfahren eignen sich vor allem für die explorative Auswertung sehr großer Datenmengen mit erwarteten Interkorrelationen. Neben den verschiedenen gängigen statistischen Methoden (z.B. multiple Regressionsanalysen (Graf-Pannatier et al. 2005), Clusteranalysen (Gupta et al. 2006)) hat sich die Hauptkomponentenanalyse (HKA) durchgesetzt und wird häufig verwendet. Die HKA wird heute routinemäßig in den verschiedensten naturwissenschaftlichen Bereichen zum Aufzeigen von Zusammenhängen und zur Dimensionsreduktion verwendet (James & McColluch 1990). Die HKA wurde und wird auch für bodenkundliche Fragestellungen als geeignetes Mittel zur Auswertung größerer Datenpools verwendet (Gupta et al. 2006; Lange et al. 2006; Mico et al. 2006).

Die genannten etablierten Verfahren zählen alle zu den linearen multivariaten Methoden. Die Anwendung der linearen Verfahren zeigt aber auch Schwächen auf. Datenpools zu naturwissenschaftlichen Themen erfüllen häufig nicht die Anforderungen, welche die linearen statistischen Verfahren an die Datengrundlage stellen (James & McCulloch 1990). In der Regel sind viele der dominierenden Beziehungen in den Daten der Umweltforschung nicht linear.

Auch kann die Datenaufbereitung zur Verwendung von Daten in linearen Modellen oder Analyseverfahren die spätere Interpretation beeinflussen (Lek et al. 1996). Zusätzlich können in großen Datenbeständen lineare Strukturen durch versteckte, nicht lineare Zusammenhänge bedingt sein (Geng et al. 2005). Zur sinnvollen Interpretation scheinbarer linearer Strukturen ist somit das Aufdecken möglicher nicht linearer Einflüsse notwendig. In der Boden-Dauerbeobachtung werden solche nicht linearen Verfahren bislang noch nicht verbreitet eingesetzt.

Im Gegensatz zu den linearen statistischen Verfahren sind künstliche neuronale Netzwerke und verschiedene weitere nicht lineare statistische Verfahren geeignet, solche nicht linearen Daten besser untersuchen zu können (Lek et al. 1996). Zu diesen nicht linearen statistischen Verfahren zählen die Selbst-organisierende Karte, im Folgenden „SOK“ genannt (Kohonen 2001) und das „Isometric feature mapping“ (Tenenbaum 2000), im Folgenden „Isomap“ genannt. Beide Verfahren sind im Bereich der Umweltforschung in den letzten Jahren mit Erfolg angewandt worden. Isomaps fanden beispielsweise Anwendung in der Klimatologie (Gamez et al. 2004), Hydrologie (Lischeid & Bittersohl 2008) und Pflanzenökologie (Mahecha et al. 2007). Mit SOK wurden z.B. Daten aus der Hydrologie (Wagner et al. 2003; Lischeid 2009), Zoologie (Hopton & Mayer 2006; Brosse et al. 2001) und auch der Bodenkunde (Ito et al. 2008; Kothari & Islam 1999) untersucht.

Bereits durchgeführte Arbeiten im Bereich der Bodenkunde zeigen die Möglichkeiten der SOK auf, komplexe Sachverhalte wie das Nitrifikationspotenzial von Böden anhand weniger Eingangsgrößen bzw. Parameter sehr gut abzubilden und zu prognostizieren.

Die geringe Zahl notwendiger Parameter erhöht die praktische Anwendbarkeit der SOK (Ito et al. 2008). Die Fähigkeit der SOK, sowohl räumliche als auch zeitliche Entwicklungen bodenkundlicher Informationen abzubilden, wurde am Beispiel der Bodenfeuchte bereits nachgewiesen (Kothari & Islam 1999).

Für eine bundesweite Auswertung von Daten der Bodendauerbeobachtungsflächen ist es aus oben genannten Gründen sinnvoll, auf nicht lineare statistische Verfahren zurückzugreifen. In diesem Projekt sollen Anwendbarkeit und möglicher Informationsgewinn der Isomap und der SOK auch für die Prüfung der Indikatoreignung von Parametern und die Messhäufigkeit für den Nachweis von Trends getestet und belegt werden.

Zur Untersuchung der Basis-BDF-Daten wird das Verfahren der SOK mit anschließendem Sammon's Mapping verwendet. Ziel ist es dabei, Muster im Datenbestand zu identifizieren, die durch die unterschiedlichen Stoffkonzentrationen bedingt sind, Hinweise auf steuernde Einflussfaktoren abzuleiten sowie multivariate Trends zu bestimmen.

Zur Analyse der Bodenlösungsdaten eines Intensiv-Monitorings wird das Isomap-Verfahren angewendet. Das Isomap-Verfahren eignet sich in besonderer Weise zur Prozessidentifikation und kann somit eines der Ziele der Intensiv-BDF erfüllen. Die zur Auswertung der Daten verwendeten Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt.

#### **4.1 Selbst organisierende Karte mit Sammons Mapping**

Die Selbst organisierende Karte (SOK), ein Typ der Künstlichen Neuronalen Netzwerke, wurde bereits in den frühen 1980er Jahren von Kohonen vorgestellt (Kohonen 1982). Die SOK ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur Dimensionsreduktion mit dem Ziel der – in diesem Fall zweidimensionalen – grafischen Darstellung der Ergebnisse. Das Verfahren stellt keinerlei Ansprüche an die Verteilung der Daten, sodass lediglich eine z-Transformation (auf Mittelwert = 0, Standardabweichung = 1) der Werte der gemessenen Parameter durchgeführt werden muss, um Verzerrungen der Ergebnisse durch die unterschiedlichen Wertespanssen zu vermeiden. Die wichtigsten Schritte des Verfahrens seien hier vereinfacht beschrieben. Hinsichtlich weiterführender Informationen sowie der hinter den Verfahren stehenden mathematischen Grundlagen wird auf Kohonen (2001) und Sammon (1969) verwiesen.

Der erste Schritt bei der Erstellung der SOK ist die Erstellung eines Netzes mit regelmäßiger Anordnung von einzelnen Einheiten, nachfolgend Knotenvektoren genannt. Die Anzahl der Knotenvektoren entspricht der Anzahl der Dimensionen der zu untersuchenden Daten. Werden beispielsweise 20 Parameter untersucht, werden Knotenvektoren mit 20 Dimensionen zufälliger Ausprägung erzeugt. Die Knotenvektoren können somit als künstliche Datensätze angesehen werden. In Abbildung 2 ist ein solches Netz mit drei Dimensionen (vergleichbar mit z.B. drei gemessenen Parametern) dargestellt.

Im Anschluss an die Erstellung erfolgt das Training des Netzes. Nacheinander wird jeder einzelne Datensatz dem Knotenvektor zugeordnet, dem er am ähnlichsten ist (Abbildung 3). Dieser Knotenvektor wird in seiner Ausprägung so geändert, dass er dem zugewiesenen reellen Datensatz etwas ähnlicher wird. Die an diesen Knotenpunkt angrenzenden Knotenpunkte werden ebenfalls, jedoch in abgeschwächter Form, in Richtung des Datensatzes verändert. Dieser Prozess wird mehrere Hundert- oder Tausendmal wiederholt, wobei die Stärke der Veränderung der betroffenen Knotenvektoren nach und nach reduziert wird. Im Fall des im Kap. 5.1.1 beschriebenen Datenbestandes wurde der Vorgang beispielsweise 800-mal wiederholt.

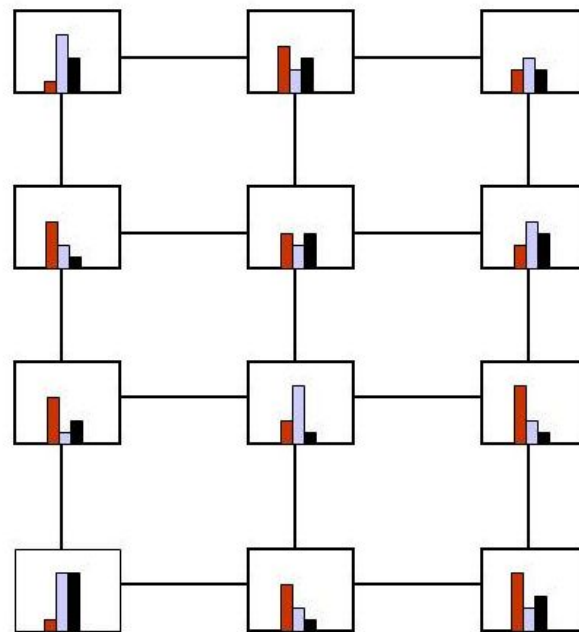


Abbildung 2: Initiales Netz der SOK

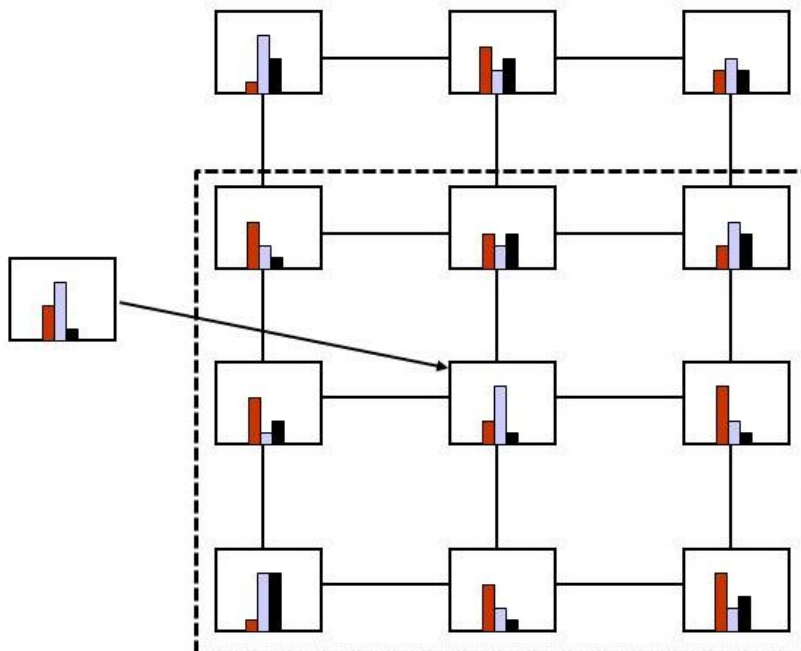


Abbildung 3: Training der SOK – Zuordnung einer Zeile des Beobachtungsdatensatzes zum ähnlichsten Knotenvektor der SOK

Am Ende des Trainings ist das Netz geordnet (Abbildung 4), d.h. die im Netz benachbarten Knotenvektoren weisen jeweils eine große Ähnlichkeit auf. Die Knotenvektoren können durch Koordinaten beschrieben werden, die sich aus der Lage im Netz ergeben. Jeder Datensatz wird dem Knotenvektor zugeordnet. Einem Knotenvektor können mehrere Proben zugewiesen werden. Knotenvektoren denen kein Datensatz zugewiesen wurde, werden nicht weiter berücksichtigt. Die Koordinaten der Knotenvektoren werden auf die zugewiesenen Datensätze übertragen. Jeder Datensatz hat nun eine Koordinate, die in einer zweidimensionalen Darstellung gezeigt werden kann. Das vorherige Netz ist nun aufgelöst (Abbildung 5).

Im letzten Schritt werden die Koordinaten der Knotenvektoren, die bis dahin in einem regelmäßigen Verband angeordnet waren, mittels des Sammon's Mapping so verändert, dass die Distanzen in der zweidimensionalen Abbildung möglichst proportional zu den Unähnlichkeiten im ursprünglichen Datenbestand sind. Das verwendete Abstandsmaß ist die euklidische Distanz. Die regelmäßige Netzstruktur wird dabei aufgelöst. Dies bedeutet, dass die Abstände zwischen den einzelnen Datensätzen nun die Ähnlichkeit der Datensätze widerspiegeln. Geringe Entfernungen zwischen den Datensätzen zeigen also eine große Ähnlichkeit der Daten an (Abbildung 6). Zur Interpretation der Daten können die Koordinaten als Punkte dargestellt (z.B. Abbildung 7) und entsprechend den zum Datensatz vorliegenden Informationen zusätzlich farblich gekennzeichnet werden. Die Kombination der SOK und des Sammon's Mapping wird im Folgenden als SOK-SAM bezeichnet.

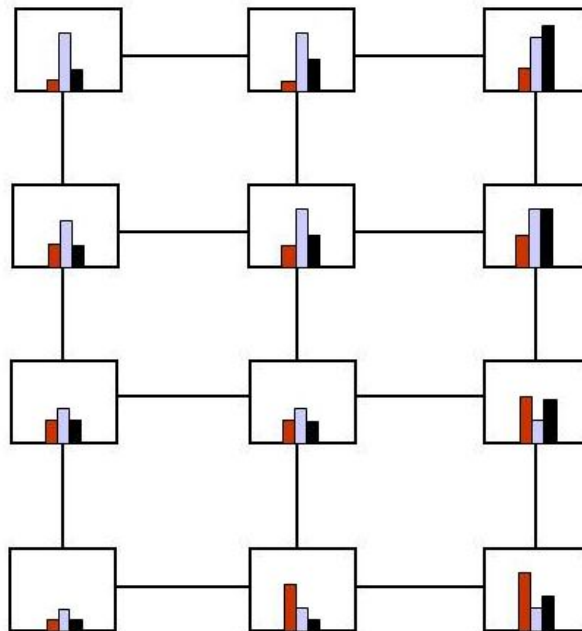


Abbildung 4: Trainiertes Netz der SOK mit veränderten Knotenvektoren

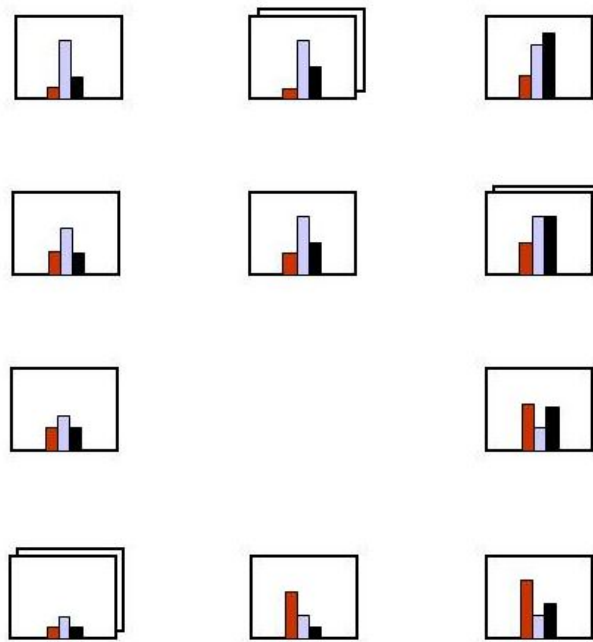


Abbildung 5: Übernahme der Koordinaten der Knotenvektoren, denen jeweils eine Zeile des Beobachtungsdatensatzes zugeordnet wurde

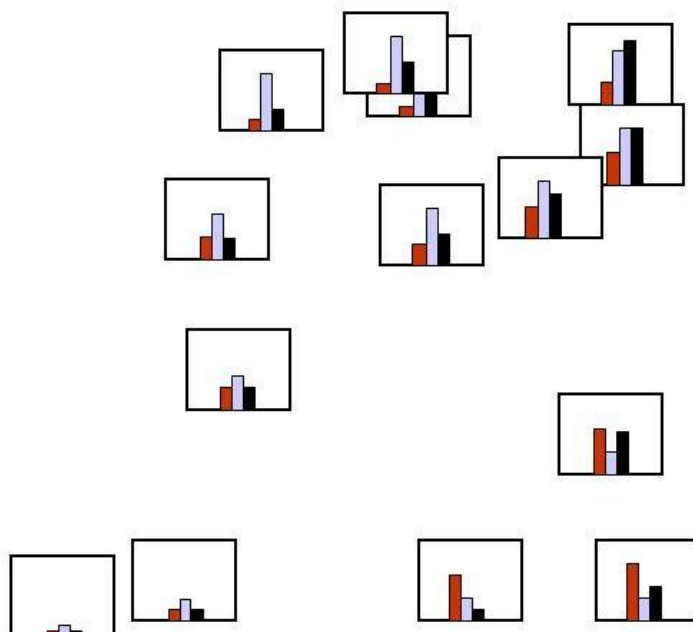


Abbildung 6: Lage der Datenvektoren nach Sammon's Mapping

## 4.2 Isometric feature mapping

Das hier verwendete, von Tenenbaum et al. im Jahr 2000 veröffentlichte Isomap-Verfahren kann als nicht-lineare Variante der Hauptkomponentenanalyse verstanden werden. Die Zahlenwerte in den einzelnen Zeilen des Datenbestandes (z.B. Konzentrationsangaben) werden nach vorhergehender spaltenweiser z-Normalisierung wie Koordinaten in einem hochdimensionalen Koordinatensystem behandelt. Während die Hauptkomponentenanalyse letztlich die Unähnlichkeiten zwischen den verschiedenen Zeilen als lineare, d.h. euklidische Distanzen in dem hochdimensionalen Koordinatensystem berechnet, wird mit dem Isomap-Verfahren versucht, nicht-lineare Strukturen in diesem Koordinatensystem durch schrittweise lineare Approximation zu erfassen.

Im Wesentlichen durchläuft das Verfahren die drei folgenden Schritte (Tenenbaum et al. 2000):

- (I) Im ersten Schritt wird der Parameter  $k$  festgelegt, d.h. die Anzahl der ähnlichsten Datensätze des Datenbestandes, zu denen dann jeweils für jeden Datensatz die euklidischen Distanzen bestimmt werden.
- (II) Im zweiten Schritt wird eine Distanzmatrix aufgestellt. Die Distanz zwischen zwei Punkten (Datensätzen) entspricht der kleinstmöglichen Summe der im ersten Schritt berechneten Punkt-zu-Punkt-Abstände.
- (III) Im Anschluss daran erfolgt die Singulärwertzerlegung der Matrix. Die Komponenten und einzelnen Parameterladungen werden berechnet.
- (IV) Iterativ wird die Projektion der Isomap durch Variation des Parameters  $k$  optimiert.

Zur Ermittlung der optimalen Anzahl von  $k$  muss das Verfahren für unterschiedliche  $k$ -Werte nach Trial-and-error-Methode durchlaufen werden. Die Bestimmung des optimalen  $k$ -Wertes ist relevant, da die Aussagegenauigkeit des Ergebnisses entscheidend durch die in (II) aufgestellte Distanzmatrix beeinflusst wird. Würde  $n-1$  als  $k$  gewählt, würde die Distanzmatrix in (II) die euklidischen Distanzen wiedergeben. Die Ergebnisse würden dann der Hauptkomponentenanalyse entsprechen. Kleinere  $k$ -Werte führen zur schrittweisen Annäherung an mögliche nicht-lineare Strukturen in den Daten und können somit beim Vorliegen solcher Strukturen bessere Ergebnisse erzielen als lineare Verfahren (Tenenbaum et al. 2000, Lischeid & Bittersohl 2008). Ein zu geringes  $k$  hingegen kann zum Verlust wertvoller Informationen führen (Gamez et al. 2004).

Zur Bestimmung der Ladungen, d.h. der Enge des Zusammenhangs zwischen einzelnen Hauptkomponenten und einzelnen Variablen des Datenbestandes, wurde anstelle der für die Hauptkomponentenanalyse gebräuchlichen Korrelationskoeffizienten der Rang-Korrelations-Koeffizient nach Spearman verwendet, der auch nicht-lineare, jedoch notwendigerweise monotone Zusammenhänge erfasst. Die berechneten Komponenten und Ladungen können in gleicher Weise wie die der Hauptkomponentenanalyse interpretiert werden. Die Komponenten sind nach dem Anteil der durch sie erklärten Varianz geordnet (vgl. Tabelle 8, S. 76). Die Ladungen der Parameter werden mit zunehmender Komponentenzahl generell kleiner. Um eine Interpretation der Komponenten zu erleichtern, wurden alle Komponenten (mit Ausnahme der ersten Komponenten) auf der Basis der Residuen berechnet. Die Residuen wurden bestimmt, indem von den beobachteten Werten die Ergebnisse einer Regression mit den vorhergehenden Hauptkomponenten abgezogen wurden. Zur Interpretation der Ergebnisse werden au-

ßerdem die Werte der Komponenten als Maß der Ausprägung eines Prozesses oder einer Einflussgröße für die einzelnen Datensätze in Box-Whisker-Plots dargestellt. Der graue Bereich der Box zeigt das 25. und 75. Perzentil der dargestellten Daten. Der untere und obere Whisker zeigen den Wert mit der größten Abweichung von der Box innerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstandes (z.B. Abbildung 35, S. 79).

## 5 DATENAUSWERTUNG BASIS-BDF

Die Datenauswahl und -bearbeitung erfolgte in MS Access und MS Excel. Anschließende Auswertungen wurden mit dem Programm „R“ Version 2.10.0 durchgeführt. Zusätzlich wurden die Erweiterungen *kohonen* (Version 2.0.5) für die SOK und *MASS* (Version 7.3-4) für das Sammons Mapping verwendet (R Development Core Team 2006).

### 5.1 Datenauswahl und -bearbeitung

Die Datenauswahl erfolgte nach verschiedenen Kriterien. Das maßgebliche Kriterium der Datenauswahl ist nach Rücksprache mit dem UBA und den Betreibern der BDF die größtmögliche Flächendeckung. Neben der Flächenabdeckung ist die Stichprobenanzahl ein wichtiges Kriterium, um sichere Ergebnisse zu erzielen. Um die Ergebnisse nicht schon vor der Auswertung zu beeinflussen, werden bei solchen explorativen Auswertungen nach Möglichkeit alle Daten verwendet, die plausibel erscheinen. Durch die parallele Betrachtung von Böden unterschiedlichster Genese (z.B. Ranker, Braunerde, Vega und Moor), verschiedener Tiefenstufen (Auflagen, Ober- und Unterbodenhorizonte), Nutzungen und Naturräume ist eine Vorauswahl hinsichtlich relevanter Einflussgrößen nicht sinnvoll möglich. Zusätzlich ist nicht bekannt, ob die vorliegenden Daten der BDF geeignet sind, verschiedene, über Indikatoren abbildbare Einflüsse zu analysieren. Dementsprechend ist auch eine Auswahl von als Indikator geeigneten Parametern nicht durchführbar. Eine Fokussierung der Betrachtung im Hinblick auf bekannte oder erwartete Einflüsse widerspricht zusätzlich dem Ansatz der explorativen Auswertung, der in dieser Arbeit verfolgt wird. Eine Auswahl von Daten könnte dazu führen, dass bestimmte räumliche oder zeitliche Trends nicht, kaum oder überproportional stark bewertet werden.

#### 5.1.1 Datenauswahl und -bearbeitung: Anorganik

Wie oben beschrieben stellen die obligaten anorganischen Parameter der chemischen Analysen die beste Datengrundlage im Hinblick auf die flächenhafte Verbreitung dar. Wie Tabelle 10 (Seite 115) zeigt, sind die meisten Messungen für pH ( $\text{CaCl}_2$ ), den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC), durch Königswasser extrahierbare Schwermetalle ( $n > 4.000$ ) sowie die potentielle KAK und N nach Trockenveraschung ( $n > 3.000$ ) durchgeführt worden. In einem ersten Schritt wurden dementsprechend nur anorganische Parameter berücksichtigt.

Weitere Anforderungen an die Datengrundlage werden durch die gewählten statistischen Verfahren gestellt. Um Auswertungen durchführen zu können, ist es notwendig, dass in einer Probe (einem Datensatz) alle zu untersuchenden Stoffe auch tatsächlich gemessen, jedoch nicht zwingend nachgewiesen wurden.

Der verwendete Datenbestand weist – aufgrund der zeitlich parallelen Erstellung – bisher noch keine Methoden-Codierung nach dem in Teil A des Berichts beschriebenen Schema auf. Für die folgende Untersuchung wurden unterschiedliche Analysemethoden der obligaten anorganischen Parameter zusammengefasst. Die bereits im Projektteil A erarbeiteten Informationen zu den verschiedenen Untersuchungsmethoden (z.B. aus Gesprächen mit BDF-Betreibern und Laboren) führen zum bestmöglichen Ergeb-



nis. Für jeden Stoff wurden die verwendeten Methoden auf eine gemeinsame Verwendung geprüft. In Tabelle 2 ist ein Zusammenfassen verschiedener Analysemethoden für den Parameter Cadmium exemplarisch dargestellt. Nachdem die verschiedenen Methoden aggregiert wurden, konnten die verwendbaren Daten identifiziert werden.

Tabelle 2: Zusammenfassung von Analysemethoden

| Parameter | Untersuchungsmethode                             | Parameter Auswertung |
|-----------|--------------------------------------------------|----------------------|
| Cd        | KW (DIN 38414-7, DIN ISO 11446)                  | Cd-Königswasser      |
| Cd        | KW (DIN ISO 11466)                               | Cd-Königswasser      |
| Cd        | KW (Hausmethode I)                               | Cd-Königswasser      |
| Cd        | Gesamtgehalt (Hausmethode I)                     | Cd-gesamt            |
| Cd        | Gesamtgehalt (Hausmethode II)                    | Cd-gesamt            |
| Cd        | Gesamtgehalt (HFA 3.3.2)                         | Cd-gesamt            |
| Cd        | Gesamtgehalt (HNO <sub>3</sub> -Druckaufschluss) | Cd-gesamt            |
| Cd        | Gesamtgehalt (nach Ruppert)                      | Cd-gesamt            |

Um die Stichprobenanzahl einzelner Stoffe zu erhöhen, wurde geprüft, ob vorliegende Messergebnisse anderer Parameter umgerechnet werden können. Für die Parameter pH und TOC konnte die Stichprobenanzahl durch folgende Arbeitsschritte erhöht werden:

- Fehlende TOC-Gehalt einzelner Proben wurden durch die Differenz der mitgeteilten Gesamtkohlenstoffgehalte und der gemessenen Menge an anorganischem Kohlenstoff (TIC) ergänzt. Es konnten 430 Werte berechnet werden.
- Fehlende Messungen des pH-Wertes in CaCl<sub>2</sub> wurden auf der Basis vorliegender Parallelmessungen in KCl oder H<sub>2</sub>O berechnet. Die Umrechnungen erfolgten bodenartenspezifisch. Insgesamt wurden 223 pH-Werte auf diese Weise ermittelt. Bekannte Unsicherheiten bei der Umrechnung werden hingenommen. Aufgrund der vorliegenden Parallelmessungen kann jedoch angenommen werden, dass realistische pH-Wert Bereiche ermittelt werden.
- Die Ergebnisse der N-Analysen nach modifiziertem Kjeldahlverfahren (DIN ISO 11261) und der trockenen Verbrennung (DIN ISO 13878, DIN ISO 10694) wurden zusammengefasst. Die DIN ISO 13878 stellt im Anhang A fest, dass die Unterschiede der N-Gehalte nach trockener Verbrennung (DIN ISO 13878) zum modifiziertem Kjeldahlverfahren auf der Basis von zwei Laboratoriumsvergleichsuntersuchungen nicht statistisch signifikant waren. Durch die Zusammenfassung stehen nach Ergänzung der 1.434 Messungen mit dem modifizierten Kjeldahlverfahren über 5.000 Gesamt-Stickstoffmessungen zur Verfügung.

Im Anschluss an die Bearbeitung der Methoden wurden die Kriterien der Flächenabdeckung und der Vollständigkeit der Datensätze geprüft. Die häufig gemessenen Parameter der KAK wurden in vielen Fällen nicht parallel zu den Schwermetallen gemessen. Untersuchungen von durch Königswasser extrahierbare Schwermetallen weisen im Vergleich zu den Parametern der KAK eine bessere Flächenabdeckung auf. Um eine möglichst große Grundgesamtheit bei hoher Flächenabdeckung zu erreichen, entfallen somit die unterschiedlichen KAK-Parameter.

Es verbleiben 6.445 Proben, an denen drei bis neun der untersuchten durch Königswasser extrahierbare Schwermetalle (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn), TOC, N<sub>ges</sub> und pH-CaCl<sub>2</sub> gemessen wurden. Nicht vorhandene Informationen zu einem Parameter in einem Datensatz sind verfahrensbedingt nicht zulässig. Es ist jedoch möglich, nicht vorhandene Daten mit berechneten Werten zu ergänzen. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Menge an zu ergänzenden Informationen nicht zu groß ist. Das Ergänzen fehlender Messungen würde die Aussagekraft des Ergebnisses verringern, wenn zu viele Informationen ergänzt würden. Datensätze mit weniger als acht gemessenen Parametern werden ausgeschlossen. Dabei war auffällig, dass

- Für über 2.000 Proben liegen nur Ergebnisse der drei Parameter TOC, pH-CaCl<sub>2</sub> und N<sub>ges</sub> vor.
- Für über 400 Proben liegen lediglich Informationen zu den mit Königswasser extrahierbaren Schwermetallen vor.

Für die weiterführenden Auswertungen stehen insgesamt Analysenergebnisse von 3.724 Proben zur Verfügung. Für einzelne Parameter von 722 Proben liegen keine verwendbaren Messergebnisse vor. Auch eine Umrechnung von mit anderen Methoden gemessenen Werten war nicht möglich. Da fehlende Informationen im Verfahren nicht zulässig sind, müssen diese durch gesetzte bzw. berechnete Werte ergänzt werden.

Um die fehlenden Werte der Parameter (ausgenommen TOC) zu ergänzen, wurden Mittelwerte der vorhandenen Analysen von entsprechenden Horizontalsymbolen und Hauptbodenarten gleicher Nutzung gebildet. Für G- und S-Horizonte wurde zusätzlich zwischen reduzierenden und oxidierenden Bedingungen auf Basis der Horizontbeschreibung unterschieden.

Zur Berechnung der TOC-Gehalte war die Geländeansprache der Humusstufe nach KA4 ein wesentliches Kriterium. Aus den gemessenen TOC-Gehalten von Horizonten mit entsprechender Nutzung, Horizontalsymbol, Hauptbodenart und Humusstufe wurden Mittelwerte berechnet. Mit diesen Mittelwerten wurden die fehlenden Daten aufgefüllt. Die Anzahlen der notwendigen und durchgeführten Ergänzungen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Anzahlen der Ergänzung fehlender Parameter – Anorganik

| Parameter | Cd  | Cu | Cr | Ni | Pb | Zn | TOC | N <sub>ges</sub> | pH-CaCl <sub>2</sub> |
|-----------|-----|----|----|----|----|----|-----|------------------|----------------------|
| Leerdaten | 148 | 23 | 29 | 1  | 4  | 0  | 200 | 204              | 113                  |

Im Gegensatz zur einfachen Auffüllung fehlender Werte mit dem Mittelwert verspricht das beschriebene, angewendete Verfahren bessere Ergebnisse. Aufgrund der sehr heterogenen Daten, z.B. hinsichtlich der Ausgangsmaterialien und Tiefenstufen, erscheint das angewandte Verfahren sinnvoll. Dadurch, dass die Auffüllung fehlender Werte in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften vorgenommen wurde, ist die Wahrscheinlichkeit höher, einen realitätsnahen Wert einzusetzen.

### 5.1.2 Datenauswahl und -bearbeitung: Organik / Anorganik

Neben einer ausschließlichen Betrachtung der anorganischen Parameter wurde eine weitere Auswahl an Proben getroffen, die zusätzlich organische Schadstoffe berücksichtigt. Das maßgebliche Kriterium war hierbei, die Grundgesamtheit möglichst groß zu halten. Auch hier ist die Grundlage der Auswertung der gesamte Datenbestand ohne vorherige Datenauswahl.

Der wichtigste Arbeitsschritt war die Zuordnung der Analysenergebnisse organischer Parameter zu Ergebnissen der anorganischen Parameter. Da die Parameter meist an unterschiedlichen Proben genommen wurden, können sowohl Tiefenstufen als auch die Zeitpunkte der Beprobungen abweichen. Die Zuordnung der Proben erfolgte über die mit den Proben verbundenen Horizontangaben. Abweichende Entnahmetiefen von Proben wurden dabei vernachlässigt.

Abweichende Zeiträume von Proben zur Bestimmung der organischen und anorganischen Parameter wurden toleriert, wenn nicht mehr als 24 Monate zwischen der Entnahme der Proben der einzelnen Parametergruppen vergangen waren. Zusätzlich musste ein Abstand zu einer Wiederholungsbeprobung mindestens 36 Monate sein. In vielen Fällen war eine Zuordnung der gemessenen organischen Parameter zu Ergebnissen der Parametergruppe Anorganik nicht möglich, da keine entsprechenden Proben vorlagen.

Als zusätzliche verwendbare Parameter konnten 10 organische Schadstoffe identifiziert werden, sodass 19 Parameter untersucht werden konnten. Die anschließende Aufbereitung ist – mit einer Ausnahme – identisch mit der bereits in Kap. 5.1.1 beschriebenen Vorgehensweise. Während bei der vorherigen Datenaufbereitung Datensätze mit mehr als einem nicht gemessenen Parameter ausgeschlossen wurden, wurden aufgrund der Vergrößerung des Parameterspektrums zwei nicht gemessene Parameter akzeptiert. Die untersuchten Parameter und notwendige Ergänzungen von Daten sind in Tabelle 4 dargestellt. Für die weiterführenden Auswertungen stehen insgesamt Analysenergebnisse von 489 Proben zur Verfügung.

Tabelle 4: Anzahlen der Ergänzung fehlender Parameter – Organik / Anorganik

| Parameter Anorganik | Ergänzungen |     | Parameter Organik   | Ergänzungen |
|---------------------|-------------|-----|---------------------|-------------|
| Cd                  | 50          | PAK | Benzo(a)pyren       | 0           |
| Cr                  | 0           |     | Benzo(b)fluoranthen | 3           |
| Cu                  | 5           |     | Benzo(ghi)perylene  | 7           |
| Ni                  | 1           |     | Benzo(k)fluoranthen | 0           |
| Pb                  | 0           |     | Fluoranthen         | 0           |
| Zn                  | 0           | PCB | PCB 101             | 15          |
| TOC                 | 33          |     | PCB 138             | 2           |
| N                   | 21          |     | PCB 153             | 1           |
| pH                  | 18          |     | PCB 180             | 1           |
|                     |             |     | Hexachlorbenzol     | 17          |

## 5.2 Ergebnisse der Auswertungen ausgewählter anorganischer Parameter

### 5.2.1 Darstellung der Ergebnisse

Das Ergebnis der SOK-SAM ist in Abbildung 7 als Scatterplot dargestellt. Die Lage und damit die Abstände der Punkte zueinander wurden unter Verwendung der Ergebnisse aller untersuchten Parameter ermittelt (vgl. Kap 4.1). Dies bedeutet, dass die Abstände der Punkte in der zweidimensionalen Darstellung weitestgehend den Unterschieden im x-dimensionalen Raum entsprechen, wobei x der Anzahl der untersuchten Parameter entspricht.

#### ***Hinweis zur Interpretation***

- *Die Beschriftung der Achsen dient ausschließlich zur Orientierung bei der Beschreibung der Daten.*
- *Ein X- oder Y-Wert allein trifft generell keinerlei Aussage über den Gehalt eines einzelnen Stoffes. Ein Punkt mit hohen X- oder Y-Werten zeigt also nicht zwingend hohe Gehalte eines Stoffes oder aller Stoffe der zugehörigen Probe an.*
- *Der Zusammenhang von der Höhe der gemessenen Werte und der Lage im Plot kann für jeden untersuchten Stoff anders aussehen.*
- *Zur Bewertung eines einzelnen Punktes ist die Lage in der Abbildung im Vergleich zu den anderen dargestellten Punkten wichtig.*
- *Die Lage der Punkte in der Abbildung und deren Aussage wird erst im Vergleich mit der Darstellung der anderen Punkte verständlich. Die Lage von Punkten zueinander ist immer stoffspezifisch zu bewerten.*

Die statistischen Kennzahlen der untersuchten Stoffe, die in den Abbildungen dargestellt werden, können der Anlage 3 entnommen werden (Tabelle 22). Die zweidimensionale Darstellung der Ergebnisse kann 98 % der im Datensatz vorhandenen Varianz abbilden.

Der Großteil der Datenpunkte findet sich in einem Kernbereich von X (-5 bis 3) und Y (-9 bis 4) im Plot wieder (vgl. Abbildung 7 – grüner Rahmen). Die Punkte außerhalb dieses Kernbereiches können meist einzelnen Standorten zugeordnet werden. Die im Bereich X (-6 bis -19) und Y (4 bis 10) befindlichen Daten können einem einzelnen Horizont bzw. unterschiedlichen Horizonten von zwei Flächen zugeordnet werden. An den Proben dieser Horizonte wurden untypische, extrem hohe  $N_{ges}$ -Werte gemessen. Es sind die 14 höchsten  $N_{ges}$ -Gehalte im untersuchten Datenbestand (vgl. Abbildung 8 – rote Markierung). Eine wahrscheinliche Ursache ist ein Kommafehler oder Umrechnungsfehler von Einheiten, da die Werte um etwa den Faktor 10 zum wahrscheinlichen Wert erhöht sind. Andere Punkte weit außerhalb des Kernbereichs sind einem Auenboden mit stark erhöhten Schwermetallgehalten zuzuordnen. Zur Identifikation von regelhaften Veränderungen im Datenbestand wird im Folgenden der Fokus auf den Kernbereich (grüne Markierung) gelegt.

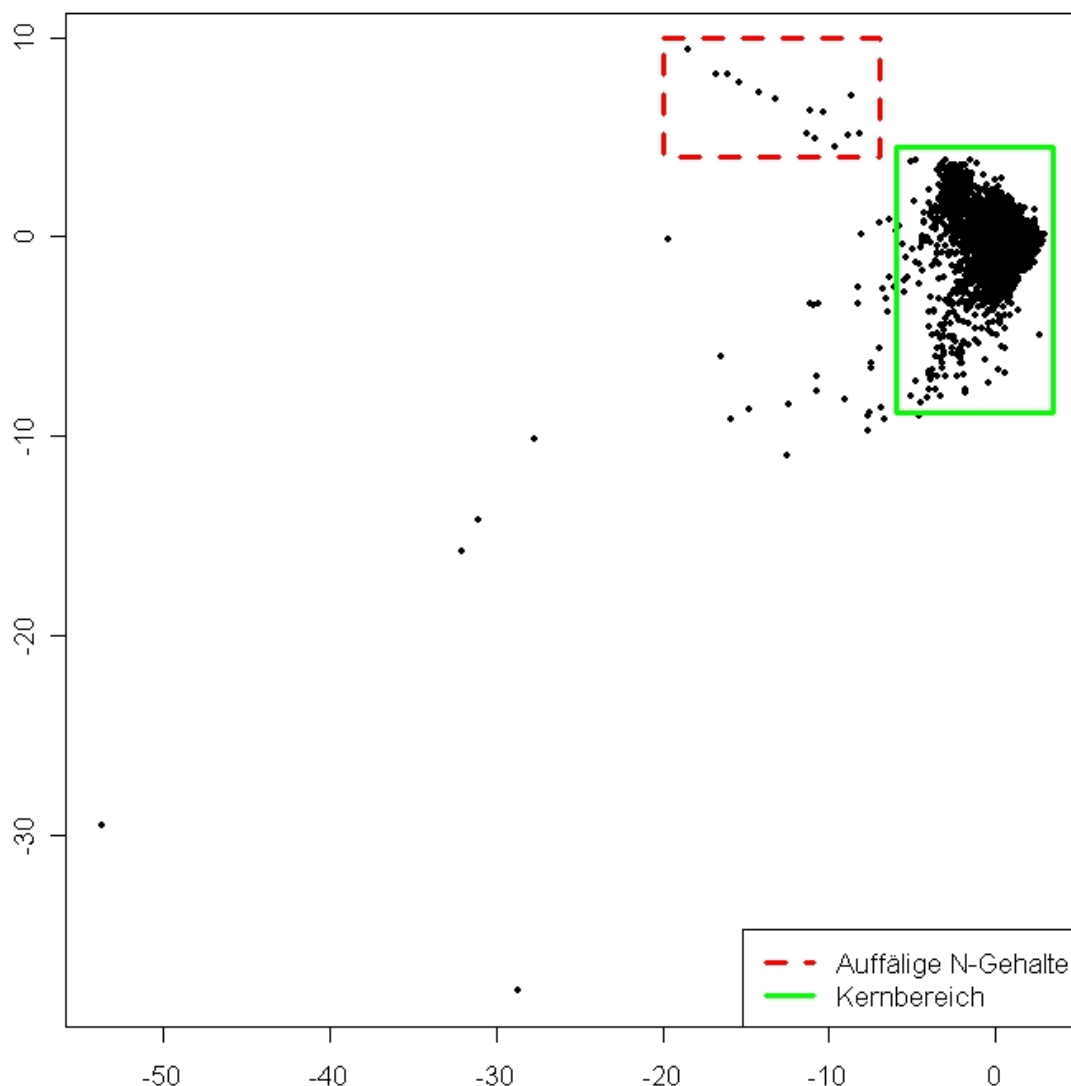


Abbildung 7: Darstellung der SOK-SAM Koordinaten

Die nähere Darstellung des Kernbereichs (Abbildung 8) zeigt, dass sich die Datenpunkte in etwa entlang einer Linie teilen lassen. Der Linie liegt keine Berechnung zu Grunde, sie dient (wie die Beschriftung der X- und Y-Achse) lediglich der Orientierung. Ein großes Cluster (rechts der Linie) und ein kleineres Cluster (links der Linie) können voneinander getrennt werden. Die beiden Cluster streuen deutlich. Punkte außerhalb der Cluster finden sich meist zwischen den Clustern und der linken unteren Ecke ( $X \approx -5$ ;  $Y \approx -9$ ) wider. Diese grobe Zweiteilung im Muster weist auf systematische Unterschiede im Gesamtdatenbestand hin.

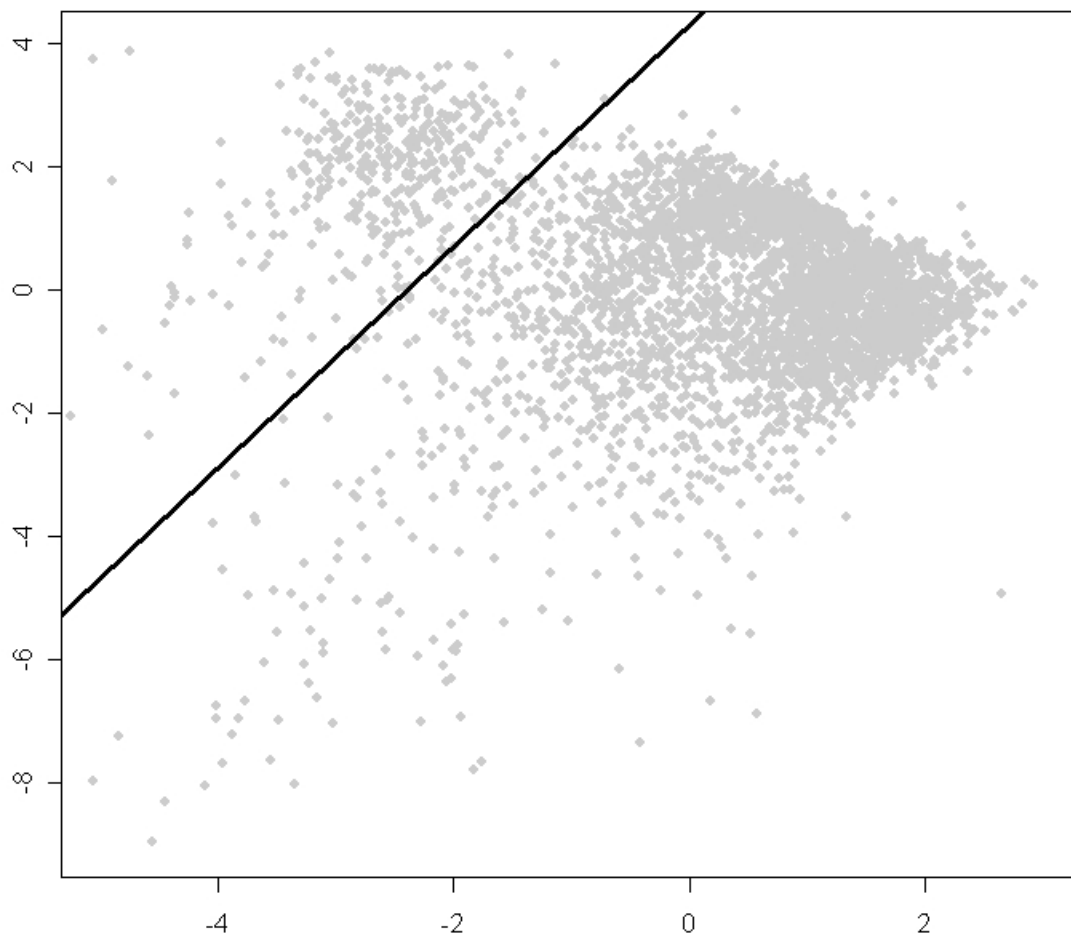


Abbildung 8: Darstellung der SOK-SAM-Koordinaten des Kernbereiches

### Unterscheidung der organischen und mineralischen Horizonte

Der kleinere Cluster links der Linie grenzt sich maßgeblich durch hohe Gehalte an TOC und  $N_{ges}$  vom größeren Cluster ab (Abbildung 9). Die höchsten TOC- und  $N_{ges}$ -Gehalte der in Abbildung 9 dargestellten Proben sind meist im kleinen Cluster oder am linken Rand des größeren zu finden. Die statistischen Kennzahlen zu den in den Abbildungen dargestellten Klassen können Tabelle 22 entnommen werden. Ein genereller Anstieg der Gehalte an TOC und  $N_{ges}$  von z.B. rechts nach links in der Abbildung ist nicht festzustellen. Lediglich die in Abbildung 9 dargestellten hohen Gehalte können von anderen Proben abgegrenzt werden. Die Punkte des kleineren Clusters können bis auf wenige Ausnahmen durch die Profilbeschreibungen den organischen Horizonten (H-, L- und O-Horizonte) zugewiesen werden.

Die Daten können somit in Proben aus mineralischen Horizonten (im Wesentlichen ein großes Cluster rechts der durchgezogenen Linie) und organischen Horizonten unterschieden werden (links der Linie - hauptsächlich das kleine Cluster). Diese Trennung der organischen (links) und mineralischen Horizonte (rechts) entlang der Hilfslinie ist eines der auffälligsten Muster.

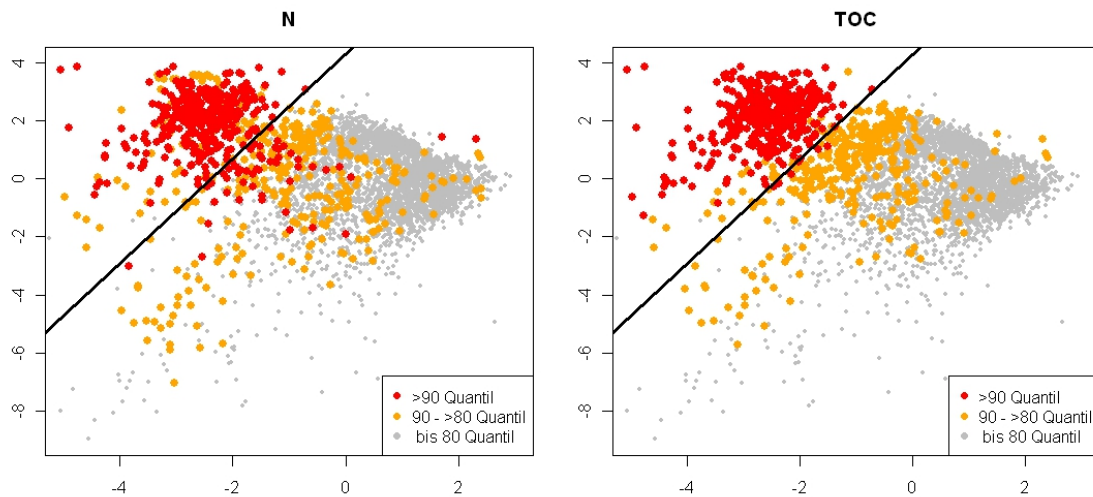


Abbildung 9: TOC- und  $N_{ges}$ -Gehalte

## Flächennutzung

Die deutliche Trennung des Clusters durch die TOC und  $N_{\text{ges}}$ -Gehalte zeichnet sich auch bei der Betrachtung der Flächennutzung ab. Die in Abbildung 9 gekennzeichneten hohen TOC- und  $N_{\text{ges}}$ -Gehalte (>90. Quantil) sind nahezu alle an Standorten unter wald- oder forstwirtschaftlicher Nutzung gemessen worden. Nur wenige Punkte im oberen Bereich des kleinen Clusters (Y-Werte  $\approx 3$ ) können einzelnen Grünland- oder Ackerflächen zugeordnet werden (Abbildung 10). Die in Abbildung 9 dunkelgrau hervorgehobenen Punkte, mit ebenfalls hohen Gehalten (> 80. – 90. Quantil) an TOC und  $N_{\text{ges}}$  liegen meist am linken Rand des großen Clusters. Sie repräsentieren in den meisten Fällen Proben, die sauren und humosen mineralischen Horizonten von Flächen unter wald- oder forstwirtschaftlicher Nutzung entnommen wurden (Abbildung 10). Die gestrichelte Hilfslinie trennt somit die mineralischen Horizonte (rechts der durchgezogenen Linie) in den Bereiche der sauren und humosen mineralischen Horizonte von Flächen unter wald- oder forstwirtschaftlicher Nutzung (links der gestrichelten Hilfslinie) und den der vorwiegend landwirtschaftlichen Flächen (rechts der gestrichelten Hilfslinie).

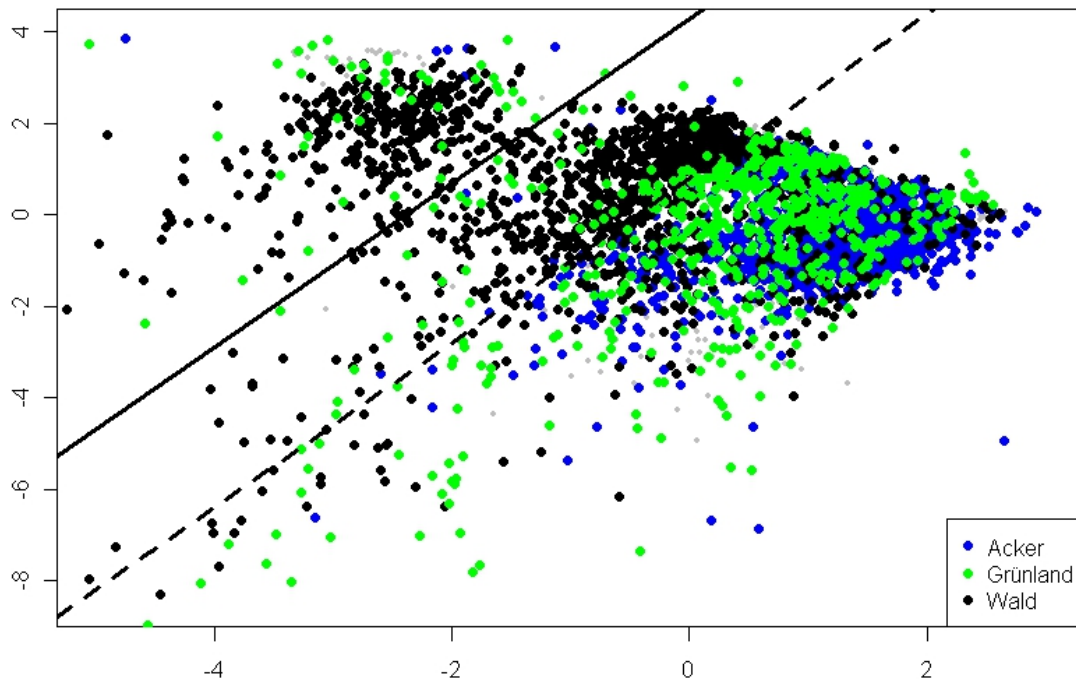


Abbildung 10: Flächennutzung



### **pH-Wert**

Neben den TOC- und  $N_{ges}$ -Gehalten ist auch das unterschiedliche Muster des pH-Wertes von organischen und mineralischen Horizonten auffällig. Es zeigen sich zwei Gradienten unterschiedlicher Ausrichtung und Ausprägung. Die pH-Werte werden klassifiziert nach Quintilen (vgl. Tabelle 22 im Anhang 2) dargestellt (Abbildung 11). Stark ausgeprägt ist der Gradient der mineralischen Horizonte (rechts der Hilfslinie) von hohen pH-Werten (5. Quintil in blau), die nach links oben hin bis zu den in rot dargestellten Proben abnehmen. Die mineralischen Horizonte weisen pH-Werte aller Quantils-Klassen auf. Die Lage der niedrigeren pH-Werte in Mineralböden (1. Quintil) kann fast ausschließlich Proben von Waldstandorten zugewiesen werden (vgl. Abbildungen 10). Es zeigt sich der typischerweise depositions- und bewirtschaftungsbedingte, niedrigere pH-Wert der forstwirtschaftlich genutzten Flächen. Ein völlig anderes Bild zeigt sich im kleinen Cluster der organischen Horizonte (links der Hilfslinie). Der pH-Wert zeigt hier ein wesentlich unklarerer Muster, nimmt jedoch tendenziell von den Proben im Bereich ( $X \approx -1,5$ ;  $Y \approx -4$ ) nach links unten hin ab. Im Gegensatz zu den Proben der mineralischen Horizonte sind die beiden Klassen mit den höchsten pH-Werten hier nur in Ausnahmefällen vertreten.

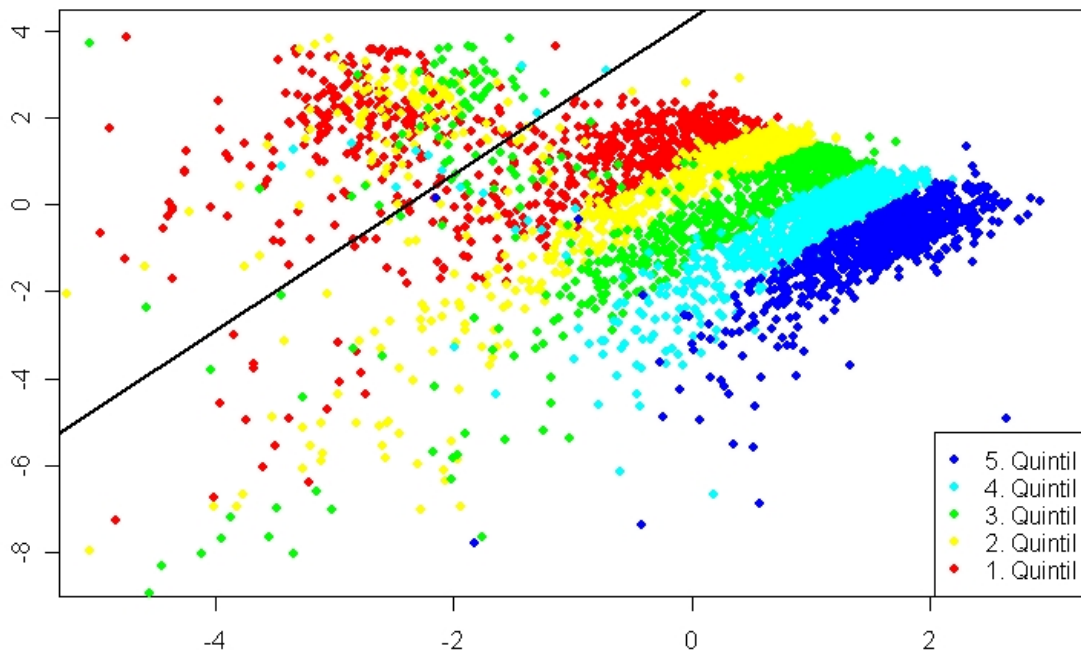


Abbildung 11: pH-Werte

### **Schwermetallgehalte**

Die Einfärbung der Punkte nach Schwermetallgehalten (Abbildung 12) offenbart weitere Muster, die wiederum ein anderes Bild zeigen, als das der pH-Werte und der TOC- und  $N_{ges}$ -Gehalte. Zur Orientierung sind zusätzlich die durchgezogene Hilfslinie zur Trennung der organischen und mineralischen Horizonte (vgl. Abbildung 9) und die gestrichelte Hilfslinie zur groben Abgrenzung der meist landwirtschaftlichen Nutzflächen von den hauptsächlich mineralischen Waldbodenproben mit niedrigerem pH-Wert (vgl. Abbildung 10) in die Abbildungen aufgenommen. Für Cr, Cu, Ni und Zn können anstei-

gende Gehalte der Proben aus mineralischen Horizonten (rechts der durchgezogenen Hilfslinie) vom rechten oberen Bereich (rote Punkte) in Richtung der unteren linken Ecke der jeweiligen Abbildungen beobachtet werden. Blei lässt ein ähnliches Bild erkennen. Für Cd ist ein Gradient ansteigender Gehalte nicht in vergleichbarer Deutlichkeit zu erkennen. Es zeigt sich, dass nicht alle Stoffe in gleichem Maß von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden. Cd wird deshalb im Anschluss an die anderen Metalle noch einmal gesondert betrachtet.

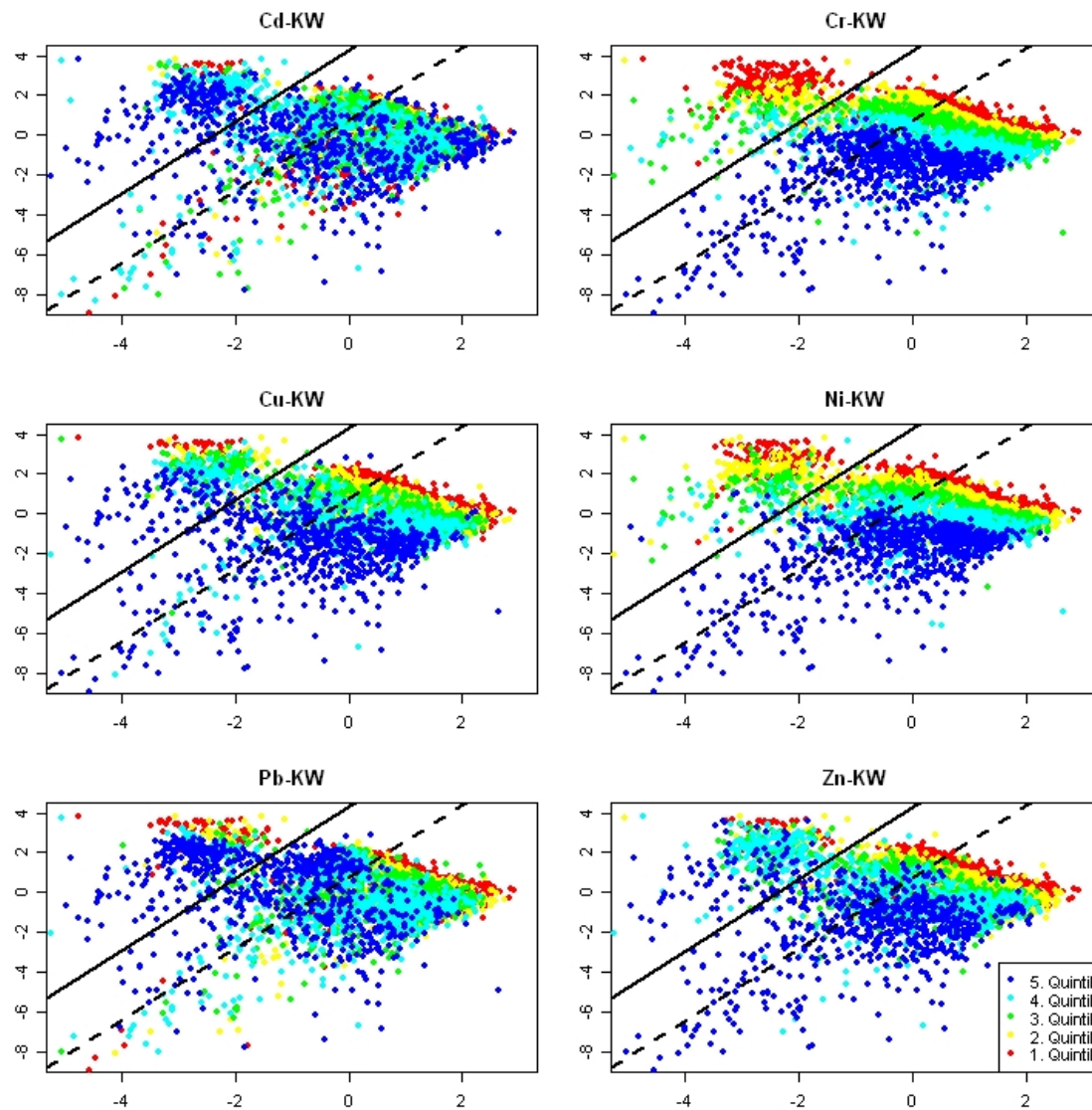


Abbildung 12: Darstellung Schwermetallgehalte

Trotz des ähnlichen Trends können für die Stoffe Cr, Cu, Ni, Pb und Zn dennoch Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 12). Für Pb, Cu und Zn sind sowohl niedrige Gehalte als auch hohe Gehalte an Proben der organischen und der mineralischen Horizonte gemessen worden. Die hohen Gehalte von Cr und Ni können, im Gegensatz zu denen der anderen untersuchten Metalle, fast ausschließlich Proben von Mineralböden zugeordnet werden. Hier zeigt sich deutlich, dass die maximalen Gehalte von Cr und Ni im Bereich der mineralischen Proben (rechts der durchgezogenen Linie) dominieren.

Für Cr und Ni sind Werte der höchsten Gehaltsklasse zwischen der gestrichelten und durchgezogenen Linie (meist saure, humose mineralische Proben der wald- und forstwirtschaftlichen Flächen) fast ausschließlich im Bereich  $Y < 0$  zu finden. Bei der Betrachtung der Pb-Gehalte ist das Gegenteil der Fall. Hier zeigen sich die hohen Gehalte zwischen den beiden Hilfslinien weiter oben rechts ( $X \approx 0$ ;  $Y \approx 2$ ). Zusätzlich zeigt Pb im Vergleich zu den anderen untersuchten Metallen nur vergleichsweise wenige Punkte der höchsten Gehaltsklasse im großen Cluster auf der rechten Seite der gestrichelten Linie. Hingegen sind die hohen Gehalte von Zn verstärkt rechts der gestrichelten Linie zu erkennen. Die verschiedenen Muster weisen auf systematische Unterschiede der Herkunft und/oder der Fixierung der Schwermetalle hin.

Zur Betrachtung des auffälligen Ausbleibens des beschriebenen Gradienten ansteigender Stoffgehalte beim Cd werden die Proben genauer betrachtet. Tendenziell sind auch für Cd die höchsten Gehalte (blaue Punkte) im unteren Bereich der beiden Cluster angesiedelt. Eine Besonderheit zeigt sich jedoch im Cluster rechts der Hilfslinie am rechten Rand ( $X > 2$ ;  $Y \approx 1$ ). Auch hier sind Proben mit hohem Cd-Gehalt zu finden. Zur genaueren Identifikation der Unterschiede werden in Abbildung 13 die höchsten Cd-Gehalte den höchsten Cr-Gehalten, nach Nutzung getrennt, einander gegenübergestellt.

### Nutzungsspezifische Betrachtung der Schwermetallgehalte

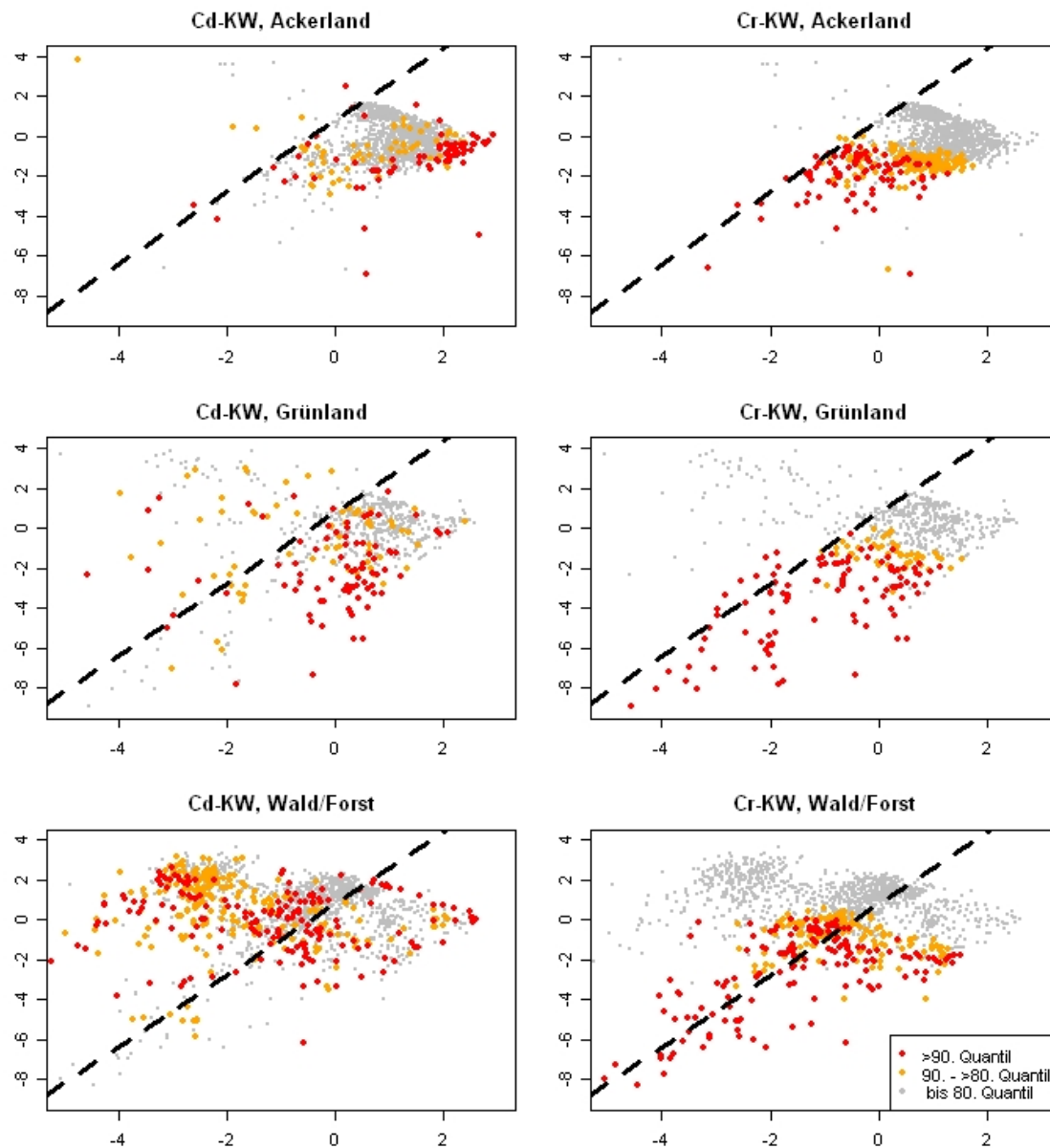


Abbildung 13: Gegenüberstellung der Cd und Cr-Gehalte getrennt nach Nutzung

Cr zeigt nutzungsunabhängig den bereits beschriebenen Gradienten (nach unten hin steigende Gehalte). Cadmium hingegen zeigt ein anderes Bild. Die Nutzung scheint den Cd-Gehalt stärker zu beeinflussen, als dies bei den anderen betrachteten Stoffen der Fall ist. Für die unterschiedlichen Nutzungen sind abweichende Muster zu erkennen. Besonders deutlich wird dies bei den ackerbaulich genutzten Flächen. Hier finden sich Proben mit hohen Gehalten z.B. im Bereich  $X \approx 2$ ;  $Y \approx -1$  (Abbildung 13). Die anderen untersuchten Schwermetalle zeigen in diesem Bereich eher niedrige Werte.

Die für die organischen Horizonte (kleines Cluster) beschriebenen Gradienten des pH-Wertes und der Schwermetallgehalte scheinen gegenläufig ausgeprägt. Dies ist bei Betrachtung der Proben von Mineralböden nicht zu erkennen (vgl. Abbildung 11 und 12 – kleine Cluster). Die Richtung des Gradienten steigender Schwermetallgehalte (von der rechten oberen Ecke in Richtung der linken unteren Ecke) ist unabhängig vom pH-Gradienten (von der rechten unteren Ecke in Richtung der linken oberen Ecke). Zwei unterschiedliche Einflüsse wirken sich maßgeblich auf die Gehalte der untersuchten Parameter in den Proben der beiden Cluster aus. Der beschriebene generelle Gradient der Schwermetalle bleibt im Bereich höherer TOC- und  $N_{ges}$ -Gehalte der Mineralböden (zwischen der gestrichelten und durchgezogenen Linie) erhalten, wird jedoch stoffspezifisch beeinflusst. Im großen Cluster kann also ein genereller Trend erkannt werden, der im Bereich zwischen den Hilfslinien durch weitere Einflüsse teilweise überlagert wird.

### **Bodenart**

Eine weitere Erklärung für die ausgeprägten Muster liefert die Bodenart. Abbildung 14 zeigt, dass die Textur im Cluster rechts der Linie in Richtung der linken unteren Ecke tendenziell feiner wird. Dies entspricht dem Muster der Schwermetallgehalte, die in die gleiche Richtung ansteigen. Proben der Hauptbodenart „Sand“ sind eher im oberen Bereich des Clusters der Mineralbodenproben zu finden. In diesem Bereich befinden sich auch die Proben mit den niedrigsten Gehalten an Schwermetallen. Proben von tonigen Böden liegen dagegen weiter links unten und zeigen somit höhere Gehalte an Schwermetallen an. Die Schluffe nehmen der Korngröße entsprechend eine vermittelnde Position im Cluster ein. Das Muster entspricht den typischerweise unterschiedlichen geogenen Gehalten dieser Substrate, welche Grundlage für die Unterscheidung der Vorsorgewerten nach BBodSchV sind. Die Proben mit den höchsten Gehalten an Schwermetallen im Bereich  $X \approx -3$ ;  $Y \approx -5$  werden den Schluffen einer besonderen räumlichen Einheit zugeordnet, auf die in Kap. 5.2.2. näher eingegangen wird.

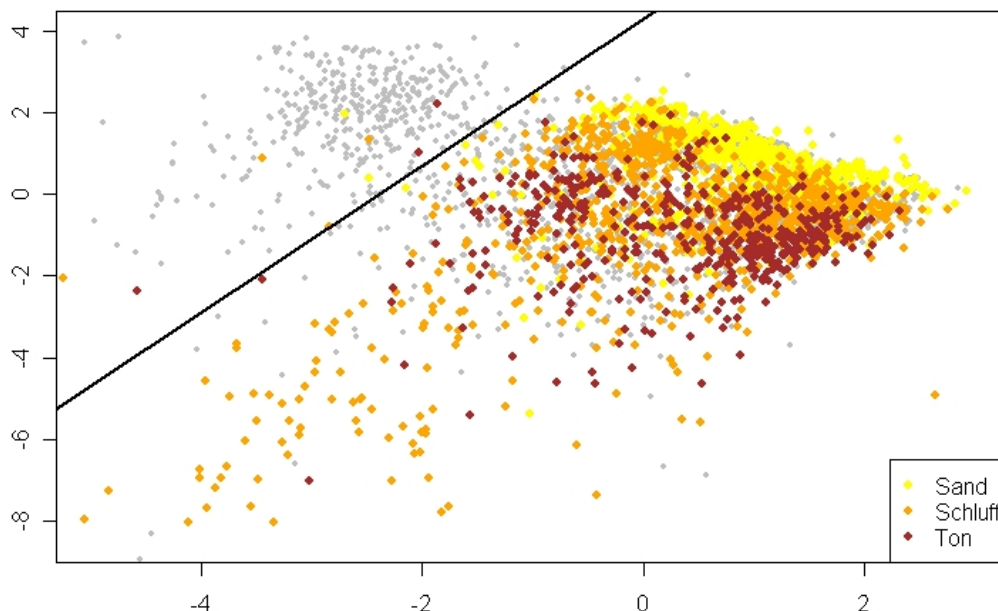


Abbildung 14: Hauptbodenarten

### Unterteilung der organischen Horizonte

Im Cluster links der Linie (Abbildung 15) zeigt sich neben den beschriebenen stofflichen Gradienten eine weitere Struktur. Die verschiedenen Ausprägungen organischer Horizonte können anhand der Lage im Cluster getrennt werden. Im oberen Bereich des Clusters ( $Y \approx 3,5$ ) sind hauptsächlich H-Horizonte der Moorstandorte zu finden. Direkt unter den H-Horizonten werden die Proben der L-Horizonte verschiedener Wald- / Forstandorte dargestellt. Erst bei Y-Werten von  $< 3$  finden sich die O-Horizonte wieder. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der Darstellung der Flächennutzung (Abbildung 10). Die H-Horizonte werden meist Flächen mit landwirtschaftlicher Nutzung zugeordnet. Eine deutliche Trennung von Of- und Oh-Horizonten ist nicht zu erkennen. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Oh-Horizonte stärker in Richtung niedriger X- und Y-Werte (hoher Schwermetallgehalte) streuen und dementsprechend häufiger im Bereich  $X \approx -4$ ;  $Y \approx 0$  zu finden sind. Die verschiedenen Horizontausprägungen wirken sich auf den Schwermetallgehalt aus.

Auffällig sind die farbig dargestellten organischen Horizonte, die im Bereich rechts der Hilfslinie dargestellt werden. Eine Prüfung einzelner gemessener Werte ergab untypische, teilweise sehr niedrige Gehalte an TOC und  $N_{\text{ges}}$  (z.B. 1,1 Masse- % TOC und 0,095 Masse- %  $N_{\text{ges}}$  in einem H-Horizont). Mögliche Ursachen können Fehler in der Messung oder Probenahme, mangelhafte Geländeansprache oder Fehler bei der Eingabe / Datenübertragung sein. Eine nachträgliche Prüfung der Werte solcher auffälligen Punkte ist anzuraten. Das Verfahren zeigt hier erneut seine Eignung zur nachträglichen Qualitätskontrolle.

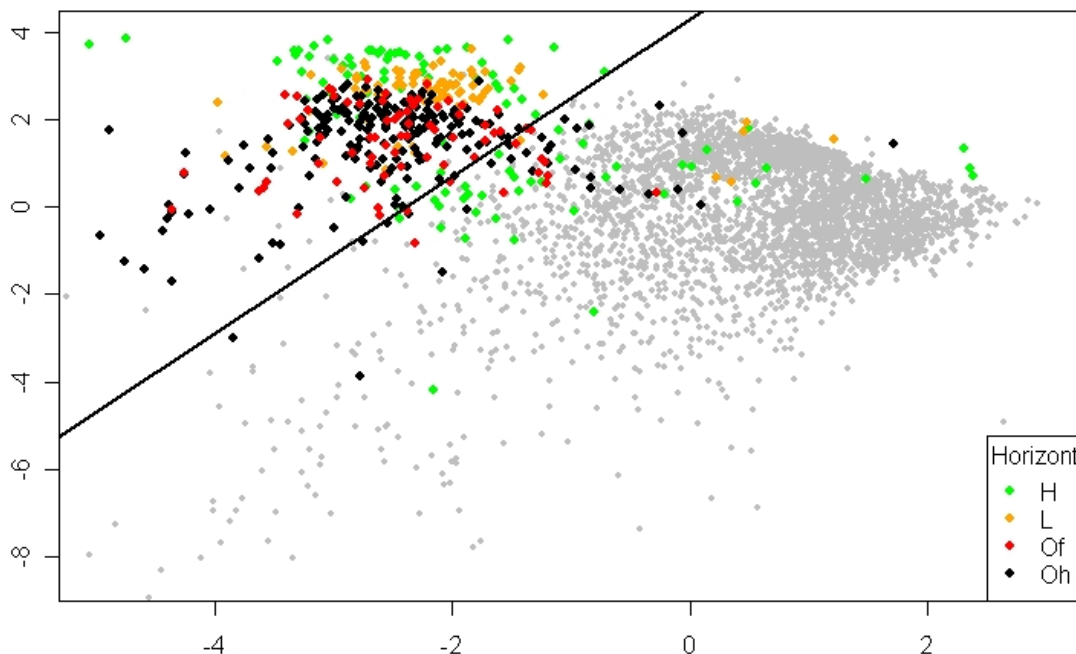


Abbildung 15: Proben organischer Horizonte



## 5.2.2 Räumliche und zeitliche Trends

### 5.2.2.1 Räumliche Trends

Neben den bereits beschriebenen Einflüssen (z.B. Horizont, Bodenart, Flächennutzung), die sich auf die Werte der gemessenen Parameter auswirken, wurden weitere mögliche Einflüsse untersucht. Der Fokus lag dabei auf räumlichen und zeitlichen Trends. Für die Untersuchung der räumlichen Muster standen verschiedene Stammdaten zur Verfügung. Die Informationen wurden aus der Tabelle der Standortbeschreibungen der vorliegenden Datenbank entnommen. Für die Flächen der BDF liegen Informationen zu folgenden räumlichen Abgrenzungen vor:

- ökologische Raumgliederung (Schröder et al. 2001),
- naturräumliche Gliederung (BfN Stand 2008),
- europäische Klimaregionen (Finke et al. 1998),
- Einheiten der Bodenübersichtskarte 1 : 1.000.000 (BGR 2007),
- Bodenausgangsgestein (BGR 2007).

Zusätzlich wurde gezielt nach Auffälligkeiten im Zusammenhang mit klimatologischen Daten (Sonnenscheindauer, Temperatur und Niederschlag) der räumlich benachbarten Wetterstationen des DWD gesucht. Grundlage war das langjährige Mittel der Klimanormalperiode 1961-1991.

### Niederschlag und Temperatur

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse für die Temperatur und den Niederschlag dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass Standorte mit hohen Niederschlägen verstärkt links der Grenzlinie zwischen landwirtschaftlichen Nutzflächen und forstwirtschaftlichen Flächen zu finden sind. Einige Punkte sind auch rechts der Linie zu finden, die in Teilen Waldstandorten zugewiesen werden können. Geringe Niederschläge sind verstärkt im Bereich der landwirtschaftlichen Nutzflächen zu finden, wie am rechten Rand des großen Clusters zu erkennen ist. Hohe Niederschläge und niedrige Temperaturen an Standorten mit hohen Gehalten an Schwermetallen im Bereich  $X \approx -3,5$ ;  $Y \approx -6$  sind erkennbar (vgl. Abbildung 12).

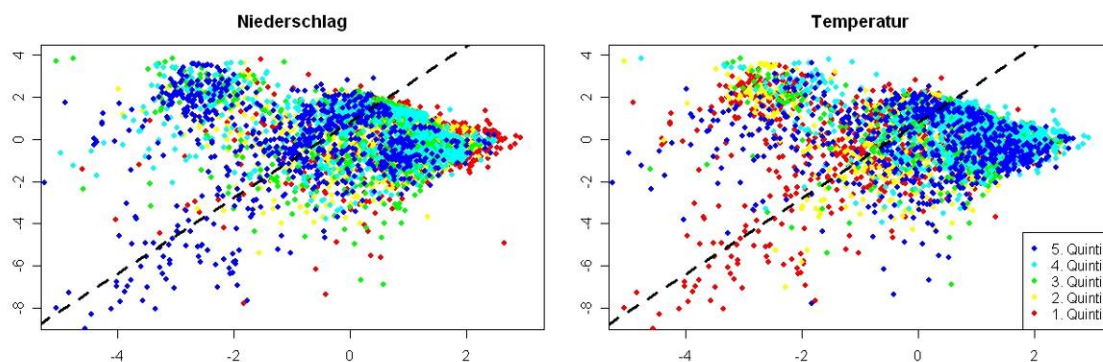


Abbildung 16: Niederschlag und Temperatur

Diese Muster lassen auf den ersten Blick einen Zusammenhang zwischen den Gehalten der untersuchten Stoffe und den klimatologischen Einflüssen vermuten. Die hier gezeigten Muster sind jedoch eher durch die an die Standorteigenschaften angepassten Flächennutzungen sowie zusätzliche räumliche Begebenheiten zu begründen. Die Temperatur und die Niederschläge spiegeln einen wesentlichen Teil der Standorteigenschaften wider, die wiederum die entsprechenden Nutzungen bedingen. Standorte niedrigerer Temperaturen und höherer Niederschläge werden vergleichsweise häufig forstwirtschaftlich genutzt. Von den 125 Standorten mit den niedrigsten zugewiesenen Temperaturen ( $\leq 7,2$  °C) werden über die Hälfte als forstwirtschaftliche Flächen genutzt. Die 149 Standorte mit Temperaturen von über 8,8 °C werden fast zu 75 % als landwirtschaftliche Fläche, zum Großteil als Ackerfläche (74 Standorte) genutzt. Die durch die Standorteigenschaften (Temperatur und Niederschlag) bedingte Nutzung erklärt das zu erkennende Muster (vgl. Abbildung 10). Die hohen Gehalte der Punkte im Bereich ( $X \approx -3$ ;  $Y \approx -5$ ), die bereits durch ihre Bodenart aufgefallen sind (Abbildung 14), können jedoch nicht durch nutzungs- oder klimatologische Gründe sinnvoll erklärt werden.

### **Ausgangsgestein der Bodenbildung**

Dieses Muster kann durch die Berücksichtigung der Ausgangsgesteine der Bodenbildung erklärt werden. Das Ergebnis der Auswertung nach den Bodenausgangsgesteinen ist in Abbildung 17 dargestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Zuweisung des Ausgangsmaterials der Bodenbildung über die Standortdaten erfolgte, weshalb auch Proben von organischen Horizonten ein Ausgangsgestein zugewiesen wurde. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Informationen zum Ausgangsgestein der Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 entnommen wurden. Aufgrund der häufig fehlenden Informationen zum Ausgangsgestein in den Daten der Profil- und Standortbeschreibung (vgl. Kap. 3) musste auf diese Grundlage zurückgegriffen werden.

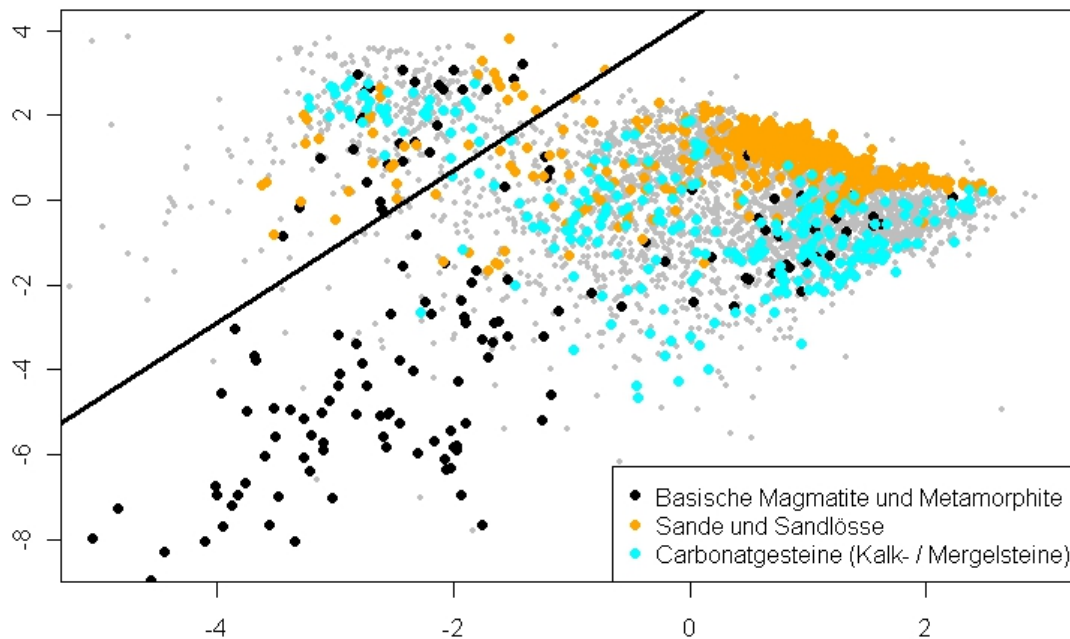


Abbildung 17: Bodenausgangsgestein



Im Cluster rechts der durchgezogenen Hilfslinie zeigt sich das aus Abbildung 14 bekannte Muster der auf Basis der Horizontbeschreibungen ermittelten Bodenarten. Im Bereich der niedrigen Schwermetallgehalte am oberen Rand sind beispielsweise Proben der Sande und Sandlössse zu finden. Die meist tonigen Verwitterungsrückstände der Carbonatgesteine liegen im Bereich höherer Schwermetallgehalte. Die Proben im Bereich ( $X \approx -3$ ;  $Y \approx -5$ ) mit deutlich erhöhten Gehalten an Schwermetallen können überwiegend Flächen mit dem Bodenausgangssubstrat „basische Magmatite und Metamorphite“ zugewiesen werden. Die dominierenden Bodenartenhauptgruppen der basischen Magmatite und Metamorphite sind (vgl. Abbildung 14) Schluffe und Lehme (Düwel 2007). Die Auswertung liefert trotz der kleinmaßstäbigen Kartengrundlage plausible Ergebnisse und stimmt gut mit bekannten Zusammenhängen überein (z.B. Utermann 2010). Die Auflagehorizonte dieser Standorte ordnen sich hingegen weitgehend in das bundesweite Niveau ein.

### **Vergleich des Einflusses von Deposition und dem Ausgangsgestein der Bodenbildung**

In Abbildung 18 sind exemplarisch Proben aller untersuchten Horizonte von fünf Standorten aus der Umgebung eines großen Ballungsraumes und von fünf Standorten mit dem vermerkten Ausgangsgestein „basische Magmatite und Metamorphite“ dargestellt. Für Proben der Standorte mit dem Ausgangsgestein „basische Magmatite und Metamorphite“ zeigt sich das bereits beschriebene Bild (vgl. Abbildung 12). Die Proben organischer Horizonte ordnen sich meist im kleinen Cluster ein und zeigen keine besonders auffälligen Werte. Die Standorte in Ballungsraumnähe verschiedenster Ausgangssubstrate (Ton-, Sandstein, Löss oder Terrassen- und Schmelzwasserablagerungen) zeigen ein anderes Bild. Hier sind die Schwermetallgehalte der Proben mineralischer Horizonte eher unauffällig (Bereich  $X \approx -1$ ;  $Y \approx 1$ ). Die Auflagen dieser Standorte zeigen hingegen vergleichsweise hohe Gehalte an Schwermetallen an (vgl. Abbildung 12). Neben dem Ausgangsmaterial der Bodenbildung ist also auch ein Einfluss der Deposition erkennbar. Dies gilt in Abbildung 18 besonders für die rot dargestellten Proben. Hier sind keine auffälligen Werte an Proben der mineralischen Horizonte zu erkennen. Die durch die Deposition beeinflusste Auflage hingegen zeigt erhöhte Schwermetallgehalte.

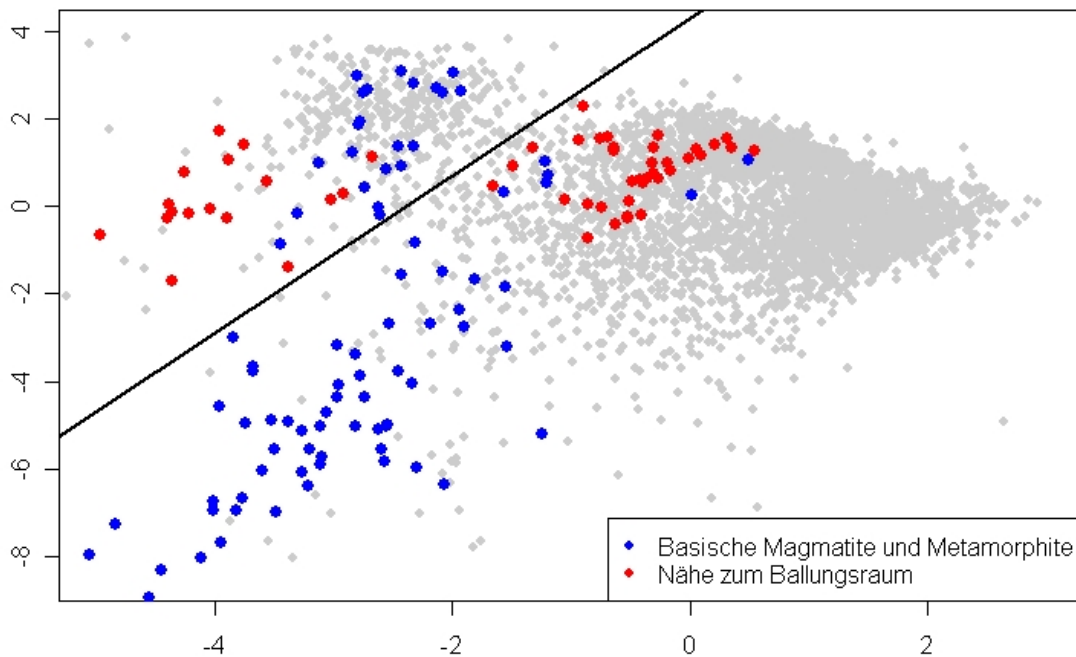


Abbildung 18: Gegenüberstellung maßgeblich geogen und depositionsgeprägter Standorte unter forstwirtschaftlicher Nutzung

Die abweichenden Einflussgrößen, z.B. von Pb (Deposition) und Cr (geogen), lassen sich auch im direkten Vergleich der Gehalte der Horizonte zwischen den Hilfslinien gut erkennen (Abbildung 19). Die Cr-Konzentrationen zeigen zwischen den Hilfslinien den bereits beschriebenen Anstieg der Konzentrationen von oben (hier z.B.  $X=0$ ;  $Y=2$ ) nach unten hin, der durch die geogenen Gehalte der Bodenausgangssubstrate bedingt ist. Wie in Abbildung 19 gezeigt wird, weisen die Pb-Konzentrationen der A-Horizonte unter Wald ein abweichendes Muster auf. Niedrige Gehalte (rote Punkte) finden sich hauptsächlich nahe der gestrichelten Linie ( $X \approx 0$ ;  $Y \approx 1$ ). Die Höhe der Pb-Konzentration steigt im Bereich  $X \approx 0,5$  bis  $-1$ ;  $Y \approx 1$  tendenziell von rechts nach links, in Richtung der maßgeblich durch Deposition beeinflussten Humusauflagen (Cluster links der durchgezogenen Hilfslinie) an. Die Ausrichtung des Anstiegs hin zu den Auflagehorizonten stützt somit die Interpretation, dass Pb im Gegensatz zu Cr maßgeblich durch Deposition in Böden eingetragen wird.

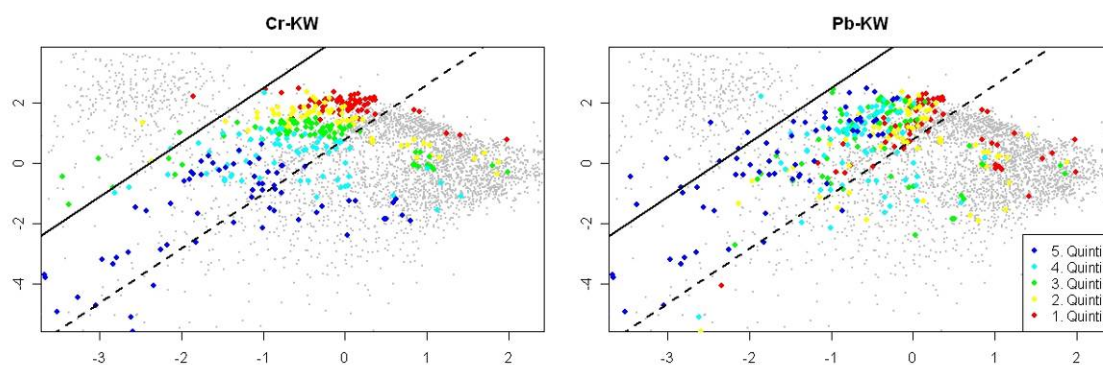


Abbildung 19: Pb- und Cr-Gehalte der A-Horizonte unter Wald

Die Ergebnisse der Auswertungen der ökologischen Raumgliederung, naturräumlichen Einheiten, europäischen Klimaregionen und Einheiten der Bodenübersichtskarte 1 : 1.000.000 zeigten keine erkennbaren Muster, welche die Verteilung der Punkte in der SOK ursächlich erklären können. Neben den genannten räumlichen Abgrenzungen wurde zusätzlich geprüft, ob es systematische Auffälligkeiten in der SOK-SAM bezüglich der Proben der verschiedenen Bundesländer gibt. Die Prüfung auf einen Einfluss einer administrativen Grenze dient in diesem Fall der zusätzlichen Qualitätskontrolle. Sollten beispielsweise regelhafte Muster oder Verschiebungen nur im Bezug zum Bundesland auftreten und sich in keiner der anderen räumlichen Abgrenzungen sinnvoll wiederfinden lassen, ist damit zu rechnen, dass z.B. methodische Abweichungen die Ursache sind. Die Auswertung nach Bundesländern zeigt jedoch keine Auffälligkeiten.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Muster lassen sich nicht nur im gesamten Datensatz erkennen, sondern sind auch beim Vergleich zweier Standorte oder von Horizonten eines Standortes zu erkennen. Im Anhang 2 sind die Ergebnisse für drei einzelne Standorte näher dargestellt.

### 5.2.2.2 Zeitliche Trends

Neben den bereits durchgeführten Arbeiten war ein wesentliches Ziel der Auswertung die Untersuchung von zeitlichen Trends. Zur Erfassung zeitlicher Veränderungen wurden in einem ersten Schritt Horizonte ausgewählt, an denen seit der Flächeneinrichtung Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt wurden.

Für anschließende statistische Auswertungen zur Untersuchung von Trends wurde geprüft, welcher Zeitraum abgedeckt werden kann, wenn

- mindestens 10 Proben mit zugehöriger Wiederholungsuntersuchung verwendet werden sollen,
- zwischen der Erstbeprobung und der Wiederholungsuntersuchung ca. 10 Jahre vergangen sein sollen.

Anschließend wurden auf Basis dieser Auswahl vier Beprobungszeiträume definiert (Tabelle 5). Diesen Zeiträumen wurden die ausgewählten Proben zugewiesen. Zur Untersuchung zeitlicher Trends wurden die ausgewählten Proben der Periode 1 und Periode 3 sowie Periode 2 und Periode 4 einander gegenübergestellt.

Tabelle 5: Wiederholungsuntersuchungen

|                                                           | Periode 1<br>1990 – 1993 | Periode 2<br>1994 – 1998 | Periode 3<br>1999 – 2003 | Periode 4<br>2004 – 2007 |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Erstbeprobung mit Wiederholung                            | 21                       | 151                      | 130                      | 119                      |
| Erstbeprobung mit einer Wiederholung nach ca. zehn Jahren | 20                       | 90                       | 20                       | 90                       |

Nach den oben genannten Kriterien konnten 40 Proben (20 Wertepaare) der Perioden 1 und 3 sowie 180 Proben (90 Wertepaare) der Perioden 2 und 4 näher untersucht werden. Zu beachten ist, dass die Proben der 20 bzw. 90 Wertepaare an Standorten unterschiedlicher Nutzung und aus verschiedenen Tiefenstufen entnommen wurden. Da nach übergeordneten systematischen zeitlichen Veränderungen gesucht wird, wurden die Daten in einem ersten Schritt zusammen verwendet. Die Proben wurden auf ihre Lage im Plot untersucht.

#### **Hinweis zur Interpretation**

- Um die Lage der Punkte der verschiedenen Perioden vergleichen zu können, wurden der Mittelwert sowie das 95 %-Konfidenzintervall der X- und Y-Koordinaten für die einzelnen Perioden berechnet.
- Die Konfidenzintervalle wurden als Ellipse in die SOK-SAM für die jeweilige Periode projiziert (Abbildung 20).
- Überschneiden sich die Konfidenzintervalle verschiedener Perioden nicht, liegen signifikante Unterschiede zwischen diesen Perioden vor.

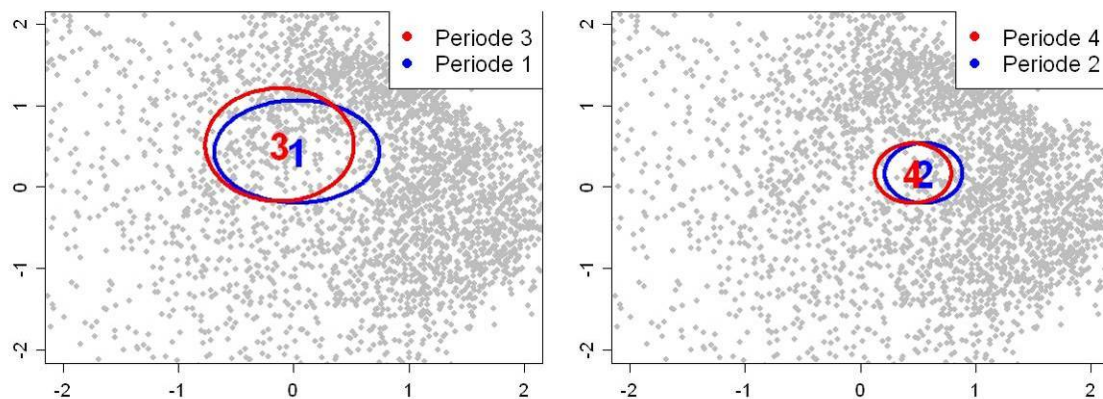


Abbildung 20: Trendanalyse ausgewählter Zeiträume

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den verglichenen Perioden vorliegen. Auffällig ist jedoch, dass eine Verschiebung der Proben jüngerer Datums (rot) in Richtung niedrigerer X-Werte (bei beiden Vergleichen) zu erkennen ist. Anhand der X- und Y-Koordinaten der Proben wurde zusätzlich auf eine systematische Verschiebung entlang der Achsen geprüft. Da eine Normalverteilung der Daten nicht vorlag, wurde anstatt des t-Tests der beidseitige, rangbasierte U-Test verwendet. Hinweise auf eine Verschiebung entlang der Y-Achse konnten nicht festgestellt werden. Der paarweise Vergleich der X-Koordinaten des Vergleichs von Periode 1 und 3 gab mit  $p=0,19$  zumindest Hinweise auf eine Regelmäßigkeit, die jedoch noch nicht signifikant ist. Möglicherweise würde eine größere Stichprobenanzahl dazu führen, dass bei einem Vergleich der Perioden eine signifikante Verschiebung zu erkennen ist.

Ein möglicher Grund für das Ausbleiben von signifikanten Trends sind die unterschiedlichen Tiefenstufen, Nutzungen und die geringe Stichprobenanzahl in den Probenkollektiven. Um die Vergleichbarkeit der Proben hinsichtlich der Tiefenstufen zu gewährleisten und einen möglichst großen Zeitraum abzudecken, wurde eine Teilmenge aus dem Gesamtdatenbestand identifiziert, die den folgenden Kriterien entspricht:

- Es wurden nur Proben von Horizonten verwendet, für die Wiederholungsuntersuchungen vorliegen.
- Die berücksichtigten Analysenergebnisse wurden an Proben gemessen, die einem Horizont entnommen wurden, dessen beschriebene Obergrenze 0 cm entspricht. Dies sind i.d.R. die am häufigsten untersuchten A-Horizonte.
- Sollten an einem Horizont Proben aus unterschiedlichen Tiefenstufen an einem Beprobungstermin geborgen worden sein, wurde nur die oberflächennah entnommene Probe berücksichtigt (vgl. Tabelle 6 – rot markierte Probe wurde nicht verwendet).
- Sollten an einen Horizont mehrere Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt worden sein, wurden nur jeweils die älteste und die aktuellste Messung berücksichtigt (vgl. Tabelle 6 – Daten der blau markierten Beprobung wurden nicht verwendet).

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich durch die lange Laufzeit der Boden-Dauerbeobachtung die Analysemethoden verbessert haben. Die Bestimmungs- und Nachweisgrenzen sind bei Wiederholungsbeprobungen häufig niedriger als zu der Zeit der Erstbeprobung. Für die meisten Parameter kann dieses Problem jedoch vernachlässigt werden, da die Gehalte meist deutlich über der Bestimmungsgrenze liegen. Relevant kann diese Problematik jedoch für beispielsweise TOC-Gehalte von Proben aus Unterbodenhorizonten (spielt bei dieser Datenauswahl keine Rolle) oder Proben mit geringen Cd-Gehalten werden. Nur in Einzelfällen wurde jedoch in Wiederholungsuntersuchungen ein Stoff nachgewiesen, wenn bei der Erstbeprobung der Gehalt nicht bestimmt werden konnte.

Tabelle 6: Beispiel zur Probenauswahl

| Horizont | Beprobung                  | Jahr | OK_P*<br>[cm] | UK_P*<br>[cm] | OK_H*<br>[cm] | UK_H*<br>[cm] |
|----------|----------------------------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| A        | 00 Erstbeprobung           | 1990 | 0             | 25            | 0             | 35            |
| A        | 00 Erstbeprobung           | 1990 | 25            | 35            | 0             | 35            |
| A        | 01. Wiederholungsbeprobung | 1995 | 0             | 33            | 0             | 35            |
|          |                            |      |               |               |               |               |
| B        | 00 Erstbeprobung           | 1994 | 2             | 8             | 0             | 10            |
| B        | 01. Wiederholungsbeprobung | 1999 | 2             | 8             | 0             | 10            |
| B        | 02. Wiederholungsbeprobung | 2004 | 2             | 8             | 0             | 10            |

\* OK = Oberkante, UK= Unterkante, P = Probenahme, H = Horizont

Nach oben genannten Kriterien konnten 130 Proben (65 Wertepaare) näher untersucht werden. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen also die Veränderungen (erneut anhand der Konfidenzintervalle) in den oberen mineralischen Horizonten der Standorte. Wechselwirkungen mit einer evtl. vorhandenen Auflage oder den darunter liegenden Horizonten können hier nicht berücksichtigt werden. Die Proben wurden auf ihre Lage im Plot untersucht. Die Ergebnisse der Trendanalyse für die oberflächennahen Horizonte mit Wiederholungsbeprobung sind in Abbildung 21 dargestellt. Auch hier zeigen die Konfidenzintervalle keine signifikanten Unterschiede an.

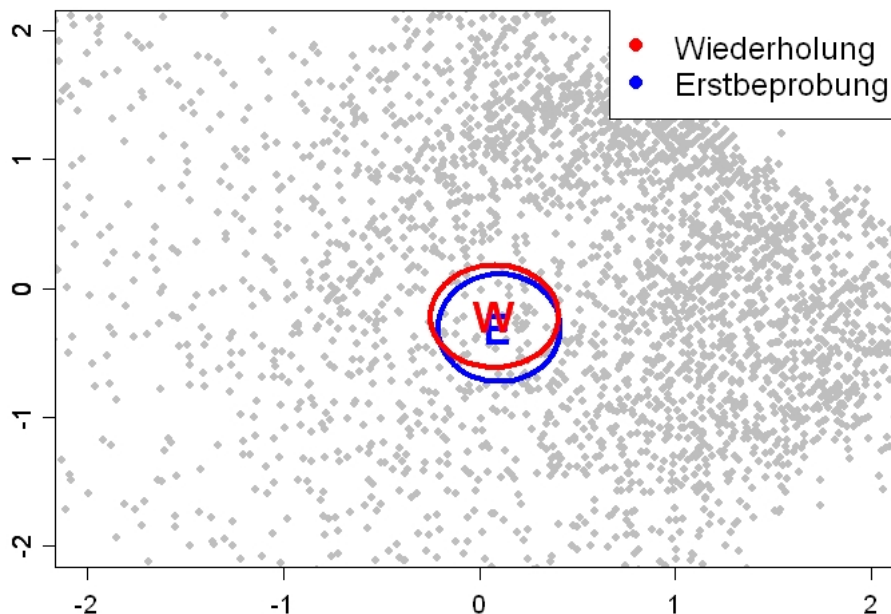


Abbildung 21: Ergebnisse der Trendanalyse

Zur Untersuchung des Einflusses der unterschiedlichen Landnutzungsformen wurden weitere Analysen durchgeführt. In Abbildung 22 sind die Vektoren der Differenz von Erstbeprobung und der aktuellsten Wiederholungsbeprobung, also die Verschiebung in der Zeit zwischen den beiden Beprobungszeitpunkten als Punkte dargestellt. Für die Nutzungen „Acker“, „Grünland“ und „Forst“ sind die Konfidenzintervalle der entsprechenden Punkte im Plot dargestellt. Die sonstigen Nutzungen bleiben wegen der geringen Stichprobenanzahl unberücksichtigt.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Konfidenzintervalle aller Nutzungen den Punkt ( $X=0$ ;  $Y=0$ ) schneiden. Auch hier ist somit keine signifikante Veränderung festzustellen. Die unterschiedlichen Ausdehnungen der dargestellten Konfidenzintervalle spiegeln die Problematik der geringen Stichprobenanzahlen wider. Mit einer (nur geringen) Erhöhung der Stichprobenanzahl könnte ein Nachweis von signifikanten Veränderungen möglich sein. Abbildung 22 zeigt, dass Acker- und Forstflächen anscheinend eine gegenläufige Entwicklung nehmen. Proben von Ackerflächen scheinen einen Trend zu tendenziell niedrigeren Schwermetallgehalten anzuzeigen (Abbildung 12). Für Proben von Waldstandorten werden generell steigende Gehalte im oberen Mineralboden angedeutet. Solche steigenden Gehalte in A-Horizonten an Standorten unter forstwirtschaftlicher Nutzung wurden bereits häufiger beschrieben und auf hohe atmo-

sphärische Einträge, unterstützt durch die Filterwirkung des Bestandes, zurückgeführt. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen werden häufig Bilanzen oder Vorräte von Nähr- und Schadstoffen berechnet, die Hinweise auf die beschriebenen Veränderungen der Gehalte der oberen Horizonte geben können. Flächenhafte, einheitliche Veränderungen von Bilanzen oder Vorräte konnten bisher nicht beschrieben werden (z.B. Malburg-Graf & Blümel 2002). Gründe für die verschiedenen Ergebnisse sind die häufig unterschiedliche Flächenbehandlung hinsichtlich der verwendeten Düngemittel sowie die Problematik der Erfassung aller zur Bilanzierung notwendigen Informationen (Knappe et al. 2008). Die dieser multivariaten Auswertung zugrunde liegenden Daten deuten jedoch eine systematische Veränderung der Gehalte des oberen mineralischen Horizontes an. In Teilen konnten bereits abnehmende Vorräte von Schadstoffen in Oberböden festgestellt werden, welche die beschriebenen Ergebnisse stützen.

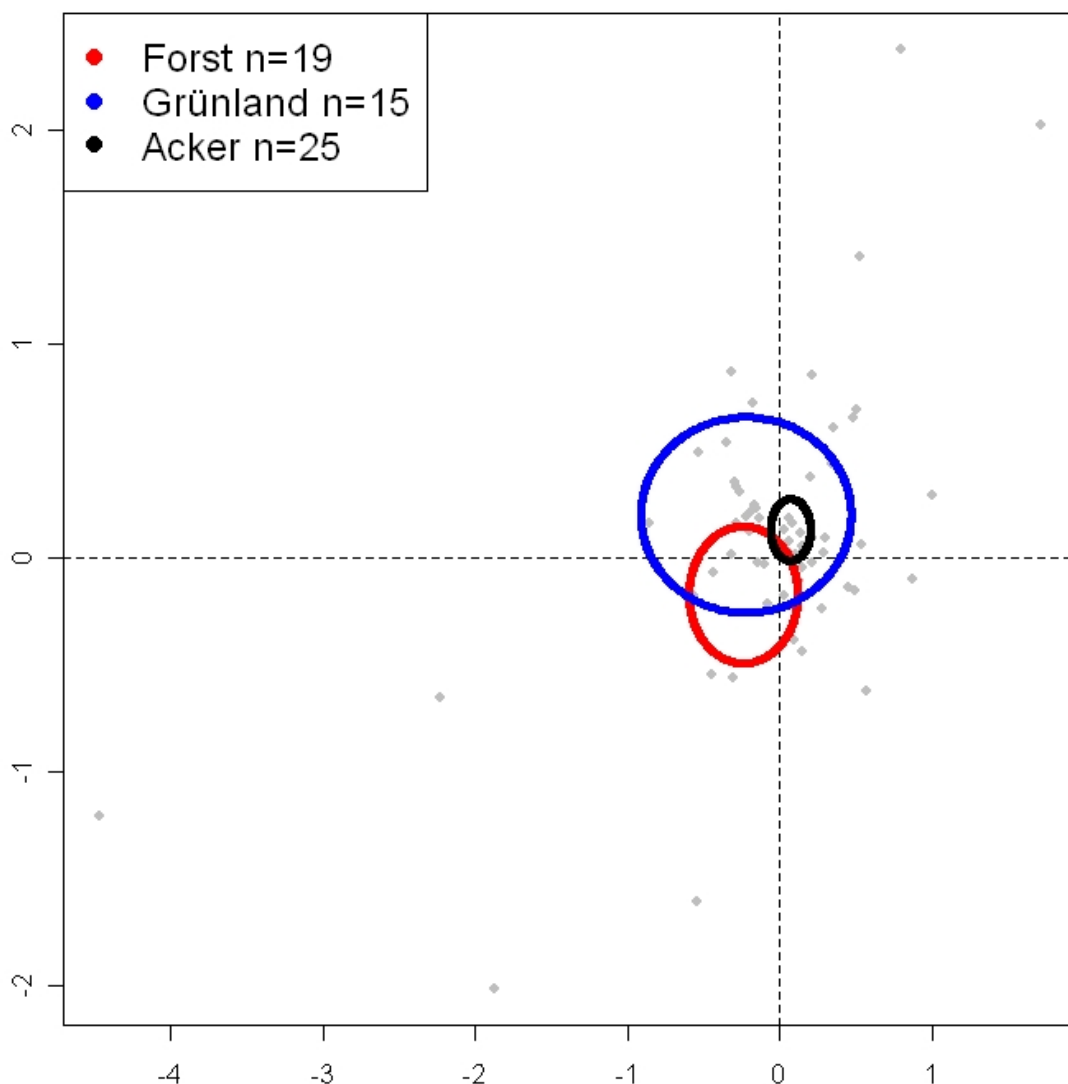


Abbildung 22: Verschiebung zwischen Erstbeprobung und aktuellster Wiederholungsbeprobung



### 5.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass sich länderübergreifend verschiedene und teilweise sogar überraschend deutliche Muster in den Daten wiederfinden lassen. Diese Muster können unterschiedlichen Eigenschaften und Einflüssen zugeordnet werden, welche die Gehalte der untersuchten Parameter beeinflussen. Der Datensatz ist niedrig-dimensional, d.h. letztlich sind es nur wenige Prozesse und Einflussgrößen, die bedeutsam sind, wenn auch z.B. für Ober- und Unterböden unterschiedlich. In der Literatur wird eine Vielzahl von Prozessen und Einflüssen beschrieben, die die Gehalte der untersuchten Parameter an einem Standort (teilweise entscheidend) beeinflussen können. Bei bundesweiter Betrachtung sind jedoch nur wenige entscheidend.

Bei der Auswertung des bundesweiten Datenbestandes stellt sich die Verteilung des TOC- bzw. Humusgehaltes und damit verbunden des  $N_{ges}$ -Gehaltes als ein wichtiges Merkmal dar. Proben von organischen und mineralischen Horizonten zeigen unterschiedliche Muster und somit unterschiedliche dominierende Einflussgrößen auf, die getrennt voneinander analysiert werden können. Die Höhe der gemessenen Werte steht im Zusammenhang mit der Flächennutzung, die somit einen der erkennbaren relevanten Einflüsse für das untersuchte Parameterset darstellt.

Die Proben der mineralischen Horizonte zeigen für die untersuchten Schwermetalle ebenfalls (mit Ausnahme von Cd) ein erkennbares Muster. Als dominierender Faktor für die Schwermetallgehalte kann auf Basis der vorliegenden Daten das Ausgangsgestein der Bodenbildung und damit verbunden die Bodenart festgestellt werden. Zu berücksichtigen ist jedoch der Maßstab der zugrunde liegenden Karte der Bodenausgangsgesteine von 1:1.000.000, der das Ergebnis beeinflussen kann. Die Gehalte steigen mit feiner werdender Bodenart an. Die meist höheren Gehalte von tonigen Ausgangsmaterialien im Vergleich zu sandigeren Substraten sind gut dokumentiert (z.B. LABO 2003) und entsprechen dem identifizierten Muster. Ausnahmen, die sich nicht in das Muster einordnen, können z.B. durch regional auftretende Ausgangsmaterialien mit hoher geogener Belastung an Schwermetallen erklärt werden. Der starke Einfluss des Ausgangsmaterials erklärt auch, dass der pH-Wert bei Berücksichtigung aller vorliegenden Daten keine erkennbare Auswirkung auf den Gehalt an Schwermetallen der mineralischen Proben hat. Der Gesamtgehalt an Schwermetallen der verschiedenen Ausgangsgesteine steht in keiner direkten Beziehung zu seinem pH-Wert. Ein Einfluss der Flächennutzung auf den Gehalt an Schadstoffen wird ebenfalls von den Ausgangsmaterialien überprägt. Für die sauren Horizonte der Waldflächen sind stoffspezifische Verschiebungen im Plot zu erkennen, die nicht durch das Ausgangsmaterial der Bodenbildung erklärbar sind. Dies wird besonders beim Parameter Pb deutlich. Für diese Proben verschiebt sich das Muster der Schwermetallkonzentrationen. Das Muster zeigt an, dass als Quelle für Pb geogene Quellen bundesweit eher eine untergeordnete Rolle spielen. Für Pb ist die Relevanz der Deposition als relevante Quelle erkennbar.

Die geogene Quelle für Schwermetalle tritt für die organischen Horizonte aufgrund des deutlich geringen mineralischen Anteils weitgehend in den Hintergrund. Die Deposition kann hier als der maßgebliche Einfluss angesehen werden. Hohe Gehalte eher geogener Metalle wie Cr und Ni sind in den organischen Horizonten (meist Auflagehorizonte) kaum zu finden. Entsprechend dem maßgeblichen Eintragsweg durch Deposition sind für Pb häufiger hohe Gehalte in den Auflagehorizonten zu finden.

Im Gegensatz zu den Proben der mineralischen Horizonte ist an Proben aus organischen Horizonten (meist Auflagehorizonten) tendenziell ein Zusammenhang zwischen pH-Wert und Schwermetallgehalten zu erkennen. Die Proben im kleinen Cluster mit den höheren pH-Werten weisen niedrigere Schwermetallgehalte auf. Eine wesentliche Ursache dafür ist die Entwicklung der Humusaufgabe mit den damit verbundenen Umsetzungsprozessen (z.B. Massenverlust, Produktion von org. Säuren etc.), die sich auch auf den pH-Wert und die Schwermetallgehalte auswirken. Der maßgebliche Einfluss auf den Gehalt an Schwermetallen ist hier nicht der pH-Wert. In Abbildung 15 wurde gezeigt, dass sich das Cluster in verschiedene Horizonte unterteilen lässt. Diese Horizonte spiegeln unter anderem verschiedene Qualitäten der organischen Substanz wider. Während im oberen Bereich des Clusters H-Horizonte mit schwer zersetzbarer, wenig reaktiver organischer Substanz (z.B. teilweise humifiziertes Material) dargestellt werden, sind im unteren Bereich Of- und besonders Oh-Horizonte zu finden. Die organischen Materialien der Of- und Oh-Horizonte sind unter Freisetzung von Huminsäuren potentiell leichter umsetzbar. Neben der Relevanz der Menge an organischer Bodensubstanz (%-Massenanteil) deutet sich zusätzlich eine Differenzierung hinsichtlich ihrer Qualität im bundesweiten Maßstab an.

Die gezeigten Einflüsse der Deposition und der Ausgangsmaterialien der Bodenbildung sind jedoch nicht nur bei separater Betrachtung von organischen und mineralischen Horizonten erkennbar. In Abbildung 18 kann gezeigt werden, dass einige Standorte hinsichtlich einer Schwermetallbelastung eher geogen, andere wiederum eher durch die Deposition geprägt sind. So sind die hohen Schwermetallgehalte der mineralischen Bodenproben bei zugehörigen, eher unauffälligen Gehalten in der Auflage ein Hinweis auf geogene Herkunft, z.B. bedingt durch das Ausgangsgestein „basische Magmatite und Metamorphite“. Proben von Standorten nahe Emittenten zeigen höhere Schwermetallgehalte in den Proben der Auflagen, während sich die Gehalte der Mineralbodenproben eher ins allgemeine Niveau einordnen.

Die beschriebenen Einflüsse der Deposition und der geogenen Herkunft der Schwermetalle können jedoch die für Cd identifizierten Muster nicht erklären. Eine mögliche Ursache für die Konzentration hoher Cd-Gehalte in Bereichen generell niedrigerer Schwermetallgehalte ist der hohe pH-Wert der Proben in diesem Bereich. Die Mobilisierung von Cd beginnt in Böden landwirtschaftlich genutzter Flächen bei pH-Werten <6,5. Mit pH-Werten von >6,9 (80. Quantil) überschreiten die angesprochenen Proben den pH-Wert von 6,5 deutlich. Eine weitere Erklärung können höhere Einträge von Cd sein. Eine potentielle Quelle von Cd in Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung können z.B. phosphorhaltige Düngemittel sein. Auch regionale Ursachen (z.B. besondere Bewirtschaftung, Klärschlammapplikation oder Deposition) sind denkbar. Elf Standorte (8\*Acker, 3\*Wald/Forst) hoher Cd-Gehalte bei vergleichsweise niedrigen Schwermetallgehalten liegen im Bereich des Harz bzw. Harzvorlandes. Allerdings finden sich hier auch Standorte mit unauffälligen Cd-Gehalten bzw. Cd-Gehalten unter der Nachweisgrenze. Die Ursachen konnten nicht eindeutig identifiziert werden. Die teilweise sehr hohe Nachweisgrenze der Cd-Gehalte verschiedener Proben in diesem Gebiet (häufig 0,65 mg/kg, was in etwa dem 85. Quantil entspricht) erschwert die Interpretation der Ergebnisse.

Die bisherigen Auswertungen ergaben bereits Hinweise auf systematische Änderungen mit der Zeit. Dennoch ließen sich bisher bundesweit noch keine statistisch signifikanten Trends bestimmen. Ausschlaggebend scheint dafür in erster Linie die noch zu geringe Stichprobenzahl, besonders von Wiederholungsuntersuchungen, zu sein. Ein Beprobungszyklus von zehn Jahren erscheint ausreichend, um relevante Veränderungen in den Gehalten der untersuchten Parameter im bundesweiten Maßstab zu detektieren

(vgl. Kap. 2.2.). Für Einzelstandorte ist eine Trendanalyse bei solchen Wiederholungszyklen erst nach sehr langen Laufzeiten, frühestens nach 20 Jahren (drei vorliegende Ergebnisse) sinnvoll. Eine große Anzahl an Wiederholungsbeprobungen an verschiedenen Flächen, wie sie im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung erhoben werden, ermöglicht jedoch deutlich früher eine Trendanalyse. Dies bedeutet, dass mit Wiederholungsbeprobungen die in einem Abstand von z.B. 10 Jahren gemessen werden, vermutlich signifikante Trends nachgewiesen werden können, wenn zukünftig eine größere Anzahl an Wertepaaren vorliegt.

Signifikante zeitliche Trends für den gesamten Datenbestand (Abbildung 20 und Abbildung 21) wurden nicht festgestellt. Es konnten jedoch Hinweise auf möglicherweise unterschiedliche Richtungen der langjährigen Veränderungen für die verschiedenen Nutzungen abgeleitet werden. Forstwirtschaftliche und landwirtschaftliche Flächen scheinen sich in gegensätzliche Richtungen zu entwickeln (Abbildung 22). Für die Grünlandstandorte ist keine eindeutige Richtung zu erkennen. Da es sich bei den verwendeten Daten um Ergebnisse aus mehreren Laboratorien handelt, von denen jedes Proben aller Nutzungen untersucht hat, sind systematische Fehler der Analytik eher unwahrscheinlich. Die Schwermetallgehalte des oberen Mineralbodenhorizontes (Oberkante 0 cm) unter Wald scheinen generell anzusteigen. Tendenziell höhere Gehalte von Cr, Ni, Cu, Zn, aber auch Pb werden angezeigt. Für Cd können keine Rückschlüsse gezogen werden, da ein Gradient steigender Gehalte nicht ausgeprägt ist. Eine mögliche Erklärung der Sonderrolle von Cd ist der meist niedrige pH-Wert der forstlich genutzten Flächen. Steigende Schwermetall-Gehalte von A-Horizonten unter forstwirtschaftlicher Nutzung sind aufgrund der bekannten Filterwirkung von Wäldern luftbürtigen Schadstoffen gegenüber nicht überraschend und konnten trotz sinkender Schadstoffeinträge mit der Zeit an Standorten der BDF bereits nachgewiesen werden (z.B. Rademacher et al. 2001). Auch konnten ansteigende stoffliche Vorräte in A-Horizonten unter Forst trotz sinkender Depositionsmengen an BDF festgestellt werden. An Forststandorten kann die Stoffnachlieferung durch die in der Humusaufgabe gespeicherten Stoffmengen erfolgen. Die Vorräte der Humusaufgaben sind durch die sinkenden Depositionsmengen an einzelnen Flächen bereits zurückgegangen (LUBW 2008). Möglicherweise ist der Depositionsrückgang zukünftig auch in den A-Horizonten unter Forst anhand abnehmender Schadstoffkonzentrationen flächenhaft feststellbar.

Die Pflughorizonte der Ackerstandorte lassen einen gegenteiligen Trend zu den entsprechenden Horizonten der Forststandorte erkennen. Die Auswertung zeigt Hinweise auf tendenziell geringere Gehalte an Schwermetallen. Eine Ausnahme scheint der Stoff Cadmium zu bilden. Für Ackerflächen gibt es Hinweise auf steigende Gehalte. Für die tendenziell sinkenden Gehalte (Ausnahme Cd) der Ap-Horizonte auf Ackerflächen können mehrere Ursachen in Frage kommen. Für Flächen unter ackerbaulicher Nutzung konnte ein deutlicher Rückgang der pfadbezogenen Einträge durch Immissionen und Mineraldünger in den letzten zwei Jahrzehnten nachgewiesen werden (LfL 2005b). Mögliche Ursachen hierfür sind sowohl meist sinkende Schwermetallgehalte in den Düngern als auch eine Reduzierung der Menge an verwendeten Dünger durch verschärfte Auflagen und Kontrollen in den letzten Jahrzehnten. Neben den sinkenden Einträgen können als Ursache auch mögliche steigende Austräge durch z.B. erhöhte Biomasseproduktion auf den Flächen in Frage kommen. Auswaschungen, Entzug von Schwermetallen über die Ernteprodukte, Anpassungen der Bewirtschaftung und sinkende Gehalte an Schwermetallen in Düngemitteln könnten zum Rückgang der betrachteten Gehalte der Ap-Horizonte führen. Zusätzlich kann ein mögliches unregelmäßiges, tiefes Umbrechen zur verstärkten Einmischung von meist weniger belastetem Unterbodenmaterial führen. Der generelle Trend geht jedoch zu geringeren Umbruchtiefen und zur pfluglosen Bearbeitung. Ein einmaliges oder unregelmäßig tiefes Um-

brechen reicht jedoch aus, um Verdünnungseffekte zu verursachen. Auch ein Abtrag des belasteten Materials durch Erosionsprozesse könnte einen Einfluss haben.

Die Ursachen der sich ändernden Gehalte an Schwermetallen können im Einzelfall vermutlich anhand dokumentierter Bewirtschaftungsdaten interpretiert werden. Für die beschriebenen auffällig hohen Cd-Gehalte verschiedener Pflughorizonte sind beispielsweise sowohl flächenhafte Ursachen (häufiges Auftreten im Bereich des Harz und Harzvorlandes) als auch nutzungsspezifische Gründe (häufig hohe Cadmiumgehalte in Phosphat-Düngern) möglich. Zur näheren Untersuchung wären jedoch Schlaginformationen notwendig, die aktuell nicht für den gesamten Datensatz vorliegen.

### 5.3 Ergebnisse der Auswertungen ausgewählter anorganischer und organischer Parameter

#### 5.3.1 Darstellung der Ergebnisse

Der in Kap. 5.1.2 beschriebene Datenbestand wurde mit einem erweiterten Parameterspektrum analysiert. Die bisher untersuchten Parameter wurden um verschiedene organische Schadstoffe (PAK, PCB und Hexachlorbenzol) ergänzt. Die folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse eines neuen Berechnungs- und Auswertungsprozesses und sind nicht als Ausschnitt der in Kapitel 5.2 vorgestellten Abbildung zu verstehen. Die statistischen Kennzahlen der untersuchten Stoffe, die in den folgenden Abbildungen dargestellt werden, können Anlage 3 entnommen werden (Tabelle 23). Die zweidimensionale Darstellung der Ergebnisse kann in diesem Fall 97 % der im Datensatz vorhandenen Varianz abbilden. Die parallele Auswertung der anorganischen Parameter mit zusätzlichen organischen Schadstoffen zeigt deutliche Ähnlichkeiten zu den bisherigen Ergebnissen. Wie in Abbildung 23 zu erkennen ist, zeigt sich auch in dieser Auswertung ein Kernbereich X (-4 bis 4) und Y (-4 bis 2), in dem die meisten Datenpunkte der 489 Proben angesiedelt sind. Wie auch bei der ersten Auswertung sind zahlreiche Punkte zu erkennen, die sich nicht in die beiden großen Cluster einordnen (Y-Werte >2).

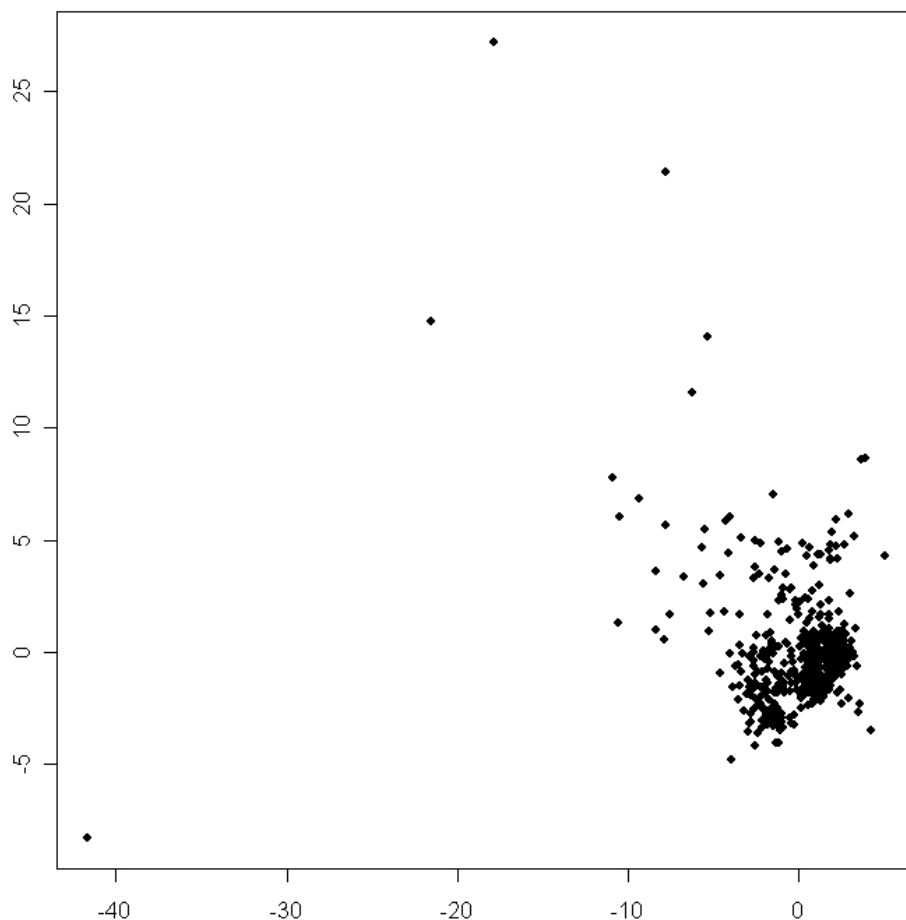


Abbildung 23: Darstellung der Proben

### Unterscheidung der organischen und mineralischen Horizonte

In diesem Kernbereich können abermals zwei Cluster unterschieden werden (Abbildung 24). Wie zuvor wird ein Bereich mit einem kleinen Cluster maßgeblich von den organischen Horizonten gebildet (links der Hilfslinie), während der Bereich rechts der Hilfslinie mit einem größeren Cluster hauptsächlich Proben von mineralischen Horizonten repräsentiert.

Bei den Proben der organischen Horizonte können erneut die L- und O-Horizonte voneinander abgegrenzt werden. Die L-Horizonte finden sich meist links der Hilfslinie im Bereich  $Y \approx -3$ , während die O-Horizonte in den meisten Fällen weiter oben im Plot zu finden sind. Die höchsten Y-Werte der organischen Horizonte weisen die Oh-Horizonte auf. Die Differenzierung der verschiedenen Horizonte des Auflagehumus ist somit auch bei der zusätzlichen Berücksichtigung organischer Schadstoffe möglich.

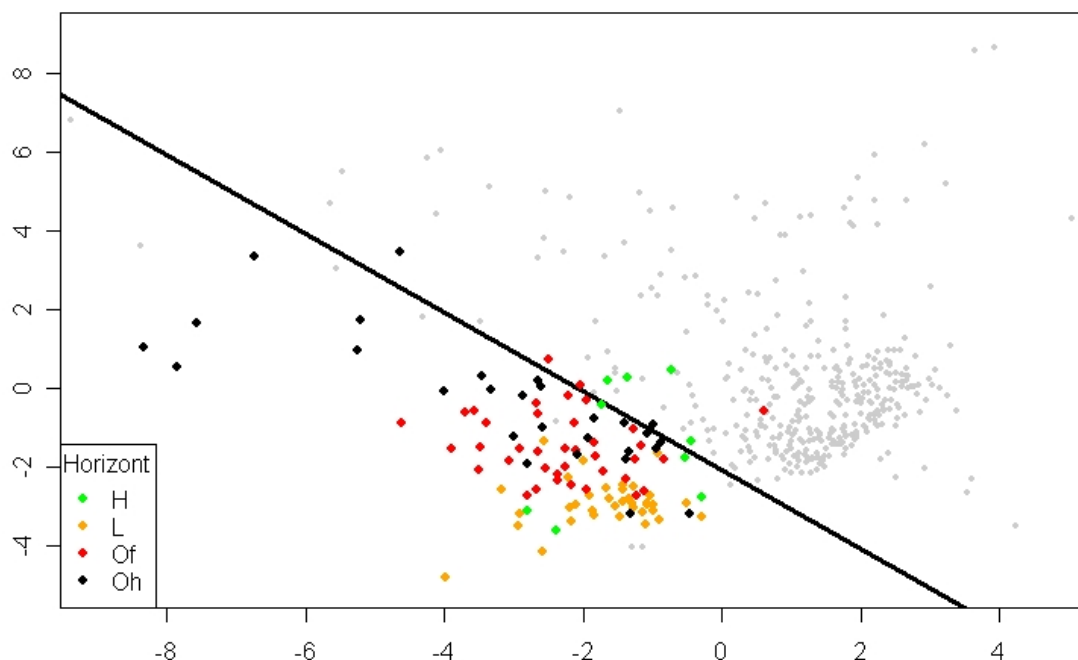


Abbildung 24: Organische Horizonte

## Flächennutzung

Die Aufnahme der organischen Schadstoffe in das untersuchte Parameterspektrum scheint Einfluss auf verschiedene der in Kap. 5.2 beschriebenen Muster zu nehmen. Entsprechend der ersten Auswertung ist erneut eine generelle Trennung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen zu erkennen (Abbildung 25, links). Die unterschiedliche Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen (Acker und Grünland) zeichnet sich jedoch etwas deutlicher ab als in der vorherigen Auswertung. Die Unterschiede spiegeln sich auch in der Darstellung der TOC-Gehalte wider. Die organischen Horizonte werden mehrheitlich der Klasse der höchsten N- und TOC-Konzentration zugeordnet. Mineralische Horizonte von Flächen unter Wald sowie einige Grünlandstandorte weisen ebenfalls hohe Gehalte (>3. Quintil) an TOC auf. Der Bereich (X=2; Y=-1), in welchem hauptsächlich Proben von Ackerflächen zu erkennen sind, ist durch geringe bis mittlere Gehalte gekennzeichnet. In dieser Auswertung steigen die TOC-Gehalte im Bereich der Cluster (Y<2) tendenziell von rechts (rote Punkte) nach links an (Abbildung 25, rechts). Die mit Y-Werten von >2 dargestellten Punkte (Abbildung 25, rechts) zeigen dieses Muster nicht. Hier deuten sich unterschiedliche Einflüsse auf die stofflichen Gehalte der Proben dieser mineralischen Horizonte an.

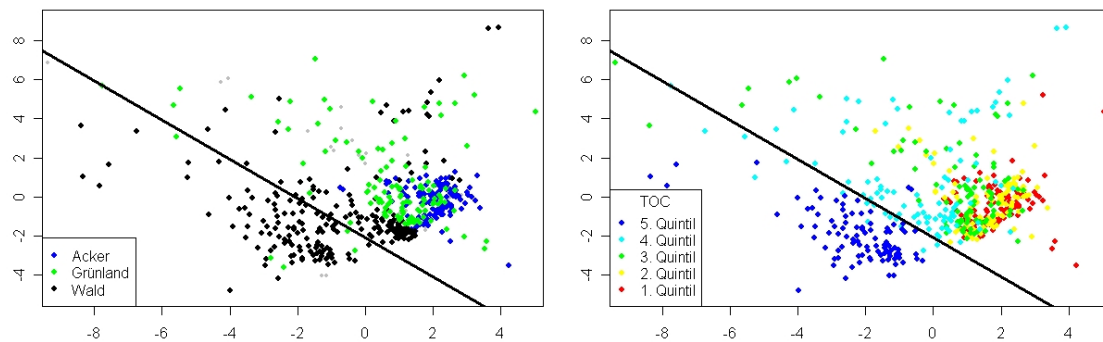


Abbildung 25: Darstellung der Flächennutzung und der klassifizierten TOC-Gehalte

### **pH-Wert**

Die Darstellung der pH-Werte (Abbildung 26) zeigt Ähnlichkeiten mit den in Kap. 5.2 beschriebenen Mustern. Die organischen Horizonte (links der Hilfslinie) zeigen erneut eine Abnahme der pH-Werte vom Bereich  $X \approx -1$ ;  $Y \approx -3$  (meist L-Horizonte) in Richtung links oben, ungefähr parallel zur Hilfslinie (meist Oh-Horizonte). Im Cluster der mineralischen Horizonte (rechts der Hilfslinie) ist erneut ein Anstieg der pH-Werte vom Bereich nahe der Hilfslinie nach rechts zu erkennen. Die Richtung des Anstiegs des pH-Wertes ist jedoch nicht für die Proben im Bereich  $Y > 2$  zu erkennen. In diesem Bereich außerhalb des Clusters ist kein erkennbares Muster ausgeprägt.

Die mineralischen und organischen Horizonte zeigen erneut unterschiedliche Ausprägungen der Muster. Durch die Aufnahme der organischen Schadstoffe ordnen sich nun Proben mineralischer Horizonte im Bereich  $Y > 2$  nicht mehr in die Muster ein.

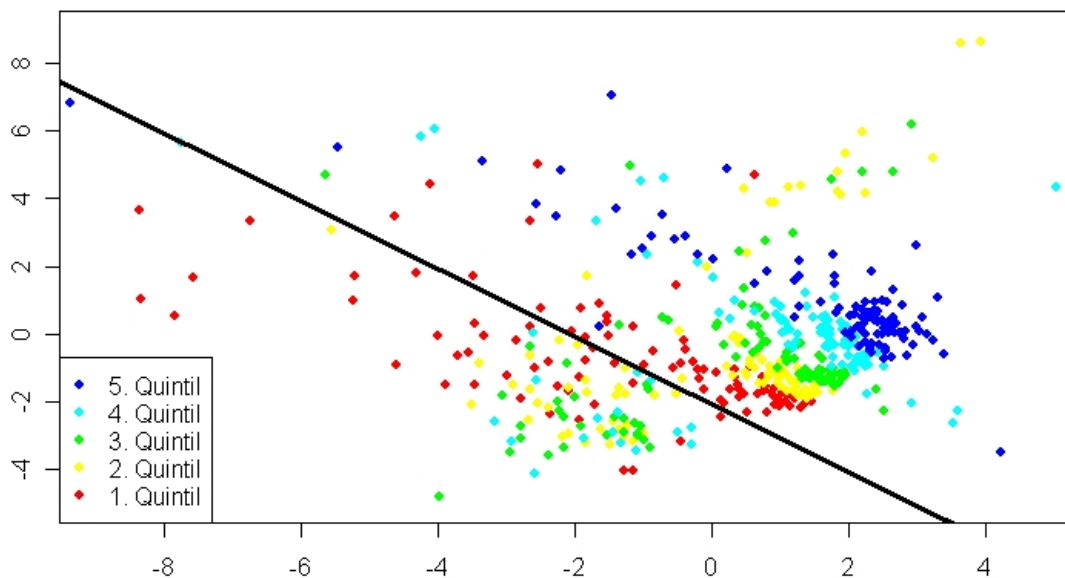


Abbildung 26: Darstellung der pH-Werte



### PCB-Gehalte

Die untersuchten organischen Schadstoffe zeigen verschiedene Muster für das Pflanzenschutzmittel Hexachlorbenzol, die PAK und die PCB. Ein Ansteigen der PCB-Gehalte in eine bestimmte Richtung ist im Cluster der Mineralbodenproben (rechts der durchgezogenen Linie) nicht zu erkennen (Abbildung 27). Für die Stoffe PCB 138 und PCB 153 sind in diesem Cluster höhere Gehalte in Bodenproben forstwirtschaftlicher Flächen (nahe der durchgezogenen Linie auf der rechten Seite) zu erkennen. Auch für die PCB ist ein Muster bei Betrachtung der Proben mineralischer Horizonte mit Y-Werten >2 angedeutet. In der rechten Hälfte finden sich meist Proben der drei niedrigen Gehaltsklassen, in der linken Hälfte sind meist Gehalte im Bereich des 4. und 5. Quintil erkennbar. Die Proben der Auflagehorizonte (links der Hilfslinie) können anhand der PCB-Gehalte unterteilt werden. Proben der höchsten Gehaltsklasse sind in der oberen Hälfte, Proben des 4. Quintils und des 3. Quintils in der unteren Hälfte des Clusters zu finden. Die Richtung des Konzentrationsanstiegs entspricht der des Schwermetallgradienten.

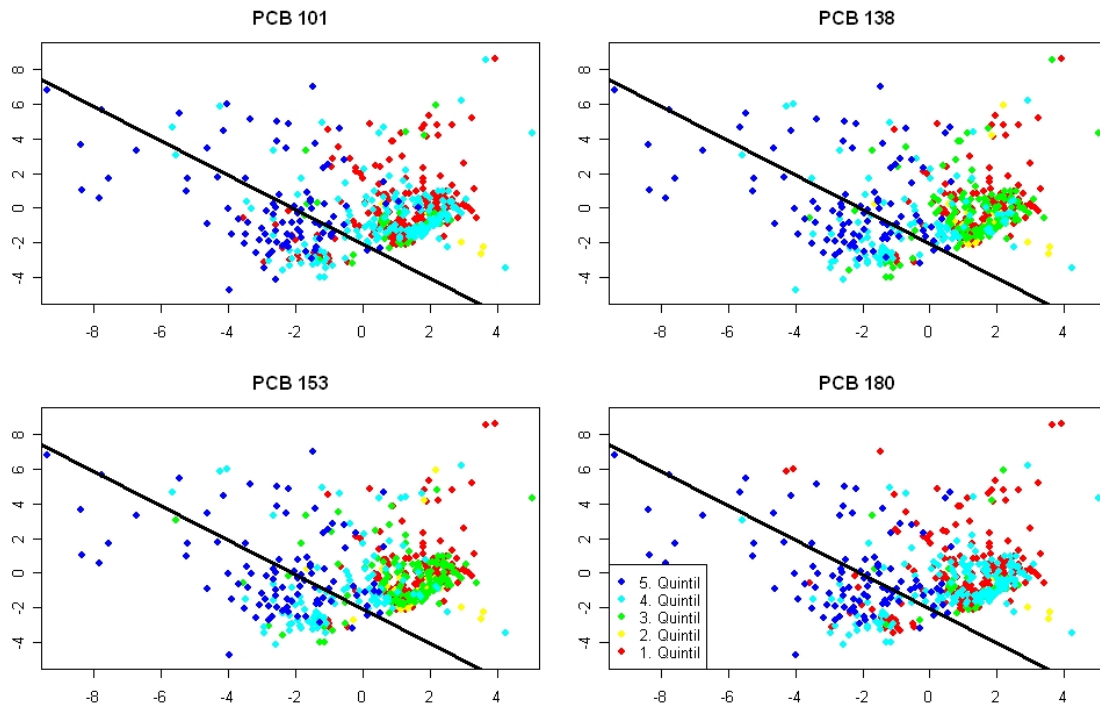


Abbildung 27: Darstellung der PCB-Gehalte

### PAK- und Hexachlorbenzol-Gehalte

Die PAK zeigen auffällige Ähnlichkeiten zu den PCB (Abbildung 28). Im Gegensatz zu den PCB sind jedoch nicht nur die beiden höchsten Gehaltsklassen im Cluster der organischen Horizonte links vertreten. Bei den PAK sind hier alle Gehaltsklassen vertreten. Die vergleichbaren Muster lassen auf ähnliche Einflüsse und Herkunft schließen.

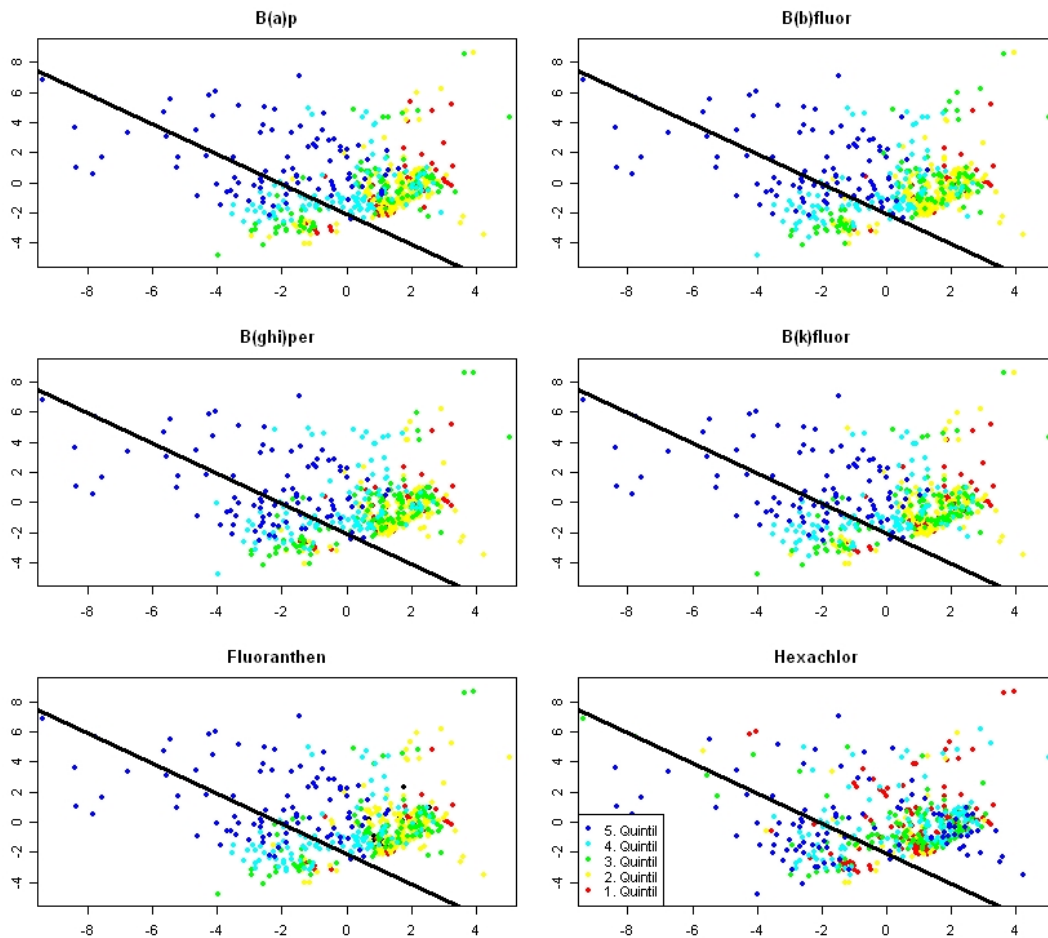


Abbildung 28: Darstellung der PAK- und Hexachlorbenzol-Gehalte

Das Pflanzenschutzmittel Hexachlorbenzol zeigt eine andere Verteilung als die bisher betrachteten Stoffe. Die Proben von organischen Horizonten weisen zwar hohe Gehalte auf, die höchsten Gehalte sind jedoch im Cluster der mineralischen Horizonte (Bereich  $X \approx 2,5$ ,  $Y \approx -1$ ) zu finden. Die höchsten Konzentrationen wurden meist an Proben von Flächen mit ackerbaulicher Nutzung gemessen. Besonders auffällig sind die sieben Punkte mit hohen Gehalten im Bereich  $X=3$ ;  $Y=-3$ , die für alle anderen Stoffe keine deutliche Erhöhung zeigen. Proben mineralischer Horizonte von Böden unter Wald (Bereich  $X \approx 0$ ,  $Y \approx 0$ ) weisen meist geringe Konzentrationen an Hexachlorbenzol auf. Dies steht im Gegensatz zu den hohen gemessenen Konzentrationen an PAK und PCB dieser Proben. Die niedrigen Hexachlorbenzol-Gehalte können keinem bestimmten Bereich in Abbildung 28 zugeordnet werden. Das Ausbleiben von Mustern, die vergleichbar mit denen der anderen untersuchten Stoffe sind, zeigt, dass die Gehalte von Hexachlorbenzol durch andere Mechanismen gesteuert werden.

### Schwermetallgehalte

Die Berücksichtigung der organischen Schadstoffe wirkt sich nur in geringem Maß auf die festgestellten Muster der Schwermetalle aus. Das Muster generell ansteigender Gehalte von niedrigen zu hohen Y-Werten für organische und mineralische Proben (Abbildung 29) ist vergleichbar mit dem in Kap. 5.2.1 beschriebenen Muster. Beispielsweise beschränken sich die beiden höchsten Gehaltsklassen von Ni und Cr meistens erneut auf Proben der Mineralböden und entsprechen dem bekannten Bild. Unterschiede sind jedoch bei den Proben der mineralischen Horizonte unter Wald zu erkennen, die den Gradienten nur schwach oder gar nicht anzeigen. Es zeigt sich, dass die in Kap. 5.2.1 beschriebenen Einflüsse auch bei der zusätzlichen Betrachtung von organischen Schadstoffen immer noch eine wesentliche Rolle spielen, um die Proben hinsichtlich aller Parameter zu bewerten. Die bereits beschriebenen neuen Muster zeigen, dass die Betrachtung der Organika weitere Einflüsse erkennen lässt und nicht zum Verschwinden der alten Muster führt.

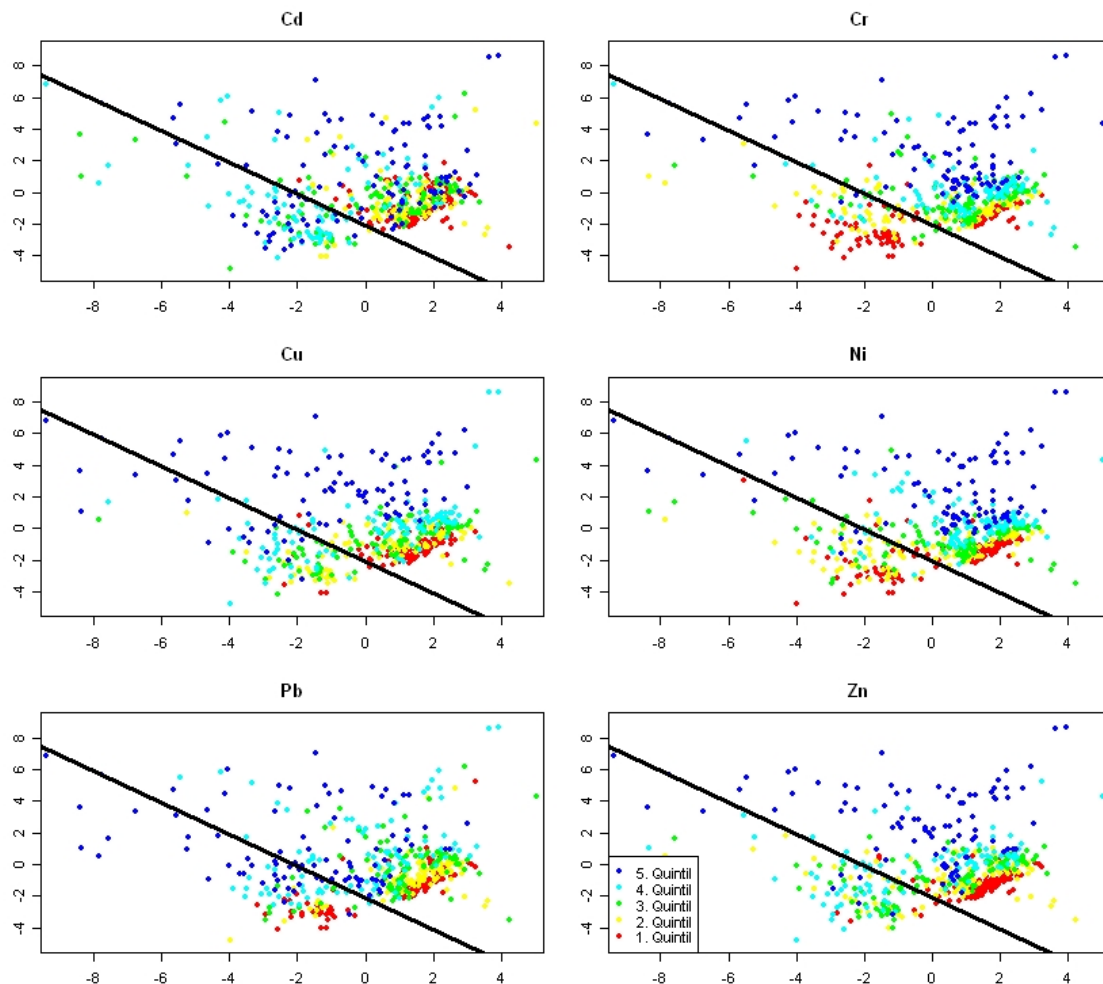


Abbildung 29: Darstellung der Schwermetallgehalte

### Unterscheidung von Oberboden-, Unterboden- und Untergrundhorizont

Die Proben mit Y-Werten  $>2$  zeigen ein Muster, das bisher noch nicht zu erkennen war. Im Gegensatz zum Cluster der Mineralbodenproben und der Auswertung in Kap. 5.2 zeigen diese Proben eine Sortierung nach Horizonten (Abbildung 30). Die Werte mit Y-Werten  $>2$  zeigen im Bereich von  $X=2$  hauptsächlich Unterbodenhorizonte (B-Horizonte). Die wenigen Punkte der betrachteten Untergrundhorizonte (C-Horizonte) sind eher am rechten Rand der Abbildung zu finden. Die Proben von Oberböden (A-Horizonte) mit Y-Werten  $>2$  streuen deutlich, sind jedoch meist im linken Bereich ( $X < 2$ ) dargestellt. Für diese Proben scheint ein Tiefengradient ausgeprägt zu sein.

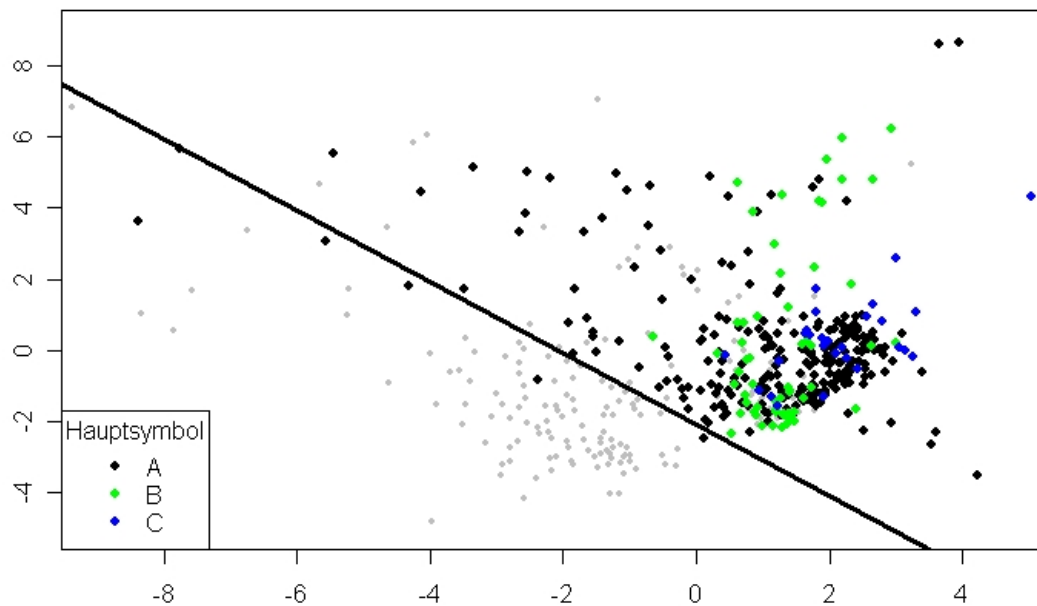


Abbildung 30: Horizonthauptsymbole

### Stoffspezifischer Einfluss der Deposition

Die nähere Betrachtung der A-Horizonte unter Wald (Abbildung 31) zeigt verschiedene Muster, die exemplarisch vorgestellt werden. Im Vergleich zu den vorherigen Abbildungen wird nur für diese Betrachtung der Bereich der beiden Hauptcluster vergrößert (Änderung der Skalierung der X- und Y-Achse), um die Unterschiede besser darstellen zu können. Für B(a)p ist ein Anstieg der Gehalte von rechts unten ( $X \approx 1$ ,  $Y \approx -2$ ) nach links oben (entlang der eingezeichneten Linie) zu erkennen. Chrom hingegen zeigt bis auf die hohen Gehalte (blaue Punkte) oben in der Abbildung kein erkennbares Muster. Für das PCB 153 und Pb sind Muster zu erkennen, die dem B(a)p ähnlich sind. Gehalte der niedrigsten Klasse sind rechts unten und der höchsten Klassen weiter links oben zu finden. Die ähnlichen Muster von B(a)p, PCB 153 und Pb in den Oberböden unter Wald weisen auf den gemeinsamen Haupteintragspfad, die Deposition hin. Hier zeigt sich erneut, dass der maßgebliche Einfluss für die Cr-Gehalte nicht die Deposition ist.

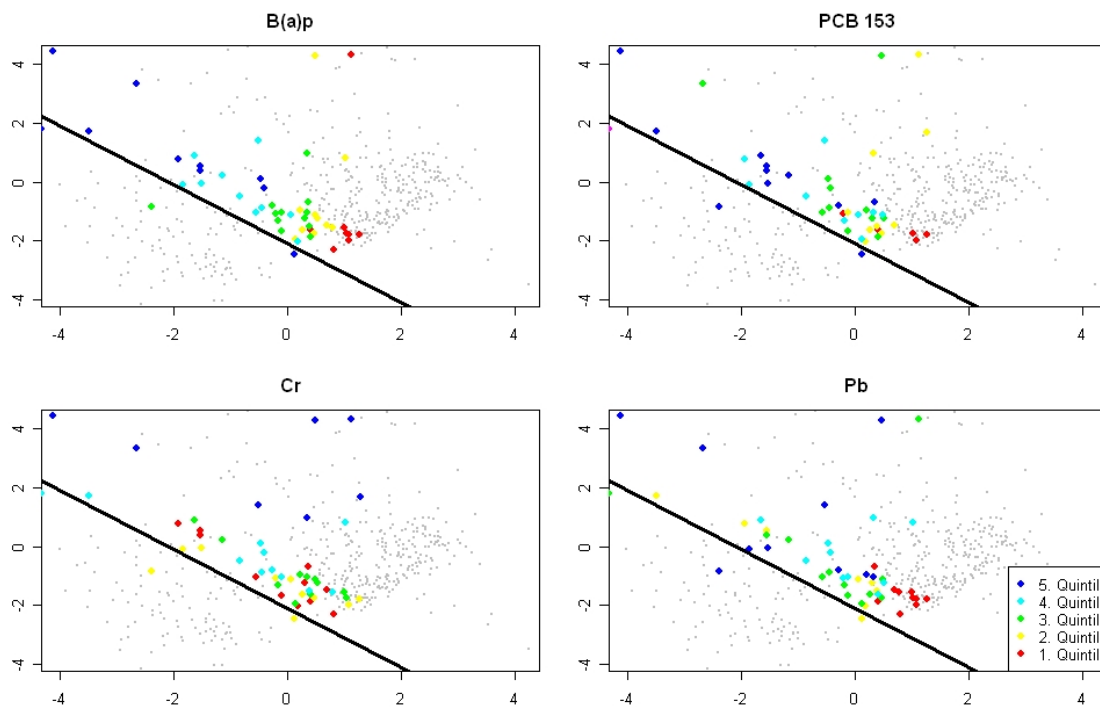


Abbildung 31: Stoffliche Gehalte der A-Horizonte unter Wald

### 5.3.2 Räumliche Muster und zeitliche Trends

Die räumliche Analyse zeigt, dass sich die Ausgangssubstrate der Bodenbildung erneut voneinander trennen lassen. Bei den meisten Mineralbodenproben bietet sich eine Unterteilung anhand der Ausgangssubstrate der Bodenbildung durch die Y-Koordinaten an (rot markierter Bereich in Abbildung 32), die auch die Bodenarten erkennen lassen. Die Carbonatgesteine mit meist tonigen Verwitterungsprodukten sind im oberen Bereich des Clusters zu finden. Die meisten Proben der Ausgangsgesteine mit sandigen Substraten finden sich im unteren Bereich des Clusters. Die Verteilung spiegelt auch die typischen geogenen Schwermetallgehalte wider. Im unteren Bereich des Clusters sind häufig niedrigere Schwermetallgehalte (Sande) zu erkennen (vgl. Abbildung 30). Die Proben der oft stark mit Schwermetallen angereicherten „basischen Magmatite und Metamorphite“ sind meist oben in der Markierung zu finden. In diesem Bereich sind auch die höchsten Schwermetallgehalte zu erkennen (Abbildung 30). Es zeigt sich erneut die Relevanz der geogenen Schwermetalle für die meisten mineralischen Horizonte. Wie schon bei der Auswertung in Kap. 5.2.2.1 ist diese Unterscheidung für die organischen Horizonte nicht mehr relevant.

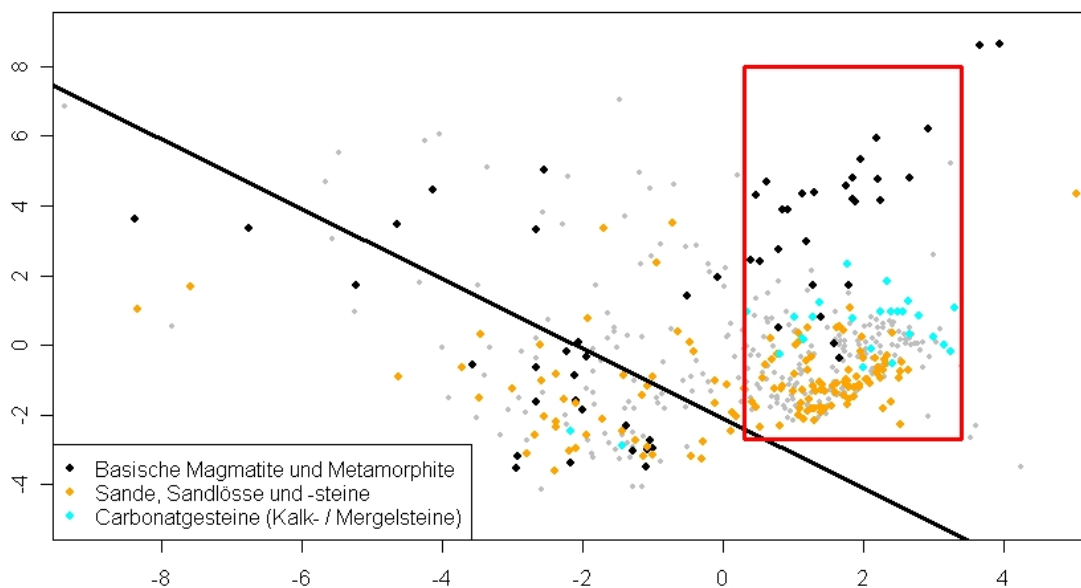


Abbildung 32: Darstellung der Bodenausgangsgesteine

Weitere Analysen hinsichtlich der in Kap. 3 beschriebenen räumlichen Informationen führten – wie auch bei der alleinigen Auswertung der anorganischen Parameter – zu keinem sinnvoll interpretierbaren Ergebnis. Die geringe räumliche Abdeckung erschwert die Identifikation von räumlichen Mustern im Vergleich zur ersten Datenanalyse (Kap. 5.2).

Auswertungen zu zeitlichen Trends sind aufgrund der dafür ungeeigneten Datengrundlage nicht möglich. Durch die Reduzierung der Anzahl der verwendeten Datensätze liegen Informationen zu Wiederholungsuntersuchungen nicht in ausreichender Zahl vor.

### 5.3.3 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass verschiedene Muster sowohl bei der kombinierten Betrachtung organischer und anorganischer Schadstoffe als auch bei der ausschließlichen Berücksichtigung anorganischer Parameter erkennbar sind. Dies trifft z.B. auf die Unterscheidung von Proben der organischen und mineralischen Horizonte zu, wie auch auf den relevanten Einfluss des Bodenausgangsgesteins auf die Schwermetallgehalte. Durch die zusätzliche Berücksichtigung organischer Schadstoffe sind bisher nicht oder nur schlecht erkennbare Muster identifizierbar. Hier sind besonders der verstärkt erkennbare Einfluss der Deposition und das eigene Muster von Hexachlorbenzol zu nennen. Das erweiterte Parameterspektrum führt also nicht zu einem „Verwischen“ von Mustern aufgrund der vergrößerten Anzahl an untersuchten Stoffen. Im Gegenteil kann festgestellt werden, dass durch das erweiterte Parameterspektrum verschiedene Einflüsse erstmals (z.B. die Sonderstellung von Hexachlorbenzol) deutlicher erkennbar sind.

Auch bei der Erweiterung des Parameterspektrums um organische Schadstoffe grenzen sich organische und mineralische Horizonte deutlich voneinander ab. Die beschriebenen Einflüsse von Ausgangsmaterialien mit geogen stark erhöhten Gehalten (z.B. basische Magmatite und Metamorphite) sind weiterhin identifizierbar und bleiben für Proben aus mineralischen Horizonten weiterhin zuerkennen. Die geringeren mineralischen Anteile und meist niedrigen pH-Werte in Proben der organischen Horizonte lassen erneut den geogenen Einfluss in den Hintergrund treten.

Andererseits sind aber auch Veränderungen durch die Aufnahme der anthropogenen (meist luftbürtigen) organischen Schadstoffe in den Abbildungen zu erkennen. Besonders deutlich wird dieser Einfluss bei den mineralischen Proben mit hohen Schadstoffgehalten. Anhand der Gehalte an organischen Schadstoffen können Proben mit z.B. hohen geogenen Gehalten an anorganischen Schadstoffen weiter differenziert werden. Oberflächennah gewonnene Proben (A-Horizonte) weisen höhere Gehalte auf als die der C-Horizonte am selben Standort. Die organischen Schadstoffe verdeutlichen den Einfluss der Tiefe, darstellbar über die Horizonte (Abbildung 27). Bei alleiniger Betrachtung der anorganischen Schadstoffe kann sich ein Muster in vergleichbarer Deutlichkeit nicht ausprägen. Der Grund hierfür ist der erheblich geringere depositionsbürtige Anteil der anorganischen Schadstoffe am Gesamtgehalt im Vergleich zu den organischen Schadstoffen. Der Haupteintragsweg der organischen Schadstoffe über die Deposition wirkt sich indirekt auch auf die Darstellung der Flächennutzung und der TOC-Gehalte aus. Die Proben der Waldböden zeigen im Vergleich zu den landwirtschaftlich genutzten Flächen erhöhte Gehalte an PAK und PCB. Durch die Filterwirkung der Wälder kommt es hier vermutlich zu einer stärkeren Anreicherung der über die Luft eingetragenen PAK und PCB als auf den Acker- und Grünlandstandorten.

In der kombinierten Auswertung ist eine Trennung zwischen Acker- und Grünlandstandorten besser erkennbar als in Kap. 5.2.1. Die in dieser Auswertung deutlicher erscheinende Trennung zwischen Acker- und Grünlandstandorten ist in Zusammenhang mit dem erstmals erkennbaren, nutzungsabhängigen Muster der TOC-Gehalte zu betrachten. Die stärkere Durchmischung von durch die Deposition eingetragenen Stoffen in Ackerflächen durch Pflugsaktivität kann aufgrund der Berücksichtigung der organischen Schadstoffe besser erkannt werden. Die zusätzliche Berücksichtigung der organischen Schadstoffe führt somit zu einer verstärkten Bedeutung des Depositionseinflusses, der wesentlichen Quelle der neu aufgenommenen Parameter.

Die Auswertung mit der SOM zeigt, dass verschiedene übergreifende Einflüsse wie die Deposition und das Ausgangsmaterial der Bodenbildung anhand diverser Muster identifiziert werden können. Zusätzlich können Besonderheiten für einzelne Stoffe erkannt und beschrieben werden. In dieser Auswertung fällt Hexachlorbenzol durch ein besonderes Muster auf. Die höchsten Gehalte an Hexachlorbenzol finden sich entsprechend der Verwendung als Fungizid beim Getreideanbau in Oberböden unter landwirtschaftlicher Nutzung. Hohe Gehalte an Hexachlorbenzol konnten auch in einigen Proben von Auflagen von Waldböden festgestellt werden. Die im Auflagehumus gefundenen Gehalte zeigen, im Gegensatz zu den Gehalten der anderen organischen Schadstoffe und Schwermetalle, keine Unterschiede hinsichtlich der Horizonte. Die hohen Konzentrationen der Auflagen können durch Einträge von Hexachlorbenzol aus möglicherweise belasteten Ackerflächen der näheren Umgebung, z.B. durch Winderosion, begründet werden. Eine weitere mögliche Quelle ist die ehemalige Verwendung von Hexachlorbenzolphaltigen Holzschutzmitteln. Eine Erklärung für die Konzentrationsunterschiede von Hexachlorbenzol in den organischen und mineralischen Horizonten ist, dass die Einträge sich in den Auflagen durch die geringen Trockenrohdichten von Auflagen deutlicher auf die Konzentrationen auswirken als beispielsweise in den darunter liegenden A-Horizonten.

Ubiquitäre (z.B. Deposition), regionale (z.B. Bodenausgangsgestein „Basische Magmatite und Metamorphite“) und punktuelle Einflüsse (z.B. Verwendung von Hexachlorbenzol) können identifiziert und voneinander getrennt werden.



## 6 DATENAUSWERTUNG INTENSIVMONITORING

Im Rahmen des Projektes wurden neben den beschriebenen Daten zur Bodenfestphase der Basis-BDF auch Daten der Bodenlösung aus einem lokalen Bodenmonitoring ausgewertet, welches nicht zum Programm der bundesweiten Boden-Dauerbeobachtung gehört. Dennoch sind die verwendeten Daten in Form und Art der Erhebung mit Daten von Intensiv-BDF zweifelsfrei vergleichbar. Eine Anwendung der hier vorgestellten Auswertung mittels Isomap auf Datenbestände des Intensiv-Monitoring der Boden-Dauerbeobachtung ist somit möglich. Ziel dieser Auswertung ist die Identifikation von Prozessen und Einflüssen, die sich auf die Bodenlösung auswirken. Die hohe zeitliche Auflösung von Daten aus Intensiv-Monitoringprogrammen ermöglicht neben der Erfassung langfristiger Veränderungen auch die Erfassung von saisonalen Einflüssen.

Die Auswertungen wurden mit dem Programm „R“ Version 2.6.1 mit der Erweiterung „Vegan“ (Version 1.13-0) für das Isometric feature mapping (R Development Core Team 2006) durchgeführt. Zur Datenaufbereitung wurde MS Access 2007 genutzt.

### 6.1 Datengrundlage

Die verwendeten Daten wurden innerhalb des Einzugsgebietes des Lehstenbachs (Fichtelgebirge / Bayern) an vier verschiedenen Standorten erhoben. Das Ausgangsmaterial der Bodenbildung im Einzugsgebiet ist ein stark verwitterter Granit. In Senken und kleineren Tälern haben sich Moore entwickelt. Alle untersuchten Flächen stehen unter forstwirtschaftlicher Nutzung und werden hauptsächlich von der norwegischen Fichte (*Picea abies*) bestanden. Informationen zu den verschiedenen Standorten sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Für weiterführende Informationen zur Probenahmetechnik, Analytik und Datenaufbereitung wird auf Schilli et al. 2010 verwiesen.

Tabelle 7: Standortbeschreibung (verändert nach Schilli et al. 2010)

|                                   | <b>Coulissenhieb</b>   | <b>Köhlerloh</b>                 | <b>Gemös</b>                          | <b>Weidenbrunnen</b>          |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Bodentyp</b>                   | Braunerde-Podsol       | Niedermoor                       | Braunerde-Podsol                      | Podsol-Braunerde              |
| <b>Humusauflage</b>               | Rohhumus               | Rohhumus                         | Rohhumus                              | Rohhumus                      |
| <b>Messzeitraum</b>               | 1992 bis 2000          | 1996 bis 2000                    | 1996 bis 2000                         | 1996 bis 2000                 |
| <b>Entnahmetiefen (cm)</b>        | 20, 35, 90             | 50, 100                          | 50, 100, 150, 200                     | 50, 100, 150, 200             |
| <b>Bodenart</b>                   | Lehm bis sandiger Lehm | schluffiger bis sandiger Schluff | schluffiger Sand bis schluffiger Lehm | schluffiger bis lehmiger Grus |
| <b>Bestandsalter 2010 (Jahre)</b> | 137                    | 74                               | 125                                   | 54                            |
| <b>Mittlere Baumhöhe 1992 (m)</b> | 26,7                   | 19,9                             | 27,0                                  | 14,9                          |

|                            | <b>Coulissenhieb</b> | <b>Köhlerloh</b> | <b>Gemös</b> | <b>Weidenbrunnen</b> |
|----------------------------|----------------------|------------------|--------------|----------------------|
| <b>Beprobungsintervall</b> | 14 tägig             | monatlich        | monatlich    | monatlich            |
| <b>Probenanzahl</b>        | 2562                 | 338              | 565          | 596                  |

Für die nachfolgenden Auswertungen standen Informationen von insgesamt 4.061 Analyseergebnissen von Bodenlösungen zur Verfügung. Es wurden folgende 16 Parameter betrachtet:

Al, Ba, Ca, Cl, DOC, Fe, K, Mg, Mn, Na, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, pH, PO<sub>4</sub>, Si und SO<sub>4</sub>

## 6.2 Darstellung der Ergebnisse

In Abbildung 33 sind die berechneten Ladungen der Parameter für die ersten fünf Komponenten dargestellt. Der Grauton orientiert sich an den jeweils berechneten Werten von Spearman  $\rho$  (X-Achsenskalierung zwischen -1 (links) und 1 (rechts)). Die Ausprägung der Komponenten kann als „chemische Signatur“ der Bodenlösung angesehen werden.

Für jede einzelne Komponente kann die durch sie erklärte Varianz innerhalb des Datenbestandes berechnet werden. Somit kann die Relevanz der einzelnen Prozesse und Einflüsse quantifiziert werden. Die durch die ersten drei Komponenten dargestellten Prozesse erklären allein über 86 % der Varianzen in den Daten der Messergebnisse (Tabelle 8). Die mit den weiteren Komponenten assoziierten Prozesse spielen nur eine untergeordnete Rolle, sind jedoch noch identifizierbar. Insgesamt können durch die fünf Komponenten knapp 94 % der Gesamtvarianz erklärt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse und Interpretationen zu den einzelnen Komponenten näher vorgestellt. Statistische Kennwerte zu den stofflichen Gehalten sind in Tabelle 24 in Anhang 2 zusammengestellt.

Tabelle 8: Erklärte Varianzen mittels Isomap

|                                          | <b>Komp. 1</b> | <b>Komp. 2</b> | <b>Komp. 3</b> | <b>Komp. 4</b> | <b>Komp. 5</b> | <b><math>\Sigma</math></b> |
|------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| <b>Anteil der erklärten Varianz in %</b> | 45,7           | 27,5           | 12,9           | 5,8            | 1,6            | 93,5                       |

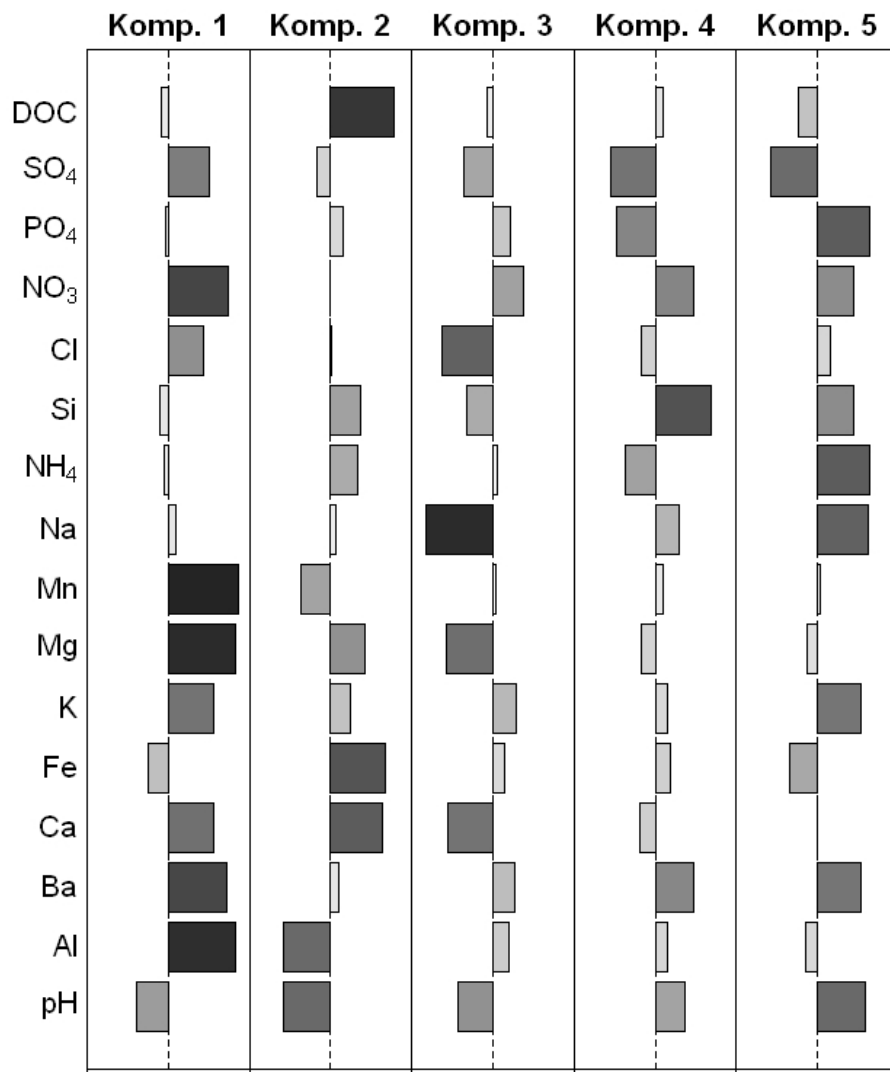


Abbildung 33: Ladungen der interpretierten Komponenten (Schilli et al. 2010)

#### Hinweis zur Interpretation

Wie die Abbildung 33 zu interpretieren ist, sei hier an einem Beispiel verdeutlicht:

Für jede Probe wird für jede Komponente ein Komponentenwert errechnet, der die Stärke der Ausprägung des von der Komponente erfassten Prozesses widerspiegelt. Um welchen Prozess es sich dabei handelt, lässt sich anhand der Korrelationen (= „Ladungen“) der Komponentenwerte mit den einzelnen Messgrößen ermitteln. Der von der 1. Komponente erfasste Prozess führt z.B. zu einer Erhöhung der Mn- und Mg-Konzentrationen und gleichzeitig zu einer Abnahme der pH-Werte.

### 6.2.1 Erste Komponente: Deposition

Die erste Komponente zeigt mehrere stark positive Ladungen (Abbildung 33). Die höchsten sind für die Parameter Al, Ba, Mg, Mn und  $\text{NO}_3$  zu erkennen. Lediglich Fe und pH zeigen auffällige negative Ladungen. Die Ausprägung der Komponente resultiert maßgeblich aus der abnehmenden Menge der stofflichen Deposition. Die erste Komponente kann 46 % der Varianz im Datensatz erklären.

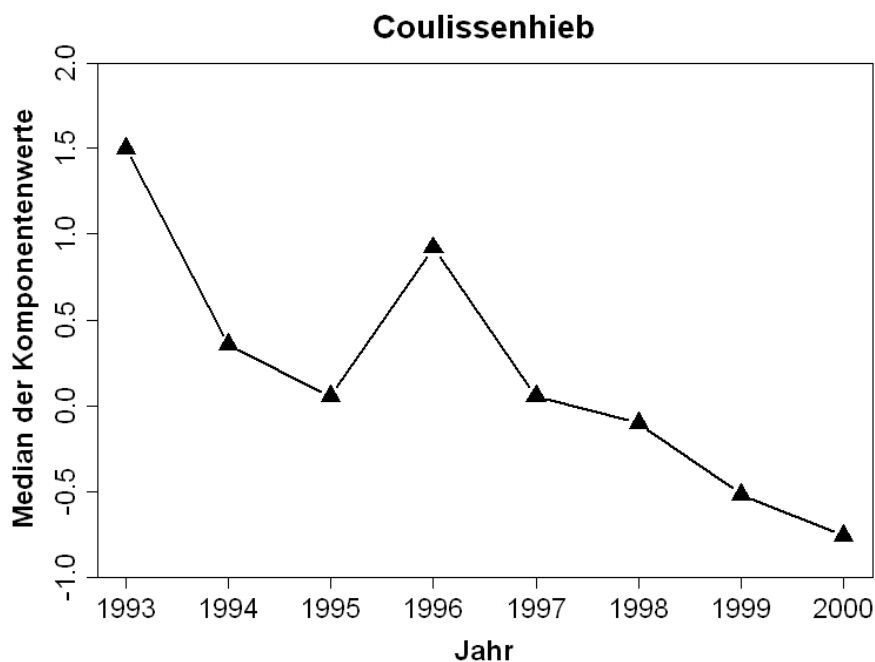


Abbildung 34: Mediane der ersten Komponente im Zeitverlauf

Die Standorte Coulissenhieb und Gemös zeigen einen Rückgang der Komponentenwerte im Verlauf des Untersuchungszeitraums. Weidenbrunnen und Köhlerloh weisen keinen vergleichbaren Trend auf. Für beide Standorte wird somit ein Absinken der Konzentrationen der Parameter mit positiven Ladungen im Verlauf des Untersuchungszeitraums angezeigt. Abbildung 34 zeigt den Rückgang der Komponentenwerte im Untersuchungszeitraum für den Standort Coulissenhieb. Für  $\text{Cl}$ ,  $\text{NO}_3$  und  $\text{SO}_4$  ist die Deposition der Haupteintragspfad in Böden. Ein deutlicher Einfluss der Deposition auf Mn und Al, sowie für Mg in Oberböden am Coulissenhieb ist bereits belegt (Weyer et al. 2008). Zusätzlich konnten für das Einzugsgebiet des Lehstenbachs deutliche Rückgänge der Mengen von Mg, Ca,  $\text{SO}_4$  und  $\text{H}^+$  im Zeitraum 1987 bis 2001 im Kronendurchlass beschrieben werden (Matzner et al. 2004). Mit dem Rückgang der Menge an eingetragenen Stoffen ist ein Absinken der Menge an gelösten Ionen verbunden. Die in Abbildung 34 dargestellten Ergebnisse entsprechen somit dem bekannten bundesweiten Rückgang der Depositionsmengen. Dies stützt die Interpretation als eine maßgeblich durch die Deposition geprägte Komponente.

Die Auswirkungen der Abnahme der Deposition auf die Menge der im Bodenwasser gelösten Ionen spiegeln sich jedoch nicht nur in einem zeitlichen Gradient wider. Neben dem beschriebenen Trend ist ein Tiefengradient für die verschiedenen Standorte ausgeprägt. Die Standorte Gemös (Abbildung 35) und Coulissenhieb zeigen leicht steigende Komponentenwerte mit der Tiefe. Die Auswirkungen der rückläufigen Konzentrationen sollten konsequenterweise verstärkt in den oberflächennahen Horizonten zu finden sein. Folgerichtig werden für oberflächennah gewonnene Proben beider Standorte tendenziell niedrigere Komponentenwerte berechnet als für Proben aus tiefer liegenden Horizonten. Am Standort Weidenbrunnen ist kein solcher Tiefengradient zu erkennen. Eine mögliche Ursache für den fehlenden Tiefengradienten und den nicht ausgeprägten Trend ist möglicherweise das Bestandsalter und damit verbunden die geringere Höhe der Bäume (vgl. Tabelle 7). Der Standort ist umgeben von älteren, höheren Beständen, wodurch geringere Einträge durch Deposition möglich sind. Demzufolge sind die depositionsbedingten Gradienten nicht deutlich ausgeprägt.

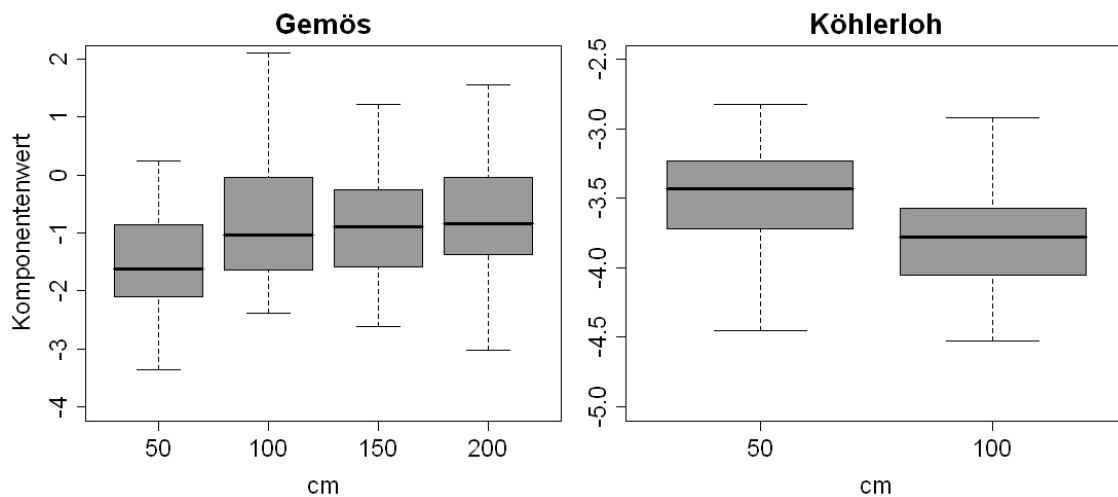


Abbildung 35: Tiefenverläufe (verändert nach Schilli et al. 2010)

Im Gegensatz zu den mit der Tiefe steigenden Komponentenwerten der terrestrischen Standorte steht der Moorstandort (Köhlerloh). Hier sind niedrigere Werte in der Tiefe 100 cm im Vergleich zur Tiefe von 50 cm zu finden (Abbildung 35, rechts). Die Komponentenwerte sind fast ausschließlich negativ und lassen keinen zeitlichen Trend erkennen. Eine Erklärung ist, dass die Saugkerzen im Niedermoor de facto Grundwasser beproben, in welchem reduzierende Bedingungen dominieren. Niedrige  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen und meist nicht nachweisbare  $\text{NO}_3$ -Konzentrationen (Tabelle 24) sind auf Denitrifikations- und Desulfurikationsprozesse im anaeroben Milieu an diesem Standort zurückzuführen (Lischeid et al. 2007). Dementsprechend sinkt die Menge an in der Bodenlösung vorhandenen Ionen deutlich. Dies wird durch die negativen Komponentenwerte angezeigt. Typisch für ein solches Milieu ist auch eine Auflösung von Fe-Oxiden und -Hydroxiden, wodurch  $\text{Fe}^{2+}$  freigesetzt wird. Dieser Prozess erklärt die leicht negative Ladung von Fe. Der Tiefengradient wird durch Einträge mit dem Niederschlag in 50 cm Tiefe und durch den Kontakt mit dem ungesättigten Bereich im Boden bedingt.

### 6.2.2 Zweite Komponente: Versauerung

Neben den maßgeblich durch die Deposition beeinflussten Schwankungen der Gehalte in der Bodenlösung zeigt die zweite Komponente mit 28 % der erklärten Varianz einen weiteren relevanten Prozess an. Die chemische Signatur der zweiten Komponente (Abbildung 33) kann Prozessen zugeordnet werden, die mit der Bodenversauerung (Absinken des pH-Wertes im Boden durch Protoneneinträge) verbunden sind.

Die Kombination aus deutlich positiven Ladungen von DOC und Fe, entgegengesetzt zur negativen Ladung vom pH-Wert, lassen auf Podsolierungsprozesse schließen. Ebenfalls deutlich ausgeprägt sind die negative Ladung von Al und die positive Ladung von Ca. Die zweite Komponente zeigt keinen erkennbaren zeitlichen Trend innerhalb des Untersuchungszeitraumes. Dafür ist ein deutlich ausgeprägter Tiefengradient zu erkennen. Positive Komponentenwerte der terrestrischen Böden sind fast ausschließlich auf die Tiefenstufen 20 cm und 35 cm am Coulissenhieb begrenzt (Abbildung 36). Die Saugkerzen dieser Tiefen entnehmen Proben aus dem Bs-Horizont (20 cm) sowie aus dem Übergangsbereich vom Bs- zum Bv-Horizont (35 cm) und somit aus Bereichen, in denen die versauerungsbedingten Podsolierungsprozesse stark ausgeprägt sind. Das fast ausschließliche Auftreten von positiven Komponentenwerten am Coulissenhieb ist mehr durch die abweichenden beprobten Tiefenstufen und weniger durch unterschiedliche Eigenschaften der Flächen zu erklären. Die Auswirkungen des Podsolierungsprozesses sind also hauptsächlich im oberen Bereich des Mineralbodens (Übergangsbereich vom Bs- zum Bv-Horizont) nachzuweisen.

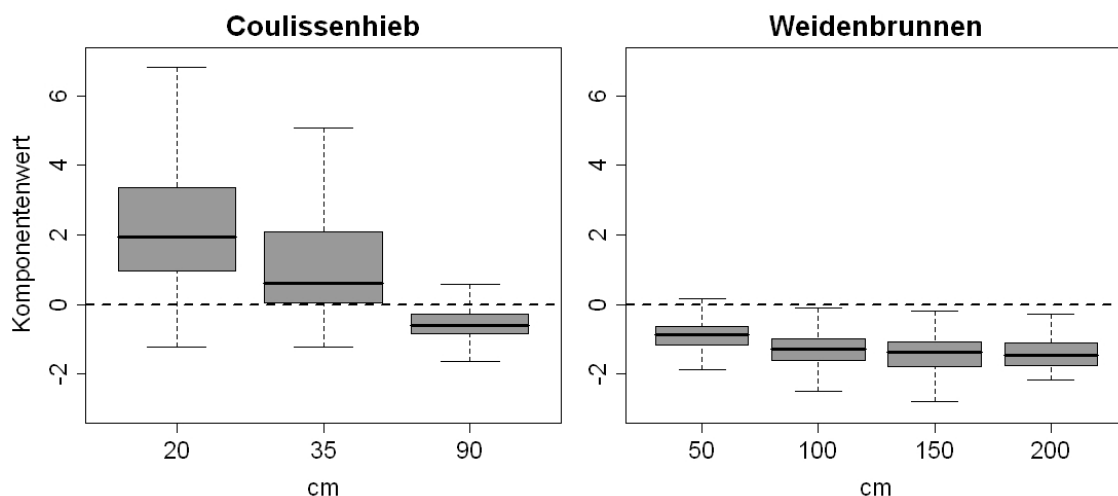


Abbildung 36: Tiefenverlauf der Standorte Coulissenhieb und Gemös (verändert nach Schilli et al. 2010)

Mit einem Median von  $< 4$  sind die pH-Werte der Bodenlösung der Tiefenstufen 20 cm und 35 cm sehr niedrig. Die positive Ladung von Si kann auf durch niedrige pH-Werte ausgelöste und/oder verstärkte Verwitterungsprozesse hindeuten. Auffällig sind die positiven Ladungen von Mg und Ca sowie leicht positive Ladung von K, während die Ladung von Na mit 0,07 nahe 0 liegt. Im Gegensatz zu Na werden Ca, K und Mg in der Bodenlösung verstärkt an organische Substanzen gebunden (Gustafsson et al. 2000), wodurch die unterschiedliche Höhe der Ladungen erklärt werden könnte.

Die im Gegensatz zu positiven Ladungen von Fe und DOC stehende negative Ladung von Al widerspricht der herkömmlichen Erwartung an eine Podsolierung. Da unter Podsolierung die „abwärts gerichtete Umlagerung gelöster organischer Stoffe, oft zusammen mit Aluminium und Eisen“ (Blume & Stahr 2002) verstanden wird, wäre eine positive Ladung von Al zu erwarten. Nahezu alle Horizonte weisen pH-Werte im Aluminium-Pufferbereich auf (Tabelle 24). Möglicherweise wird durch das generell verstärkt auftretende Aluminium das erwartete Ergebnis überlagert. Durch die niedrigeren pH-Werte in 20 cm und 35 cm kommt es zu einer verstärkten Lösung von Fe und DOC, wodurch eine relative Abreicherung von Al erklärt werden könnte.

### **6.2.3 Dritte Komponente: Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Deposition**

Die Signatur der dritten Komponente ist – wie auch die erste Komponente – hauptsächlich durch die Deposition beeinflusst. Im Gegensatz zur ersten Komponente ist jedoch nicht die Menge der Deposition entscheidend, sondern die sich mit der Zeit verändernde chemische Zusammensetzung der Deposition. Der positiven Ladung von  $\text{NO}_3$  und K stehen negativen Ladungen von Ca, Mg, Na, Cl,  $\text{SO}_4$  und pH gegenüber. Die Komponente zeigt – genau wie die erste Komponente – einen Zeit- und Tiefengradienten (Abbildung 37). Knapp 13 % der Varianz im Datensatz können durch diese Komponente erklärt werden.

Im Einzugsgebiet des Lehstenbachs konnten für den Untersuchungszeitraum Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung festgestellt werden. Die Mengen an über die Deposition eingetragenen Cl, Mg und besonders Ca und  $\text{SO}_4$  bei etwa gleichen Depositionsmengen an  $\text{NO}_3$  und K im Untersuchungszeitraum sind belegt (Matzner et al. 2004). Die beobachteten Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Deposition korrespondieren weitgehend mit der Ausprägung der dritten Komponente. Die Beobachtungen im untersuchten Gebiet entsprechen den bundesweiten Veränderungen im Chemismus der Deposition (Gauger et al. 2002). Auffällig ist jedoch die positive Ladung von  $\text{NO}_3$  bei gleich bleibenden Depositionsmengen. Eine mögliche Erklärung ist die Remobilisierung von an die Matrix gebundenen  $\text{NO}_3$ -Ionen durch den starken Rückgang der  $\text{SO}_4$ -Konzentrationen in der Bodenlösung (Matzner et al. 2001). Eine weitere Erklärung ist eine relative Anreicherung. Als Folge zurückgehender Einträge von Basis-Kationen sind bereits relative Anreicherungen von z.B. Al und  $\text{H}^+$  beschrieben worden. Diese Beobachtungen entsprechen den vorliegenden Ergebnissen.

Der Tiefengradient zeigt, bis in welche Tiefe die veränderte chemische Zusammensetzung der Deposition bereits Auswirkungen hat. In der Tiefe von 50 cm der Fläche Weidenbrunnen (Abbildung 37) zeigt sich bereits, dass die Rolle des Sulfats als dominierendes Anion in der Bodenlösung abnimmt. Am Coulissenhieb ist eine vergleichbare Entwicklung, jedoch nur bis zur Tiefe von 20 cm ausgeprägt. Eine Erklärung für den Tiefengradienten können im Verlauf der letzten Jahrzehnte gespeicherte Stoffmengen (z.B.  $\text{SO}_4$ ) sein. In größeren Tiefen können somit Austauschprozesse die Auswirkungen des veränderten Chemismus der Einträge noch immer überlagern.

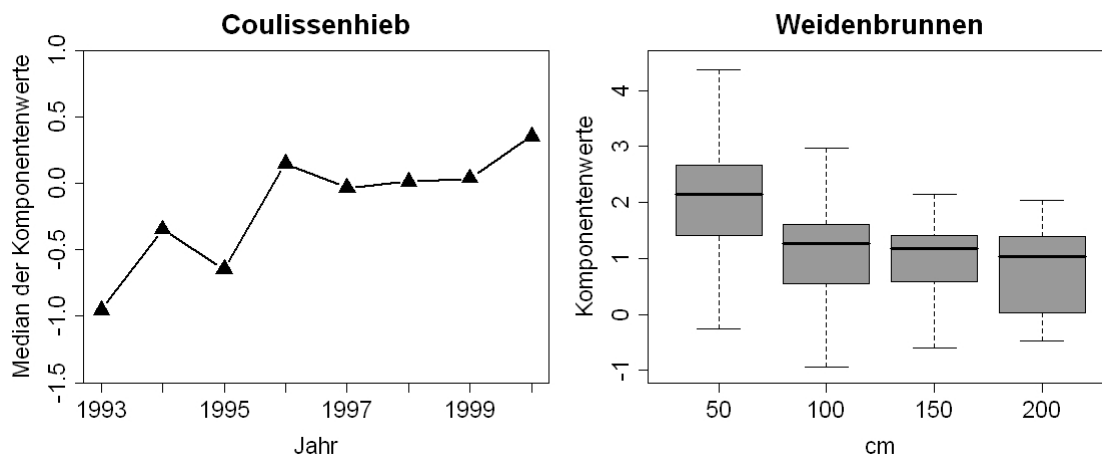


Abbildung 37: Werte der dritten Komponente (verändert nach Schilli et al. 2010)

#### 6.2.4 Vierte Komponente: Wechselwirkungen zwischen Bodenlösung und -festphase

Die vierte Komponente weist positive Ladungen für die Parameter Ba, Na,  $\text{NO}_3$ , pH und Si sowie negative Ladungen für  $\text{NH}_4$ ,  $\text{SO}_4$  und  $\text{PO}_4$  auf. Diese Komponente wird von Wechselwirkungen zwischen Bodenlösung und der -festphase dominiert die für 5,8 % der Varianz verantwortlich sind.

Die positive Ladung von Si, verbunden mit der – wenn auch geringeren – ebenfalls positiven Ladung von Na, weist auf Verwitterungsprozesse hin (Lischeid & Bittersohl 2008). Neben Si und Na geben aber auch die Ladungen mineralbürtiger Stoffe wie Al, Ba und Fe Hinweise auf Verwitterungsprozesse. Das vorherrschende granitische Ausgangsmaterial der Bodenbildung enthält große Mengen an Feldspäten und ist arm an Mg, wodurch die negative Ladung von Mg im Gegensatz zur positiven Ladung von Na erklärt werden kann. Verwitterungsprozesse laufen, im Vergleich zu anderen im Boden stattfindenden Prozessen, eher träge ab. Dies bedeutet, dass Bodenlösungsproben, in denen sich Abbauprodukte der Verwitterung verstärkt nachweisen lassen, eine längere Verweilzeit im Boden hatten. Niederschlagsereignisse führen zur relativen Abreicherung der Verwitterungsprodukte in der Bodenlösung durch Verdünnungseffekte. Positive Komponentenwerte deuten also auf Bodenlösungen mit höherer Verweilzeit im Boden hin. Negative Komponentenwerte zeigen dem entsprechend an, dass sich das Wasser noch nicht lange im Boden befindet. Daraus resultiert, dass nur Stoffe wie z.B.  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$  und  $\text{SO}_4$ , die schnell an der Festphase sorbiert werden, negative Ladungen aufweisen.

Die Verweilzeit des Wassers im Boden steht in direktem Zusammenhang mit der Bodenfeuchte, welche von verschiedenen Faktoren wie z.B. Niederschlag, Temperatur und Wachstumsperioden der Pflanzen beeinflusst wird. Abbildung 38 zeigt die aufgrund der genannten die Bodenfeuchte beeinflussenden Faktoren zu erwartende Saisonalität der Komponente. Der saisonale Verlauf ist dem Jahresgang der Temperatur sehr ähnlich, vermutlich geprägt durch geringere Bodenfeuchte in Zeiten hoher Evapotranspiration. Die in der Abbildung zu erkennende starke Streuung hat mehrere Ursachen:



- Die Höhe der Temperaturen und Niederschläge sowie deren Jahresgänge weichen in den einzelnen Jahren voneinander ab.
- Die verschiedenen Tiefenstufen weisen unterschiedliche Bodenfeuchten und Wertespanssen auf. Die Tiefenstufen 20 cm und 35 cm zeigen die größten Wertespanssen, bedingt durch den größeren Einfluss der Temperatur und des Niederschlags im Vergleich zu tiefer gelegenen Horizonten.
- Die Komponentenwerte der einzelnen Flächen weichen voneinander ab, was z.B. durch Unterschiede in der Bodenart und im Bewuchs erklärbar ist (Tabelle 7).

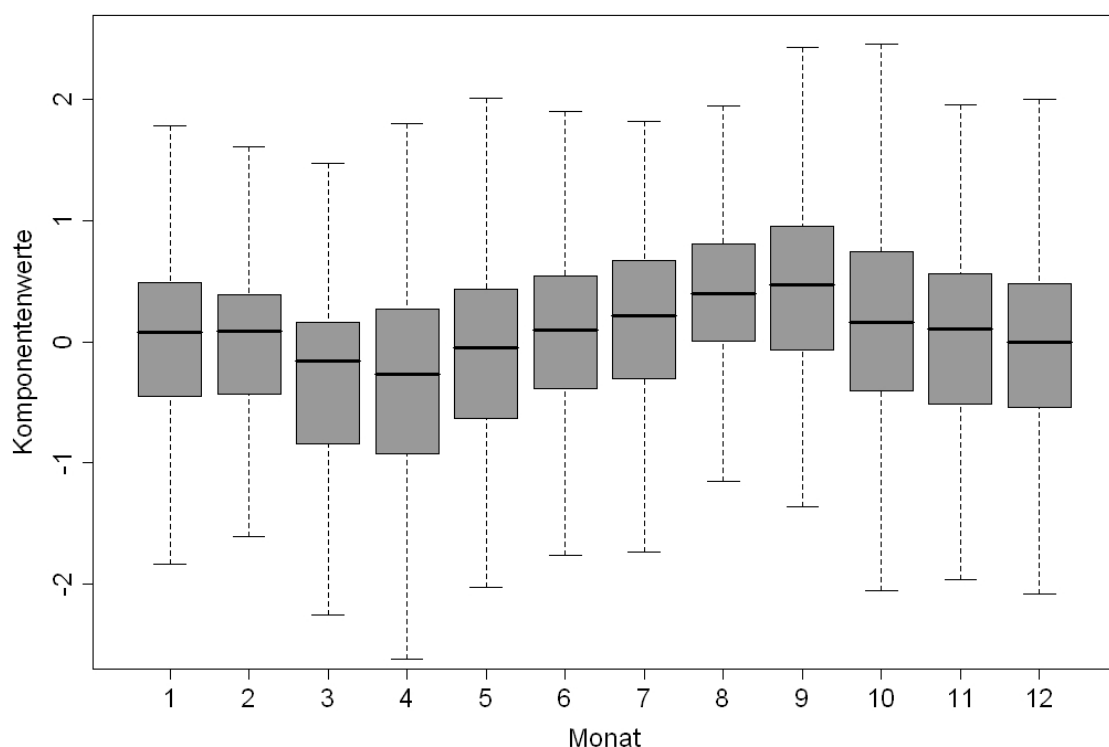


Abbildung 38: Werte der vierten Komponente getrennt nach Monaten, bezogen auf den Gesamtdatenbestand (verändert nach Schilli et al. 2010)

Trotz der unterschiedlichen Tiefenstufen, Flächen und Jahre zeigt sich die Saisonalität auch bei Betrachtung aller Daten. Die höchsten Komponentenwerte mit signifikanten Unterschieden zu den terrestrischen Böden können dem Niedermoor zugeordnet werden. Die an diesem Standort entnommenen Proben können als lateral fließendes Grundwasser angesehen werden. Das Wasser hat dementsprechend eine längere Passage eines Bodenkörpers oder eine Verweilzeit vor Ort hinter sich. Die deutlich niedrigeren Komponentenwerte der Proben aus 50 cm im Vergleich zu den in 100 cm gewonnenen Proben können z.B. durch Verdünnungseffekte durch Niederschlagsereignisse erklärt werden.

Neben dem genannten Tiefengradienten und der Saisonalität fallen sehr hohe berechnete Komponentenwerte (von 5 bis 20) der Monate April und Mai des Jahres 1996 an den Standorten Weidenbrunnen und Coulissenhieb auf. Bodenlösungsproben aus den vier vorherigen Monaten liegen nur selten vor. Die Niederschlagsmengen zeigen keine besonders hohen bzw. niedrigen Werte an. Der vorangegangene Winter allerdings war der mit Abstand kälteste und längste im Untersuchungszeitraum. Eine längere Speicherung des Wassers vor Ort in Form von Eis ist somit wahrscheinlich und kann die fehlenden Bodenlösungsproben und die längere Verweilzeit erklären.

In Abbildung 39 ist zu erkennen, dass sich der Moorstandort Köhlerloh deutlich von den terrestrischen Böden der anderen Standorte unterscheidet. Das am Standort Köhlerloh beprobte lateral fließende Grundwasser hat typischerweise lange Verweilzeiten im Grundwasserleiter / in Böden, wodurch die fast ausschließlich positiven Komponentenwerte erklärt werden können. Der permanente nahezu gleichbleibende Einfluss des Grundwassers ist auch die Ursache für die geringe Wertespanne an diesem Standort. Der Einfluss von Niederschlägen und damit von Wasser mit kurzer Verweilzeit, kann an diesem Standort nur in der Tiefe von 50 cm erkannt werden. Die große Spanne der Werte der terrestrischen Böden spiegelt die stärkeren Schwankungen im Wasserhaushalt dieser Standorte wider. Mögliche Erklärungen für die Abweichungen zwischen den drei Standorten können beispielsweise Unterschiede in der Bodenart und der Exposition sein.

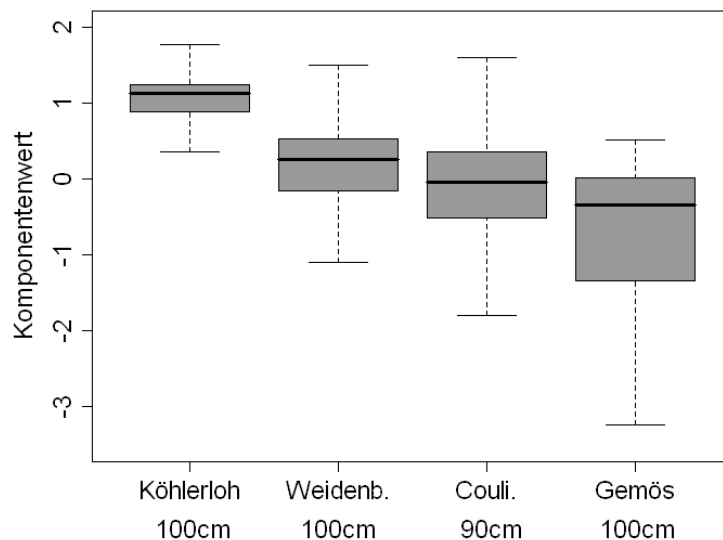


Abbildung 39: Flächenspezifische Werte der vierten Komponente der Tiefenstufe 90 cm bzw. 100 cm (verändert nach Schilli et al. 2010)

### 6.2.5 Fünfte Komponente: Umsetzung organischer Substanz

Positive Ladungen der fünften Komponente sind für Ba, K, Na,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , pH,  $\text{PO}_4$  und Si berechnet, negative Ladungen für  $\text{SO}_4$  und Fe (Abbildung 33). Die fünfte Komponente gibt die durch die mit der Umsetzung organischer Substanz verbundene stoffliche Veränderung der Bodenlösung sowie die Auswirkungen der Aufnahme der freigesetzten Nährstoffe durch Pflanzen und Mikroorganismen auf die chemische Zusammensetzung der Bodenlösung wieder. Die mit der Umsetzung der organischen Substanz ver-

bundenen Prozesse erklären mit 1,6 % nur einen geringen Anteil der Varianz in den vorliegenden Daten.

Positive Komponentenwerte können durch die Freisetzung von K, Na,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$  und  $\text{PO}_4$  im Verlauf der Umsetzung von organischer Substanz begründet werden. Der Entzug von Nährstoffen aus der Bodenlösung durch z.B. die Nährstoffaufnahme von Pflanzenwurzeln wird durch negative Komponentenwerte angezeigt. Auffällig sind die Unterschiede der Mediane der Komponentenwerte zwischen den einzelnen Flächen (Abbildung 40). Die Mediane der Komponentenwerte der Flächen Köhlerloh und Weidenbrunnen sind – im Gegensatz zu Coulissenhieb und Gemös – positiv. Eine mögliche Erklärung ist eine, durch das abweichende Bestandsalter bedingte, unterschiedlich starke Umsetzung der organischen Substanz. Eine erhöhte Mineralisierung der organischen Substanz in jungen Beständen im Vergleich zu älteren (vgl. Tabelle 7) konnte bereits häufiger festgestellt werden (z.B. Cerli et al. 2006), wodurch die positiven Komponentenwerte der jüngeren Bestände erklärbar sind. Umgekehrt werden in älteren Beständen verstärkt organische Substanz und Nährstoffe akkumuliert und organische Säuren gebildet. Die organischen Säuren werden gebildet, um an die Bodenfestphase gebundene Nährstoffe zu lösen (Vestin et al. 2008), wodurch die unterschiedlichen Vorzeichen der Ladungen plausibel sind. Die ähnlichen Ladungen von DOC und Fe geben Hinweise auf mögliche Komplexbildung zwischen beiden Stoffen. Negative Ladungen von DOC, Fe und pH und positive Ladungen der Parameter K, Na,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$  und  $\text{PO}_4$  können somit auf die beschriebenen Prozesse zurückgeführt werden.

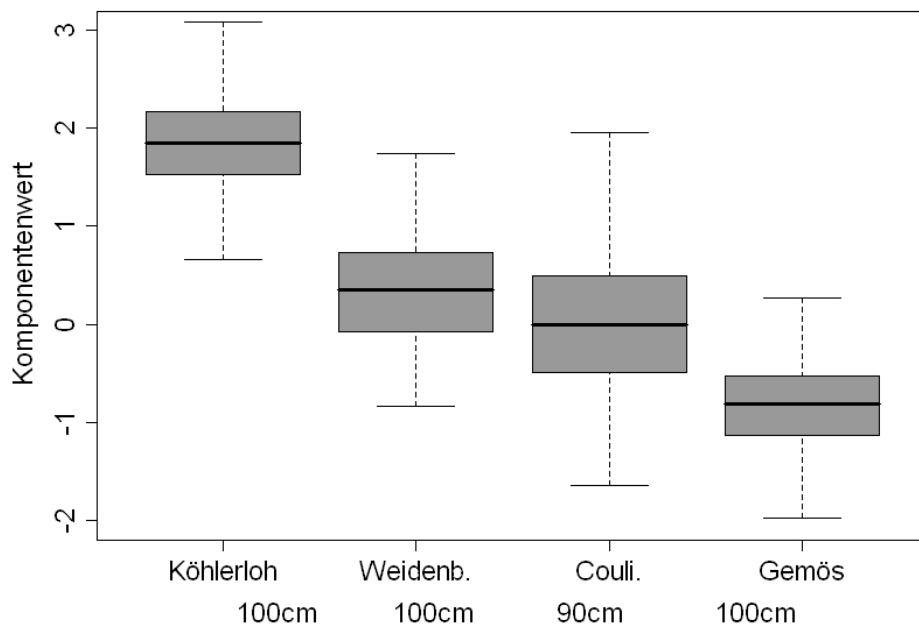


Abbildung 40: Flächenspezifische Komponentenwerte der fünften Komponente der Tiefenstufe 90 cm bzw. 100 cm (verändert nach Schilli et al. 2010)

Die Ausprägung der Komponente wird durch die selektive Stoffaufnahme aus der Bodenlösung durch Pflanzen unterstützt. Verschiedene Stoffe, wie z.B. K, Mg und P, werden in Wachstumsperioden verstärkt, Al und Fe nur in geringem Umfang aufgenommen (Lundström et al. 2000). Ansteigende Konzentrationen in Wachstumsperioden von Al, DOC und  $\text{SO}_4$  in der Bodenlösung sind ebenfalls beschrieben (Vestin et al. 2008).

Bei der Betrachtung der Auswirkungen der Mineralisierung der organischen Substanz sind Nass-/Trockenphasen sowie Bodenfrieren/Tauphasen von Bedeutung. Die Wechsel der Phasen zeigen ähnliche Auswirkungen (Borken und Matzner 2009). Die beschriebenen Einflüsse des Pflanzenwachstums und der z.B. Nass-/Trockenphasen lassen auch für diese Komponente eine Saisonalität erwarten. Eine ausgeprägte Saisonalität dieser Komponente jedoch nicht zu erkennen. Hinweise auf eine Saisonalität sind jedoch an den Standorten Gemös und Weidenbrunnen durch tendenziell höhere Komponentenwerte von März bis August und niedrigere Komponentenwerte von Dezember bis Februar gegeben. Eine Erklärung für die fehlende Saisonalität ist, dass in der vorliegenden Untersuchung keine Bodenlösungen der Auflage oder auflagenah entnommen wurden. In auflage- oder oberflächennahen Horizonten ist ein größerer Einfluss der durch diese Komponente abgebildeten Prozesse zu erwarten. Zusätzlich können das unregelmäßige Frieren des Bodens sowie mögliche zeitliche Verschiebungen in oberflächennahen Nass-/Trockenphasen innerhalb der einzelnen Jahre eine Erklärung für die nur angedeutete Saisonalität der Komponente sein. Hinweise auf einen relevanten Einfluss von z.B. dem Bodenfrieren geben die auch für diese Komponente berechneten Höchstwerte (Komponentenwerte  $> 5$ ) von Proben des Frühjahrs 1996.

#### **6.2.6 Relevanz der Prozesse für einzelne Parameter**

Neben der Identifikation von Prozessen über die Komponenten bietet das Verfahren des Isomap auch die Möglichkeit, die Relevanz der einzelnen Prozesse für die untersuchten Parameter festzustellen. In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass einige Parameter durch mehrere Prozesse beeinflusst werden, während andere wiederum maßgeblich von einem Prozess betroffen sind. Die Konzentrationen von Mn in der Bodenlösung werden beispielsweise hauptsächlich durch die Deposition beeinflusst. Für die DOC-Konzentrationen ist die Versauerung der maßgebliche Prozess, während die Umsetzung der organischen Substanz für den betrachteten Bereich des Bodens ( $\geq 20$  cm Mineralboden, vgl. Tabelle 7) kaum eine Rolle spielt. Die Änderungen der Konzentrationen von  $\text{NO}_3$  und  $\text{SO}_4$  in der Bodenlösung hingegen werden durch eine ganze Reihe von Prozessen bewirkt.

#### **6.2.7 Diskussion und Schlussfolgerungen**

Mit dem Isomap-Verfahren können einzelne Prozesse identifiziert und quantifiziert werden, die Auswirkungen auf die Konzentrationen der Bodenlösung im untersuchten Gebiet haben. Es können sowohl räumliche als auch zeitliche Trends erfasst werden (Schilli et al. 2010). Zusätzlich werden auch einzelne Extremereignisse erfasst und über die einzelnen Komponenten sinnvoll abgebildet (Tabelle 9). Die Auswertungen belegen, dass auf Grundlage von Daten, die den an Intensiv-BDF erhobenen Daten ähnlich sind, Prozesse erforscht und identifiziert sowie ihre räumliche und zeitliche Entwicklung erfasst werden kann. Die Auswertungen und deren ausführliche Interpretationen zeigen, dass teilweise auch geringe Änderungen der Zusammensetzung der

Bodenlösung wichtige Hinweise auf Prozesse geben und sinnvoll erklärt werden können. Dies konnte beispielsweise an den nur schwach ausgeprägten negativen Ladungen von pH und Fe der ersten Komponente gezeigt werden.

Tabelle 9: Identifizierbare Regelhaftigkeiten der identifizierten Prozesse und Einflüsse

| K. | Benennung                                                 | Erkennbare Regelhaftigkeiten                                  | Erklärte Varianz |
|----|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------|
| 1  | Deposition                                                | Zeitlicher Trend, Flächenunterschiede, Tiefengradient         | 45,7 %           |
| 2  | Versauerung                                               | Tiefengradient (Flächenunterschiede)                          | 27,5 %           |
| 3  | Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Deposition | Zeitlicher Trend, Flächenunterschiede, Tiefengradient         | 12,9 %           |
| 4  | Wechselwirkungen zwischen Bodenlösung und -festphase      | Flächenunterschiede, saisonale Einflüsse, Extremereignis      | 5,8 %            |
| 5  | Umsetzung organischer Substanz                            | Angedeutete Saisonalität, Extremereignis, Flächenunterschiede | 1,6 %            |

Die Ergebnisse der Auswertungen zeigen, welche Parameter für die identifizierten Prozesse relevant sind (vgl. Kap. 6.2.6). Zusätzlich können Zeiträume, Flächen oder Tiefenstufen identifiziert werden, in denen bestimmte Prozesse verstärkt oder kaum nachweisbar sind. Auf Basis der Ergebnisse kann somit eine gezielte Datenauswahl für weitere Untersuchungen mit konkreten Fragestellungen zu Einzelprozessen stattfinden. Der Fragestellung entsprechend können nun auch Parameter identifiziert werden, die entweder eine wichtige oder eine untergeordnete Rolle spielen. Die Identifikation einer für weiterführende Fragestellungen zu verwendenden Auswahl von Daten ist somit einfacher und zielgerichteter möglich.

Eine genauere Betrachtung und der Vergleich der einzelnen Komponenten kann zu weiteren Erkenntnissen führen. Für die Depositionskomponenten (erste und dritte Komponente) sind zeitliche Trends beschrieben. Ein solcher Trend ist jedoch für die mit der Versauerung assoziierten Prozesse (2. Komponente), welche durch sauer wirkende Niederschläge ausgelöst werden können, nicht beschrieben. Der Rückgang der gesamten Depositionsmenge und des im Boden sauer wirkenden  $\text{SO}_4$  ließe einen Trend erwarten. Die aktuell geringe oder teilweise ausbleibende Wirkung des Depositionsrückgangs auf die Versauerung wurde schon häufiger beschrieben (z.B. LfU 2008). Dies ist zum einen auf die parallele Reduzierung von basisch wirkenden Einträgen (vgl. Kap. 6.2.1), zum anderen durch die große Menge an z.B. gespeichertem  $\text{SO}_4$  zu erklären (Kap. 6.2.3). Somit liefern nicht nur die einzelnen Komponenten, sondern auch deren Kombination wertvolle Informationen.

## 7 FAZIT

Mit den durchgeführten Arbeiten wurden erstmals umfassende, multivariate nicht-lineare statistische Auswertungen eines bundesweiten Datenbestandes der Boden-Dauerbeobachtung durchgeführt. Die verwendeten Verfahren konnten zeigen, dass sie zur Auswertung von sehr großen, heterogenen Datensätzen, wie sie durch das Bodenmonitoring erzeugt werden, geeignet sind. Die im Datensatz vorhandenen räumlichen Muster und zeitlichen Trends können in einem Schritt erkannt und miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Das Isometric Feature Mapping ist durch die Berücksichtigung von möglichen nicht-linearen Strukturen im Datensatz besser geeignet als die häufig verwendete lineare Hauptkomponentenanalyse. Im gezeigten Beispiel ist der Vorteil zwar nur gering, zeigt aber, dass üblicherweise nicht berücksichtigte lineare Zusammenhänge vorhanden sind. Eine deutlichere Überlegenheit kann für stärker anthropogen beeinflusste Standorte wie Ackerflächen oder für dynamische Systeme wie Auenböden erwartet werden.

Die SOK-SAM zeigt ebenfalls sehr gute Ergebnisse. Die im Datensatz vorhandenen Muster können identifiziert und sinnvoll interpretiert werden. Im Gegensatz zur Clusteranalyse, die versucht, den Datensatz in sich deutlich voneinander unterscheidende, möglichst homogene Cluster aufzuteilen, können die Unterschiede mittels SOK-SAM auch bei vorhandenen Überlappungsbereichen zwischen verschiedenen heterogenen Gruppen erkannt werden. Aufgrund verschiedener Standorte, die sich nicht in das Bild einfügen, wäre der in der SOK-SAM zu erkennende Unterschied zwischen den verschiedenen organischen Horizonten (vgl. Abbildung 15) in einer Clusteranalyse nur schwer oder gar nicht zu erkennen.

Die Auswertungen des Datenbestandes mit der SOK-SAM konnten belegen, welche Einflüsse und Prozesse bundesweit maßgeblichen Einfluss auf die untersuchten Parameter zeigen. Es liegen somit Informationen vor, welche Eigenschaften und Prozesse anhand des vorliegenden Datensatzes untersucht werden können. Weiterführende Fragestellungen können nun auf Basis der Ergebnisse entwickelt und sinnvoll formuliert werden. Von erheblichem Vorteil ist dabei, dass jetzt die Daten z.B. einzelner Flächen, Regionen, Zeitabschnitte oder Tiefenstufen hinsichtlich ihrer Eignung für Auswertungen zu einzelnen Einflüssen bewertet und für weitere Auswertungen gezielt genutzt werden können und sollten. An Einzelstandorten konnte gezeigt werden, dass die Auswahl (z.B. Welche Proben sind deutlich von geogenen bzw. anthropogenen Belastungen beeinflusst?) sogar für einzelne Proben eines Standortes möglich ist. Mit den vorgestellten Verfahren sind somit Auswertungen zu räumlichen und zeitlichen Trends möglich.

Mittels des Isomap-Ansatzes können die Wirkungen von verschiedenen Prozessen und Einflüssen (bezogen auf den untersuchten Datensatz) quantifiziert werden. Das Verfahren gibt Hinweise auf die Relevanz der identifizierten Prozesse für die gemessenen Ergebnisse einzelner Proben im Vergleich zu den anderen untersuchten Proben.

Nur wenige Prozent der enthaltenen Informationen konnten mit den verwendeten Verfahren nicht abgebildet werden. Neben der fachlichen Datenauswertung kann auf Basis der Ergebnisse auch eine zielgerichtete Datenauswahl zur genaueren Untersuchung spezieller Fragestellungen erfolgen. Zusätzlich ist eine Qualitätskontrolle der Daten bzw. eine Identifikation von auffälligen, erklärungsbedürftigen Werten möglich.

Im Hinblick auf die wesentlichen Ziele des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms,

- 1) den aktuellen Zustand des Bodens zu erfassen und darzustellen,
- 2) die langfristigen Änderungen der Böden zu beschreiben und
- 3) zukünftige Entwicklungen zu prognostizieren,

können verschiedene Aussagen getroffen werden:

- Zu 1) Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass eine Erfassung und Beschreibung von Einflüssen, welche die untersuchten Stoffgehalte beeinflussen, auf Basis der vorliegenden Daten der Boden-Dauerbeobachtung möglich ist. Es konnten verschiedene dominante Einflussgrößen identifiziert und ihre Auswirkungen auf den Stoffgehalt des Bodens dargestellt werden. Dies sind beispielsweise die Deposition, die Relevanz der Ausgangsgesteine und pedogenetische Prozesse wie die Ausbildung verschiedener Horizonte. Sowohl natürliche als auch anthropogene Einflüsse, die teilweise räumlich und zeitlich abgrenzbar sind, wirken entscheidend auf die Gehalte an Schadstoffen. Mittels der Auswertung von Bodenlösungsdaten konnten die für die untersuchten Daten wesentlichen Prozesse identifiziert und ihr Einfluss quantifiziert werden.
- Zu 2) Das Programm der Boden-Dauerbeobachtung ist in der Lage, langfristige Änderungen in Böden zu beschreiben. Die vorliegenden Daten zur Bodenfestphase lieferten Hinweise auf zeitlich bedingte Veränderungen im Stoffbestand. Deutliche Trends lassen sich auf der Basis von Daten ableiten, die vergleichbar mit Daten der Intensiv-BDF sind. Hier können nicht nur langfristige, sondern auch saisonale Einflüsse beschrieben werden.
- Zu 3) Durch die Identifikation und Beschreibung der zeitlichen Entwicklungen können auf Basis entsprechender Modelle zukünftige Entwicklungen prognostiziert werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass verschiedene Parameter der Böden kontinuierlich erfasst werden, um neue Einflüsse zu erkennen bzw. Veränderungen in bereits identifizierten Trends zu erfassen, die die Prognosen beeinflussen können. Dazu ist eine Fortführung des Monitorings unabdingbar.

Neben den Leistungen für den Bodenschutz kann die Boden-Dauerbeobachtung einen wesentlichen Teil zur nach BNatSchG § 6 Abs. 2 geforderten Umweltbeobachtung beitragen. Als physikalisch, chemisch und biologisch sehr gut untersuchte Flächen können die BDF bereits wichtige Daten für ein umfassendes Umweltmonitoring stellen. Auch können und sollten die Flächen für zukünftige Aufgaben in diesem Bereich verstärkt genutzt werden, da umfangreiche Datenmengen bereits zur Verfügung stehen.

Durch die durchgeführten Arbeiten sind verschiedene Einflüsse und Prozesse erkennbar. Abschätzungen ihrer Auswirkungen auf einzelne Stoffe und Flächen sind möglich. Neben dem Erkenntnisgewinn der Relevanz dieser Einflüsse und Prozesse kann auf Basis der Ergebnisse der vorgestellten Verfahren eine gezielte Datenauswahl erfolgen. Auf deren Basis sollten zukünftig weiterführende Auswertungen durchgeführt werden. Von erheblichem Vorteil ist dabei, dass jetzt die Daten z.B. einzelner Flächen, Regionen, Zeitabschnitte oder Tiefenstufen hinsichtlich ihrer Eignung für Auswertungen zu einzelnen Einflüssen bewertet und für weitere Auswertungen gezielt genutzt werden können und sollten.

Die Betrachtung eines bundesweiten Datensatzes ermöglicht durch die große Anzahl der vorliegenden Proben eine frühzeitige Erkennung von Trends. Auf Basis von ein oder zwei Wiederholungsuntersuchungen kann für eine einzelne Fläche meist keine abgesicherte Aussage hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung getroffen werden. Dies trifft im Besonderen auf Parameter zu, deren Gehalte sich nur geringfügig mit der Zeit ändern. Für Einzelflächen sind statistisch signifikante Veränderungen solcher träge reagierender Parameter somit erst nach sehr langen Zeiträumen zu erwarten. Die große Anzahl an Wiederholungsuntersuchungen in einem bundesweiten Datensatz lässt jedoch Hinweise auf Trends schon nach vergleichsweise kurzer Zeit zu. Mit solchen Hinweisen können Ausrichtungen von Auswertungen kleinerer Datensätze zielgerichtet angepasst werden. Zusätzlich können an Einzelstandorten identifizierte Veränderungen möglicherweise besser interpretiert werden, da nun zusätzliche Erkenntnisse vorliegen. Die sowohl räumlichen als auch zeitlichen Muster zeigen, dass der Weg der Erfassung von Veränderungen durch ein umfassendes Monitoring und geeignete Verfahren der Auswertung zu guten, interpretierbaren und vor allem plausiblen Ergebnissen führt.

Andererseits ist jedoch festzustellen, dass im Hinblick auf die Verwendbarkeit des Basis-BDF-Datenbestandes für länderübergreifende multivariate Auswertungen Defizite bestehen. Ein bundeseinheitliches Vorgehen bei der Datenerhebung und Dokumentation ist derzeit nicht gegeben. Vom sehr umfangreichen Datenbestand mit Analysen von mehr als 8.000 analysierten Bodenproben konnte nur ein Bruchteil der tatsächlich vorhandenen Daten für die länder- und parametergruppenübergreifende Auswertungen verwendet werden. Gründe hierfür sind eine teilweise nicht oder nur unzureichend durchgeführte Dokumentation, die Verwendung unterschiedlicher Analysemethoden oder nicht vergleichbare Daten der verschiedenen Parametergruppen (vgl. Anlage 1). Die genannten Probleme führen dazu, dass flächendeckende bundesweite Auswertungen selbst für einzelne Stoffe mit den vorliegenden Daten nur begrenzt möglich sind. Multivariate statistische Auswertungen sind aufgrund der häufig nicht vorhandenen parallelen Messungen mehrerer Parameter nur mit stark eingeschränktem Parameterspektrum möglich. Dies konnte am vorliegenden Datensatz der Boden-Dauerbeobachtung gezeigt werden. Das teilweise deutlich abweichende Datum der Probenahme zur Ermittlung der Werte verschiedener Parametergruppen macht eine Zusammenführung mancher Daten nicht sinnvoll möglich (vgl. Anhang 1 – Tabelle 15). Ein solides Vorhalten und die konsequente permanente Aktualisierung des parametergruppen- und länderübergreifenden Datenbestandes ist für zukünftige bundesweite Auswertung aller Art dringend angeraten.



## **8 HANDLUNGS- UND FORSCHUNGSBEDARF ZUR WEITERENTWICKLUNG DES MONITORINGS**

Auf Basis der durchgeführten Auswertungen und vorangehenden Arbeiten wird der Handlungs- und Forschungsbedarf wie folgt formuliert.

### **8.1 Methodendokumentation**

Erfahrungen im Umgang mit Daten und die Auswertung der vorliegenden Daten haben gezeigt, dass die bei der Analyse der Bodenproben verwendeten Methoden im verwendeten Datenbankauszug teilweise in nicht ausreichendem Umfang oder gar nicht dokumentiert sind oder über längere Zeit nicht mehr nachvollzogen werden können. Eine häufige Ursache sind wechselnde Sachbearbeiter oder Labore sowie Speicherung in individuellen Datenformaten. Eine zuverlässige und für den auswertenden Bearbeiter verfügbare Dokumentation der Methoden ist jedoch für eine länderübergreifende Auswertung zwingend notwendig. Auch bei den vorliegenden Daten hat sich gezeigt, dass eine verbesserte Dokumentation der verwendeten Methoden zur erheblichen Verbesserung der Qualität des Datenbestandes führt. Mangelhafte Dokumentation der Daten, wie z.B. nicht dokumentierte Untersuchungsmethoden (vgl. Anlage 1), führt häufig zur Nichtverwendbarkeit der erhobenen Daten. Die geleistete Arbeit, Investitionen, Aufbereitungs- und Analysekosten, die bereits getätigte Arbeitszeit sowie der mögliche Informationsgewinn sind in diesem Fall verloren.

Auch bei geregelten Verfahren sollte eine genaue Dokumentation durchgeführt werden, da einzelne DIN-Normen (z.B. DIN ISO 13877 und DIN ISO 11272) mehrere Verfahren zulassen. Für die Bestimmung von verschiedenen (beispielsweise mikrobiologischen) Parametern liegen mit den DIN- und ISO-Normen geregelte Verfahren vor, die jedoch im Hinblick auf häufig große Spielräume bei der genauen Vorgehensweise (z.B. bei der Probenvorbereitung oder auch den Analysenverfahren selbst) zu erheblicher Variabilität in den Ergebnissen führen können. Eine sorgfältige und nachvollziehbare Dokumentation der verwendeten Materialien und Methoden ist für die Bewertung solcher Parameter besonders wichtig (LANUV 2009).

Auf die Notwendigkeit der sorgfältigen Datendokumentation wurde bereits in den früheren Arbeiten auf Bundes- (Spatz 2001; Huschek et al. 2004) und Landesebene (z.B. Meesenburg & Schulze 2001) hingewiesen. Die vorliegenden Daten zeigen, dass hier weiterhin deutlicher Nachbesserungsbedarf besteht. Mit dem im Rahmen des Projektes erarbeiteten Methoden-Code (siehe Teil A) steht jetzt ein umfassendes, kostenfreies Dokumentationswerkzeug zur Verfügung, das auf dem bereits bewährten Handbuch für forstliche Analytik aufgebaut.

Für die Daten der Boden-Dauerbeobachtung kann der Handlungsbedarf hinsichtlich der Dokumentation in zwei Aufgabenbereiche unterteilt werden:

- Aufarbeitung der Altdaten:

Bei lückenhafter Dokumentation von Altdaten sollte geprüft werden, ob fehlende Informationen recherchierbar sind. Arbeiten im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass in einzelnen Fällen die erforderlichen Informationen in Laboren und bei den datenführenden Stellen vorliegen, die über die Information des Namens der

verwendeten Methode hinausgehen (z.B. zur Gleichwertigkeit zu anderen Verfahren). Dies ist besonders bei angepassten Methoden wie z.B. Hausmethoden von großer Bedeutung. Indem Altdaten mit dem Methoden-Code dokumentiert und in einen länderübergreifenden Datenbestand eingespeist werden, kann diese Anforderung erfüllt werden. In Abhängigkeit der Nutzung von Daten sollten, im Hinblick auf die Notwendigkeit für zukünftige länderinterne sowie bundesweite Anwendungen, Möglichkeiten für eine nachträgliche Aufarbeitung von Altdaten durch Bund und/oder Länder geprüft werden.

- Dokumentation von Neuerhebungen:

Bei der Neuerhebung von Daten sollte auf eine umfassende Dokumentation, bestenfalls in Form des einheitlichen Methoden-Codes oder übertragbarer Codierungen Wert gelegt werden. Eine Einheitlichkeit in der Dokumentation der Methoden erhöht die Qualität und die Möglichkeit der Identifikation vergleichbarer Daten.

## 8.2 Anpassung des Zeitpunktes der Beprobung

Ein wesentliches Kriterium für die gemeinsame Verwendung von Daten der unterschiedlichen Parametergruppen bei Analysen zur zeitlichen Veränderung ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Gruppen einander zugeordnet werden können. Wechselwirkungen zwischen Parametern unterschiedlicher Gruppen (z.B. bodenmikrobielle Aktivität und Bodenwassergehalt, Rinklebe 2004) sind bekannt. Die parametergruppenübergreifende Auswertung ist notwendig, um die Ursache der Veränderung eines Parameters durch Wechselwirkungen mit anderen Parametern erklären zu können. Die fehlende Möglichkeit der multivariaten, parametergruppenübergreifenden Auswertungen führt potentiell zu einem erheblichen Informationsverlust.

Die vorliegenden Daten haben gezeigt, dass die Messungen der Parameter unterschiedlicher Parametergruppen häufig nicht im selben Zeitraum durchgeführt werden (vgl. Tabelle 15). Für die gemeinsame Auswertung der verschiedenen Parametergruppen sollte die Beprobung nach Möglichkeit zum gleichen Zeitpunkt stattfinden. Ideal wäre die Messung aller Parameter an einer Probe, was jedoch aufgrund der verschiedenen Anforderungen an das Probenmaterial nicht immer möglich ist. Der Zeitpunkt der Beprobung sollte jedoch so gewählt werden, dass die Ergebnisse der Analysen einander zugeordnet werden können.

Der Aspekt der gemeinsamen Verwendung von Daten der unterschiedlichen Parametergruppen ist bei der Durchführung von zyklischen Untersuchungen besonders zu berücksichtigen. Bei Zyklen von mehr als fünf Jahren für die Parametergruppe der Anorganik und von zwei Jahren für die Bodenbiologie kann es sinnvoll sein, vom vorgegebenen Raster abzuweichen, um die Daten sinnvoll miteinander verknüpfen zu können. Die Möglichkeiten sind sowohl durch einen flexiblen Beprobungszeitpunkt als auch durch Zusatzuntersuchungen zu gewährleisten.

Die Harmonisierung kann mit einer generellen Anpassung der Beprobungszeiträume verknüpft werden. Verschiedene Arbeiten kommen zu dem Ergebnis, dass die bisher durchgeführten Wiederholungsuntersuchungen nicht in der jetzigen Frequenz durchgeführt werden müssen, sondern eine größere Zeitspanne zwischen den Beprobungen sinnvoll wäre. Verschiedene länderinterne Auswertungen hatten zum Ergebnis, dass die Abstände zwischen den Wiederholungsuntersuchungen erheblich vergrößert wer-

den könnten. Die Auswertungen in NRW führen zur Überlegung von zwei bis drei hochauflösenden Untersuchungen (z.B. Abstände von einem Jahr) mit einer anschließenden Aussetzung der Messung von mehr als zehn Jahren (LANUV 2009). Der Grund hierfür liegt in der angenommenen langsamen Veränderung der untersuchten Parameter. Eine träge Reaktion der Schwermetallgehalte der Bodenfestphase wird für einige Flächen in Gebieten niedriger Deposition erwartet (z.B. LUBW 1999). Eine mögliche Konsequenz wäre auch hier die Vergrößerung des Beprobungsintervalls. Problematisch an einer deutlichen Reduzierung der Wiederholungsbeprobungen ist jedoch, dass für die einzelne Fläche ein möglicherweise vorhandener zeitlicher Trend statistisch erst nach längerer Zeit erfasst werden kann, da eine ausreichende Stichprobenanzahl erst nach größeren Zeiträumen zustande kommt. Andere Ergebnisse wiederum zeigen, dass in kurzen Perioden (5 Jahre mit einer Messung pro Jahr) signifikante Veränderungen für z.B. bodenbiologische Parameter feststellbar sind (NLfB 2001). Eine Vergrößerung der Beprobungsabstände sollte also erst durchgeführt werden, wenn belastbare Hinweise für lediglich langfristige Veränderungen vorliegen. Bei der Anpassung von Beprobungsintervallen sollten in jedem Fall die geplanten Beprobungszeitpunkte der anderen Parametergruppen berücksichtigt werden.

Sollen Boden-Dauerbeobachtungsdaten weiterhin neben länderinternen Fragestellungen für bundesweite oder regionsspezifische Aussagen zur zeitlichen Entwicklung des Bodenzustands genutzt werden, ist eine gemeinsame Strategie erforderlich. Mit der Ausrichtung auf bundesweit relevante Fragestellungen kann dann ein ggf. für ausgewählte BDF und/oder (indikatorgeeignete) Parameter abgestuftes Verfahren festgelegt werden, um die Beprobungszeitpunkte und -intervalle zu harmonisieren. Dabei besteht möglicherweise auch ein Einsparungspotential hinsichtlich der auf Betreiberseite anfallenden Kosten.

Vor dem Hintergrund der praktischen Hindernisse zur Vereinheitlichung der Probenahmezeitpunkte und -intervalle ist es sinnvoll, statistische Verfahren zu verwenden, die möglicherweise in der Lage sind, die Messdaten der BDF verschiedener Entnahmezeitpunkte auszuwerten.

### **8.3 Datenaustausch**

Die Notwendigkeit des Datenaustauschs zwischen dem Bund und den BDF-betreibenden Ländern ergibt sich daraus, dass Fragestellungen des Bodenschutzes ausschließlich mit Daten beantwortet werden können, die sich auf mehrere Länder oder sogar auf das gesamte Bundesgebiet erstrecken.

In den letzten fünf Jahren wurden Möglichkeiten zur Verbesserung des Datenaustauschs zwischen dem Bund und den BDF-betreibenden Ländern erprobt. Der Vergleich der im Vorhaben vorliegenden Daten mit den von den Ländern veröffentlichten Daten zeigt, dass bislang jedoch nur ein Teil der tatsächlich erhobenen und qualitätsgesicherten Daten im bundesweiten Datenbestand vorliegt. Ein wesentliches Ziel für zukünftige länderübergreifende Auswertungen muss ein vollständiger und aktueller Datenbestand der BDF sein, möglichst unter Einbeziehung der Intensiv-BDF. Um den Datenaustausch zielführend und möglichst effizient zu gestalten, ist es unumgänglich, konkrete Anforderungen an die Struktur der Daten zu definieren. Zur automatisierten Datenübernahme zwischen den Ländern und dem Bund wurden bereits für einige Länder technische Schnittstellen entwickelt, die einen Datenaustausch ermöglichen. Auf diesem Weg können die fehlenden Informationen in den vorliegenden Daten bereits

reibungsloser ergänzt werden. Die Anpassung spezifischer Länderschnittstellen ist jedoch vergleichsweise aufwendig und bedeutet eine „Einbahnstraße“. Für die Zusammenarbeit bedarf es in Anbetracht der derzeitigen technischen Rahmenbedingungen und Entwicklungen eines einheitlichen Austauschschemas, das den Vorteil bietet, keine „Einbahnstraße“ zu sein und unabhängig von jeweils länderspezifischen Anwendungsformaten ist. Das UBA hat nach der Testphase einen ersten Vorschlag für ein solches Schema auf Basis von XML veröffentlicht (<http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/boden/daten/xml-schema.htm> Stand: 12.04.2011). Sollte die Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie auch Daten des Monitorings betreffen, wäre diese Vorgehensweise ohnehin erforderlich.

Neben dem Einsatz einer zentralen Datenbank(-struktur) auf Bundesebene und der Abstimmung eines gemeinsamen Austauschschemas mit den Bundesländern wird empfohlen, einen Aktualisierungszyklus zu vereinbaren. Mit feststehenden Zeiten des Datenaustauschs ist zum einen eine Planbarkeit von Arbeitsaufwänden gegeben; zum anderen kann bei zukünftigen Auswertungen davon ausgegangen werden, dass die länderübergreifenden Daten zu einem festgelegten Zeitpunkt auf aktuellem Stand verfügbar sind. Hier sollten die künftigen Anforderungen an die Verfügbarmachung von Monitoringdaten im Rahmen des INSPIRE-Prozesses berücksichtigt werden. Als Alternative zu einem festen Zyklus kommt aber auch ein fragestellungsbezogener Datenaustausch in Frage. Damit können z.B. politisch aktuelle Fragestellungen zeitnah bearbeitet werden. Für den Datenaustausch sind die für die Anwendung notwendigen Begleitdaten zu berücksichtigen. Dazu sollten generelle Minimal-Anforderungen, orientiert an den grundlegenden Fragestellungen (Kap. 8.5) definiert werden, um Aufwände sowohl auf Bundes- als auch auf Länderebene zu verringern und kalkulierbar zu halten. Die Notwendigkeit einer möglichen Anpassung der auszutauschenden Informationen sollte in regelmäßigen Abständen geprüft werden.

Die Auswertungen in Kap. 5 haben gezeigt, dass auf Basis des vorliegenden, bundesweiten Datenbestandes bereits Hinweise auf räumliche und zeitliche Unterschiede ermittelt werden können. Zur Identifikation zeitlicher Entwicklungen kann bereits eine Wiederholungsuntersuchung (mit einem ausreichenden zeitlichen Abstand) ausreichen, um Hinweise zu geben. Die Bedingung hierfür ist eine große Zahl an einzelnen Wiederholungsuntersuchungen (Kap. 5.2.2.2), die durch die bundesweite Datenzusammenführung zu erreichen ist. Ein länderübergreifender Datenbestand kann somit Entwicklungen und Regelmäßigkeiten aufzeigen, die anschließend auf die Daten einzelner Flächen oder Regionen angewendet werden können.

## **8.4 Datennacherhebung und Qualitätssicherung**

Die Erfahrungen mit dem bundesweiten Datenbestand haben gezeigt, dass verschiedene obligate Parameter teilweise nicht gemessen, Analysenergebnisse noch nicht qualitätsgesichert sind oder zzt. noch nicht in der bundesweit einheitlichen Struktur zur Verfügung gestellt werden können. Durch die fehlenden Informationen zu diesen Parametern können keine flächendeckenden bundesweiten Auswertungen für diese Parameter durchgeführt werden (vgl. Kap. 5.1). Eine Ergänzung der fehlenden Informationen könnte bei Bedarf für eine länderübergreifend relevante Fragestellung durch die Analyse von Rückstellproben vorgenommen werden. Die Analyse von Rückstellproben ist jedoch mit Zeit- und Kostenaufwand verbunden und verbraucht das zurückgestellte Material. Der Aufwand erscheint mitunter für die Erhebung einzelner Parameter zu hoch.

Die Nachanalyse der Rückstellproben kann jedoch mit der Qualitätssicherung verbunden werden. Die langfristige Ausrichtung von Monitoringprogrammen bedingt, dass die verwendeten Analysemethoden bei der Einrichtung der Flächen heute nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Gerade im Bereich der Spurenelemente sind die Geräte heute deutlich genauer. Die meist sinkenden Bestimmungsgrenzen sind bei der Zeitreihenanalyse ein bekanntes Problem. Hier ist die Wahl entsprechender statistischer Verfahren, die an den Datensatz angepasst sind, sinnvoll und notwendig. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass die Analyse von Rückstellproben meist nicht die identischen Gehalte wie die erste Analyse feststellt. Ein bewährtes System der Qualitätssicherung bei der Zeitreihenanalyse ist die parallele Messung von aktuell erhobenen Proben und Rückstellproben, um durch Analysegerät und Bearbeiter bedingte Abweichungen in den Messungen zu identifizieren und zu bereinigen (Ammann 2010). Die Parallelmessung von Rückstellproben kann somit durch

- Nacherhebung ehemals nicht gemessener Parameter,
- Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Daten bei Einführung einer neuen Methode,
- Anpassung der Nachweisgrenzen an den Stand der Technik und
- Identifikation und Bereinigung von durch Technik und Mensch bedingten Abweichungen in den Analyseergebnissen

zu einer erheblichen Verbesserung des Datenbestandes führen. Die Füllung der bestehenden Datenlücken sowie die Prüfung auffälliger Altdaten ist auf diese Weise zwar ein langfristiger Ansatz, hat aber den Vorteil, dass er im Zuge einer Qualitätssicherung durchgeführt werden sollte und somit keine zusätzlichen Kosten verursacht.

Zukünftige Auswertungen können dadurch auf eine umfangreichere und gesicherte Datenbasis zurückgreifen. Des Weiteren können existierende Altdaten besser bewertet werden, wenn es um ihre Verwendbarkeit hinsichtlich unterschiedlicher Methodik geht. Eine deutliche Verbesserung der Qualität der Datengrundlage für Auswertungen wird erreicht. Beschriebene Probleme mit bestehenden Datenlücken und methodisch bedingt nicht verwendbaren Daten (Kap. 3) können ausgeräumt werden.

## **8.5 Ausrichtung auf die Aufgaben der Boden-Dauerbeobachtung**

Nach Messungen in Zeiträumen von teilweise über 20 Jahren konnte gezeigt werden, dass die Boden-Dauerbeobachtung mit den untersuchten Parametern den bereits genannten Zielen der Erfassung und Darstellung des aktuellen Bodenzustandes (vgl. Kap. 2.2 und Kap. 5.2.2) und der Beschreibung der langfristigen Änderungen (vgl. z.B. Kap.6.2.7) gerecht werden kann. Aus identifizierten zeitlichen Trends (Kap. 6.2) können Prognosen für zukünftige Entwicklungen abgeleitet werden.

Die auf den BDF gemessenen obligaten Parameter orientieren sich dabei an den formulierten Zielen zum Zeitpunkt der Einrichtung. Im Verlauf der letzten 20 Jahre sind durch die gesellschaftliche und technische Entwicklung sowie neuen umweltrelevanten Themenfeldern weitere Anforderungen an ein umfassendes Monitoring entstanden. Neue Fragestellungen rücken in den Vordergrund, deren Beantwortung somit zu den Aufgaben der Boden-Dauerbeobachtung als umfassendes Monitoring fällt bzw. für die

sich die bereits umfassend untersuchten Standorte eignen. Anpassungen des Parameterspektrums aufgrund der angepassten Anforderungen und Fragestellungen können notwendig sein. Als Beispiel für fragestellungsbezogene Parameter können  $^{134}\text{Cs}$  und  $^{137}\text{Cs}$  in Folge des Unglücks im Kraftwerk in Tschernobyl angeführt werden. Durch das umfangreiche Parameterset ist die Boden-Dauerbeobachtung auch zur Beantwortung von aktuellen, neuen Fragestellungen wie z.B. notwendigen Anpassungen an den Klimawandel geeignet. Solche speziellen Fragestellungen können jedoch Anpassungen, z.B. hinsichtlich der Ergänzung einzelner Parameter notwendig machen (UBA 2010). Zu anderen wichtigen Fragestellungen des Bodenschutzes, wie z.B. der Problematik „Erosion“, stehen geeignete Parameter zzt. nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung. Um diesen Aufgaben nachzukommen, besteht ein Anpassungsbedarf.

Die Dauer der Untersuchung an BDF bedingt also, dass die ursprünglich formulierten Ansprüche und damit auch die Konzeption an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden sollten. Mit Ausrichtung auf den aktuellen, konkreten Bedarf für länder- und bundesweit relevante Fragestellungen sollten die Listen der momentan untersuchten Parameter geprüft und vereinheitlicht werden. Entscheidungsbasis sollten die aktuellen und zukünftigen Aufgaben der Boden-Dauerbeobachtung sein (Huschek et al. 2004).

Durch die angewendeten statistischen Verfahren können beispielsweise Flächen oder Tiefenstufen identifiziert werden, in denen zu untersuchende Prozesse besonders stark oder gar nicht ausgeprägt sind. Zusätzlich kann festgestellt werden, welche Parameter betroffen sind (Kap. 6.2). Für nachfolgende Untersuchungen oder neue Fragestellungen können somit Daten identifiziert werden, die eine sinnvolle Grundlage für Auswertungen bieten. Auch können Parameter identifiziert werden, die in der Lage sind Veränderungen von Bodeneigenschaften und Prozessen anzuzeigen, weil sie im Wesentlichen von einem und nicht von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Für den untersuchten Datenbestand ergeben sich somit Hinweise auf die Indikatoreignung von einzelnen Parametern.

## 8.6 Vernetzung von Messnetzen

Die Auswertungen der BDF-Daten haben gezeigt, dass verschiedene Aufgaben der BDF mit den vorliegenden Daten und dem erfassten Parameterspektrum abgedeckt werden können. In diesem Projekt wurden die Daten der BDF um klimatologische Informationen der jeweils nächsten Station des Deutschen Wetterdienstes ergänzt. Eine einfache Zuordnung auf der Basis fachlicher Gründe kann aufgrund fehlender Vernetzung nicht stattfinden. Auch wenn bei dieser Auswertung keine eindeutigen Ergebnisse im Zusammenhang mit den klimatologischen Daten festgestellt werden konnten, ist die Möglichkeit der Einbindung dieser Informationen für zukünftige Auswertungen wünschenswert. Der Nutzen von Daten Dritter für bodenkundliche Fragestellungen konnte bereits in anderen Projekten festgestellt werden (UBA 2010). Vor diesem Hintergrund sollte geprüft werden, inwiefern es möglich ist, durch Vernetzung mit weiteren Messnetzen oder Monitoringprogrammen (z.B. Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes) zusätzliche Informationen zu erhalten. Durch Vernetzung von Messnetzen und Datenaustausch könnten Zusatzinformationen ohne kostenaufwändige eigene Erhebungen erhalten oder Kosten für laufende Messungen bei gleichem Parameterspektrum geteilt werden.

Umgekehrt sollte auch bei einer Konzeption von anderen Messnetzen auf die Boden-Dauerbeobachtung zurückgegriffen werden (z.B. BZE Wald, BZE Landwirtschaft). Kosten für Analytik und Probenahme können bei identischen Untersuchungszielen geteilt werden. Des Weiteren können zusätzliche, bereits vorliegende und/oder zu erhebende Informationen die Daten der jeweiligen Messnetze ergänzen.

## **8.7 Identifizierung von Trends**

Die SOK-SAM hat gezeigt, dass die vorliegenden Daten der Basis-BDF Hinweise auf vorhandene zeitliche Veränderungen geben können. Die bereits festgestellten Trends in den Auswertungen der einzelnen Bundesländer und die Hinweise auf einen Trend im bestehenden Datenbestand (Kap. 5.2.2) lassen vermuten, dass auch auf Bundesebene signifikante Trends feststellbar sein könnten. Wie in Kap. 5.2.2 beschrieben konnten anhand des verwendeten Basis-BDF-Datenbestandes jedoch keine signifikanten, multivariaten Trends identifiziert werden. Eine mögliche und wahrscheinliche Ursache ist die geringe Anzahl von vorliegenden Wiederholungsuntersuchungen. Für Auswertungen zur Identifikation von zeitlichen Trends sollte zukünftig gewährleistet sein, dass eine ausreichende Anzahl von nach Möglichkeit zwei Wiederholungsuntersuchungen sichergestellt werden kann. Zusätzlich sollten parametergruppenübergreifende Auswertungen mit einer großen Stichprobe möglich sein, wenn alle bereits vorhandenen Daten verwendet werden können.

Eine erneute Auswertung eines ergänzten, vollständigen BDF-Datenbestandes ist somit sinnvoll und nachdrücklich zu empfehlen. Eine statistisch signifikante Identifikation von bundesweiten Trends erscheint aufgrund der vorliegenden Arbeiten als sehr wahrscheinlich. Eine erhöhte Anzahl und/oder angepasste Auswahl der verwendeten Parameter sollte dann die Möglichkeit bieten, die aufgedeckten Veränderungen besser zu charakterisieren. Die parallele Verwendung von Analyseergebnissen aller Parametergruppen würde eine bundesweite Bewertung hinsichtlich aller Eigenschaften des Bodens ermöglichen und sich nicht (siehe Kap. 5.2 oder Huschek et al. 2004) auf anorganische Parameter beschränken.

Vor einer erneuten statistischen Auswertung sollten also alle Möglichkeiten zur Ergänzung von fehlenden Angaben, zur parallelen Verwendbarkeit unterschiedlicher Parametergruppen und verwendeten Methoden geprüft und genutzt werden.

## **8.8 Forschung**

Auf Basis der vorliegenden Auswertungen können die relevanten Einzelprozesse bzw. Einflüsse identifiziert und den jeweiligen BDF flächenhaft zugeordnet werden.

In einem nächsten Schritt wird empfohlen, die beschriebenen räumlichen und zeitlichen Regelmäßigkeiten fortführend zu untersuchen, einzugrenzen und vertiefend zu erklären. Anschließend sollten zur wissenschaftlichen Identifikation und Erklärung der detektierten Veränderungen Daten verwendet werden, die mittels Intensiv-BDF erhoben wurden. Eine zusätzliche, zeitlich hochauflösende Erfassung der chemischen Zusammensetzung der Bodenlösung dient diesem Zweck der Prozesserforschung. Im Gegensatz zu den Basis-BDF sind die Möglichkeiten, Verlagerungsprozesse zu erforschen und möglicherweise Bilanzierungen durchzuführen, an diesen Flächen erheblich günstiger, da die Datengrundlage umfangreicher und zeitlich hochauflösender vorliegt. Durch die

Identifikation einzelner Prozesse und deren Auswirkungen können wiederum flächenhafte Aussagen getroffen und Prognosen abgeleitet werden.

Zur weiteren Untersuchung von gefundenen Mustern kann es notwendig sein, weitere Informationen zu berücksichtigen. Als Beispiel ist hier die unterschiedliche Entwicklung der Schwermetallgehalte in ackerbaulichen und forstwirtschaftlichen Flächen zu nennen. Die Schlagkarteien der Ackerflächen können Hinweise auf Ursachen der Entwicklung geben. Zusätzlich könnte geprüft werden, ob die Ackerflächen auf Basis dieser Informationen weiter unterteilt werden können und sich weitere Muster identifizieren lassen. Die bundesweite Verfügbarkeit und Anwendbarkeit solcher Zusatzinformationen gilt es im Bedarfsfall zu prüfen.

## **8.9 Fortführung des Monitorings**

Zur bestmöglichen Identifizierung von zeitlichen Trends bedarf es der wiederholten Erfassung der zu untersuchenden Größen in einem Zeitraum und an einem Ort. Um Auswirkungen aktueller und neuer zukünftiger Einflüsse festzustellen, ist eine Fortführung des Monitorings unumgänglich. Hierzu ist sicherzustellen, dass bereits beschriebene bestehende Defizite ausgeräumt werden. Zusätzlich ist es wichtig sicherzustellen, dass das Monitoring an den bestehenden Flächen fortgeführt werden kann. Hierbei können besonders die Eigentumsverhältnisse und der Flächenstatus (z.B. Lage in Natur- oder Wasserschutzgebieten) wichtige Kriterien sein. Die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Monitorings kann z.B. anhand der relevanten Auswirkungen von politischen Maßnahmen (Benzin-Blei-Gesetz, Bundes-Immisionsschutzgesetz) dargelegt werden. Nicht kalkulierbare und vorhersehbare Einflüsse machen ein kontinuierliches und umfangreiches Monitoring unumgänglich. Dieses wiederum ermöglicht eine Ableitung von geeigneten robusten und gleichzeitig sensitiv anzeigenden Indikatoren und somit auch eine dynamische Anpassung von Prognosen.



## 9 ZUSAMMENFASSUNG

In der Laufzeit von mehr als 20 Jahren hat die Boden-Dauerbeobachtung in Deutschland einen umfangreichen Datenbestand von physikalischen, chemischen und bodenbiologischen Parametern generiert, der an knapp 800 detailliert charakterisierten Flächen erhoben wurde. Der Datensatz ist in seinem Umfang und abgedeckten Parameterspektrum bundesweit einzigartig. Die Literaturrecherchen haben gezeigt, dass länderinterne Auswertungen bereits zahlreiche Ergebnisse liefern konnten, welche den Aufgaben der Boden-Dauerbeobachtung gerecht werden. Bedingt durch das Untersuchungsmedium Boden, die große untersuchte Fläche, die lange Laufzeit und die Vielzahl der Beteiligten ist der Datenbestand sehr heterogen. Eine parallele Verwendung aller Daten ist aufgrund der verschiedenen Untersuchungszeiträume und verwendeten Methoden nicht immer möglich.

Die präsentierten Ergebnisse zeigen die Eignung der vorgestellten nicht-linearen multivariaten Verfahren zur Analyse von großen und sehr heterogenen Datenmengen am Beispiel eines vom Umweltbundesamt bereitgestellten BDF-Datensatzes. Durch die statistischen Analysen lassen sich verschiedene Einflüsse auf die Gehalte des jeweiligen untersuchten Stoffspektrums feststellen. Die Einflüsse sind sowohl anhand von räumlichen Mustern als auch von zeitlichen Trends erkennbar. Die Daten zeigen, dass das Monitoring im Sinne einer Erfassung von relevanten Einflüssen auf das Medium Boden erfolgreich durchgeführt wird. Übergreifende Prozesse (z.B. Deposition), welche die Gehalte mehrerer Parameter beeinflussen, können identifiziert und erläutert werden. Zusätzlich können räumliche Einflussfaktoren (z.B. Regionen geogen erhöhter Schwermetalle) identifiziert und Hinweise auf zeitliche Veränderungen festgestellt werden. Die Verfahren ermöglichen weiterhin die Detektion der Einflüsse von Einzel- bzw. Extremereignissen (z.B. extrem kalte Winter) oder von Einflüssen auf nur einen der untersuchten Parameter. Die Ergebnisse bieten somit einen Überblick über die relevanten Einflussgrößen und stellen eine hervorragende Ausgangsbasis für weiterführende Auswertungen dar. Das Ausgangsmaterial der Bodenbildung und die Deposition sind die wesentlichen Einflussgrößen für die untersuchten Parameter der BDF. Die Auswertungen haben gezeigt, dass wenige Einflussgrößen bereits einen Großteil der Varianz im Datensatz erklären können.

Die Auswertungen mit statistischen Verfahren wie der Kombination einer Selbstorganisierenden Karte und des Sammon's Mapping (SOK-SAM) und dem Isomap-Verfahren sind ein erster Schritt zur Identifikation von Auffälligkeiten im vorgegebenen Datensatz. Zur Beantwortung spezieller oder weiterführender Fragestellungen könnten auf Basis der gezeigten Ergebnisse z.B. Daten gezielt ausgewählt werden. Solche Auswertungen könnten dann mit an die jeweilige Fragestellung angepassten statistischen Mitteln durchgeführt werden. Die Daten der BDF lassen sich kaum an bestimmte statistische Verfahren anpassen, vielmehr sollten für die jeweilige Datengrundlage die geeigneten statistischen Analyseverfahren ausgewählt werden.

Neben den Ergebnissen der statistischen Auswertungen konnten durch Literaturlauswertung und intensive Analyse der Daten der Basis-BDF Handlungsempfehlungen gegeben und der Forschungsbedarf aufgezeigt werden. Als eine der wesentlichen Aufgaben wird die Harmonisierung des Vorgehens bei der Erhebung und Dokumentation der Daten angesehen. Dafür wurde in diesem Projekt ein frei verfügbarer Methodencode entwickelt (s. Teil A des Berichts). Im Hinblick auf eine Qualitätssicherung ist eine konsequente und umfassende Dokumentation notwendig.

Im Rahmen der Qualitätssicherung zukünftiger Daten kann durch die Parallelmessung von Rückstellproben eine Vergleichbarkeit evtl. abweichender Verfahren erreicht werden. Zusätzlich können auf diesem Weg Datensätze aufgefüllt werden, bei denen Informationen zu einzelnen Parametern fehlen. Im Blick auf bundesweite Auswertungen ist eine Komplettierung und regelmäßige Aktualisierung des BDF-Datenbestandes wünschenswert. Eine Vernetzung mit anderen Messnetzen kann dabei Synergieeffekte erzeugen und gegebenenfalls Kosten sparen.

Die Erfahrungen der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass sich verschiedene politische Entscheidungen (z.B. Benzinbleigesetz, verbindliche Rauchgasentschwefelung), natürliche Entwicklungen etc. auf die stofflichen Gehalte in Böden auswirken. Zur Erfassung solcher Entwicklungen ist eine Fortführung des Monitorings unabdingbar.

## 10 DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei den zahlreichen Betreibern der Boden-Dauerbeobachtung für die zur Verfügung gestellten Daten, ohne die eine Bearbeitung des Projektes nicht möglich gewesen wäre. Weiterer Dank gilt allen Vertretern der beteiligten Bundesländer, die an den Fachgesprächen im Laufe des Projektes teilgenommen haben und für Daten betreffende Rückfragen zur Verfügung standen.

Des Weiteren bedanken wir uns bei Prof. Dr. E. Matzner von der Universität Bayreuth für die Möglichkeit, Daten des Intensiv-Monitoring-Programms des Lehstenbachgebietes zu nutzen. Feldarbeiten und Laboranalysen wurden teilweise vom BITÖK (Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung an der Universität Bayreuth) im Rahmen verschiedener Projekte unter Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (Forschungskennzeichen: PT BEO 51-0339476 A-C) durchgeführt. Ein weiterer Teil dieser Daten wurde durch das damalige Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft, jetzt Bayerisches Landesamt für Umwelt, erhoben. Weiterhin bedanken wir uns bei allen Beteiligten.

Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Stephan Marahrens und Falk Hilliges für die tatkräftige Unterstützung im Verlauf des Projektes sowie dem UBA für die Förderung.

## 11 QUELLEN

- Adler, G.H. / Behrens, J. / Eckelmann, W. / Feinhals, J. / Hartwich, R. / Krug, D. (2004): Übersetzungsschlüssel zum Transfer von Bodendaten aus den deutschen Klassifikationen KA3 nach KA4 und von KA4 in die Internationale Klassifikation WRB und FAO, Arbeitsanleitung, Arbeitshefte - Boden, Heft 1, Hannover.
- AG Boden (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. verb. u. erw. Aufl., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover.
- AG Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. verb. u. erw. Aufl., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover.
- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. verb. u. erw. Aufl., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover.
- Alef, K. (1991): Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie, Landsberg.
- Alloway, B. (1999): Schwermetalle in Böden - Analytik, Konzentration, Wechselwirkung, Springer Verlag, Berlin
- Altermann, M. & Kühn, D. (1994): Vergleich der bodensystematischen Einheiten der ehemaligen DDR mit denen der Bundesrepublik Deutschland. In: Zeitschrift für Angewandte Geologie, Band 40, S. 1-11.
- Anderson, J.P.E. & Domsch, K.H. (1978): A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. In: Soil Biology Biochemistry, Vol. 10, p. 215-221.
- Ammann S. (2010): Bodenbiologische Dauerbeobachtung: Anforderungen an die Messqualität. In: Bulletin BGS, Heft 30, S. 57-62.
- Antipov-Karatajev, I.N. & Filippova, V.N. (2007): Vergleichende Untersuchungen von Methoden zur Bestimmung des Gesamtstickstoffs in Böden mittels Verbrennung nach Kjeldahl und nach Knop,- Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, Vol. 23, 354-357
- Bannick et al. (2001): Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden, uba texte 59/01, Berlin.
- Barth, N. / Brandtner, W. / Cordsen, E. / Dann, T. / Emmerich, K.-H. / Feldhaus, D., Kleefisch, B. / Schilling, B. / Utermann, J. (2001): Boden-Dauerbeobachtung. Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. In: Rosenkranz, D., Bachmann, G., König, W., Einsele, G. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Loseblattsammlung.
- Bauchhenß, J. (1997): Regenwurm-Fauna. In: Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF): Bericht nach 10-jähriger Laufzeit 1985-1995, Teil III Böden: Gefüge, Organische Substanz, Bodenorganismen, Vegetation, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau Vol. 6, S. 219-234, München.
- Bauchhenß, J. (1982): Artenspektrum, Biomasse, Diversität und Umsatzleistung von Lumbriciden (Regenwürmer) auf unterschiedlichen Grünlandflächen verschiedener Standorte Bayerns - Bay. Landwirt. Jahrbuch 59, Seite 119-124.

- Bayerische Staatsministerien für Landesentwicklung und Umweltfragen und für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (STMELF) (1990): Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern. Standortauswahl, Einrichtung, Probenahme, Analytik, München.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) vom 17.3.1998,-BGBl. I, Nr.36, Seite 502-510
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12.7.1999 , -BGBl. I, Nr. 36, Seite 1554-1582
- Beyer, L. (2002): Stickstoff, In: Scheffer, F. & Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage, Heidelberg, Springer
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2009): Übersetzungsschlüssel zum Transfer von Bodendaten aus den deutschen Klassifikationen KA3 nach KA4 und von KA4 in die internationalen Klassifikationen WRB und FAO. [http://www.genesys-hannover.de/nn\\_325378/DE/Themen/Boden/Produkte/Software/uebersetzungsschl\\_C3\\_BCssel.html](http://www.genesys-hannover.de/nn_325378/DE/Themen/Boden/Produkte/Software/uebersetzungsschl_C3_BCssel.html)
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000). Karte mit Erläuterungen, Textlegende und Leitprofilen und Daten der Schätzprofile für die Leitböden (digital), Hannover
- Blume, H.-P. & Stahr, K. (2002): Bodenentwicklung, -systematik und -verbreitung, In: Scheffer, F. & Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage, Heidelberg, Springer
- BMELV (2007): Handbuch Forstliche Analytik. Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich, hrsg. v. Gutachterausschuss Forstliche Analytik.
- BNatSchG (2009): Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009, BGBl. I, S. 2542.
- Borken, W. / Matzner, E. (2009): Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. In: Global Change Biology, Vol 15, S. 808-824.
- Bouche, M. B. (1972): Lombriciens de France – Ecologie et Systematique, Inst. Kat. De la Rech Agronomique.
- Brandelik, A. / Krafft, G. / Huebner, C. / Ruppert, P. / Schwarzmüller, H. / Herbst, F. / Schuhmann, R. / Zischak, R. / Hötzel, H. (1996): Zerstörungsfreie In-situ-Messung der Feuchte- und Dichteänderung von mineralischen Deponieabdichtungen – Erfahrungsbericht. In: Müll und Abfall, Heft 1, S. 36-41.
- Brosse, S. / Girardet, J.L. / Lek, S. (2001): Utilisation of non-supervised neural networks and principal component analysis to study fish assemblages. In: Ecological Modelling Vol.146, p. 159–166.
- Brümmer, G.W. / Zeien, H. / Hiller, D. A. / Hornburg, V. (1994): Bindungsformen und Mobilität von Cadmium und Blei in Böden,- In: Dechema (Hrsg.): Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium, Frankfurt am Main
- Cerli, C. / Celi, L. / Johansson, M.-B. / Kögel-Knabner, I. / Rosenqvist, L. / Zanini, E. (2006): Soil Organic Matter Changes in a Spruce Chronosequence on Swedish Former Agricultural Soil: I. Carbon and Lignin Dynamics. In: Soil Science, Vol. 171, p. 837-849.

- Desaules, A / Ammann, S / Schwab, P. (2010): Advances in long-term soil-pollution monitoring of Switzerland. J. Plant Nutr. Soil Sci. 2010, 173, 525–535.
- Dilly, O. (2006): Ratios of microbial biomass estimates to evaluate microbial physiology in soil. In: Biol. Fertil. Soils, Vol. 42, p. 241-246.
- DIN 1319-3 (1996-05): Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit.
- DIN 1319-3: Grundlagen der Messtechnik.
- DIN 1319-4 (1999-02): Auswertung von Messungen; Messunsicherheit.
- DIN 19683-2 (1997-04): Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung nach Vorbehandlung mit Natriumpyrophosphat.
- DIN 19683-9 (1998-05): Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben
- DIN 19684-1 (1977-02): Bestimmung des pH-Wertes des Bodens und Ermittlung des Kalkbedarfs
- DIN 19684-6 (1977-02): Bestimmung des Gehaltes an oxalatlöslichem Eisen
- DIN 19684-8 (1977-02): Bestimmung der Austauschkapazität des Bodens und der austauschbaren Kationen
- DIN 19730 (1997-06): Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung
- DIN 38402-71 (1987-03 ): Gleichwertigkeit von zwei Analyseverfahren aufgrund des Vergleiches von Analyseergebnissen und deren statistischer Auswertung; Vorgehensweise für quantitative Merkmale mit kontinuierlichem Wertespektrum.
- DIN 38407-02 (1993-02): Gaschromatographische Bestimmung von schwerflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen (F 2).
- DIN 38414-20 (1996-01): Bestimmung von 6 polychlorierten Biphenylen (PCB) (S 20)
- DIN 38414-7 (1983-01): Aufschluss mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S 7)
- DIN 51527-1 (1987-05): Prüfung von Mineralölerzeugnissen - Bestimmung polychlorierter Biphenyle (PCB)
- DIN EN 10694 (1996-08): Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse) (ISO 10694:1995).
- DIN EN 13346 (2001-04): Bestimmung von Spurenelementen und Phosphor – Extraktionsverfahren mit Königswasser
- DIN EN ISO 11277 (2002-08): Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation (ISO 11277:1998 + ISO 11277:1998 Corrigendum 1:2002).
- DIN ISO 10382 (2003-05): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von Organochlorpestiziden und polychlorierten Biphenylen - Gaschromatographisches Verfahren mit Elektroneneinfang-Detektor (ISO 10382:2002)
- DIN ISO 10390 (1997-05): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Wertes
- DIN ISO 10693 (1997-05): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren

- DIN ISO 10694 (1996-08): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)
- DIN ISO 11261 (1997-05): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von Gesamt-Stickstoff - Modifiziertes Kjeldahl-Verfahren
- DIN ISO 11265 (1997-06): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (ISO 11265:1994 + ISO 11265:1994/Corr.1:1996)
- DIN ISO 11268 (2000-03): Bodenbeschaffenheit - Wirkung von Schadstoffen auf Regenwürmer - Teil 3: Anleitung für die Bestimmung von Wirkungen unter Freilandbedingungen (ISO 11268-3:1999).
- DIN ISO 11272 (2001-01): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte.
- DIN ISO 11274 (2001-01): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens
- DIN ISO 11277 (1998-05): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden
- DIN ISO 11464 (2006-12): Bodenbeschaffenheit – Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen
- DIN ISO 11465 (1997-06): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes auf Grundlage der Masse
- DIN ISO 11466 (1997-06): Bodenbeschaffenheit – Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente
- DIN ISO 11508 (2002-05): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Kornrohddichte
- DIN ISO 11646 (1996-12): Bodenbeschaffenheit - Anleitung zur Aufbereitung, Konservierung und Handhabung von Feststoffproben.
- DIN ISO 13536 (1997-04): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der potenziellen Kationenaustauschkapazität und der austauschbaren Kationen unter Verwendung einer bei pH = 8,1 gepufferten Bariumchloridlösung
- DIN ISO 13877 (2000-01): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen
- DIN ISO 13878 (1998-11): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs durch trockene Verbrennung (Elementaranalyse) (ISO 13878:1998).
- DIN ISO 14240-1 (1999-10): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der mikrobiellen Biomasse von Böden - Substrat-induziertes Respirationsverfahren.
- DIN ISO 14240-2 (1999-10): Fumigations-Extraktionsverfahren
- DIN ISO 16072 (2005-06): Bodenbeschaffenheit - Laborverfahren zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung (ISO 16072:2002)
- DIN ISO 18287 (2001-04): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) – Gaschromatographisches Verfahren mit Nachweis durch Massenspektrometrie (GC-MS).
- DIN ISO 5725: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen.
- DIN ISO 5725-2 (2002-12): Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens.
- DIN ISO 5725-1 (1997-11): Allgemeine Grundlagen und Begriffe.

- DIN V ENV 13005 (1999-06): Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Fassung ENV 13005:1999.
- Domsch, K. H. (1962): Bodenatmung, Sammelbericht über Methoden und Ergebnisse. – Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene, Band 116, Seite 33-78.
- Düwel, O. / Utermann, J. / Krone, F. (2007): Zuordnung von Bodenarten zu den in Deutschland vorherrschenden Gruppen von Bodenausgangsgesteinen - Auswertung vor dem Hintergrund der Verknüpfungen von Vorsorgewerten nach Anhang 2 BBodSchV mit Hintergrundwerten für anorganische Schadstoffe in Böden. BGR-Bericht, Hannover
- E DIN ISO 11277 (2002-08): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation (ISO 11277:1998 + ISO 11277:1998 Corrigendum 1:2002)
- EU (Europäische Union) (2007): Richtlinie 2007/2/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE), Brüssel
- EURACHEM/CITAC (2004): Leitfaden „Ermittlung der Messunsicherheit bei analytischen Messungen“ (Übersetzung der 2. Aufl. des EURACHEM/CITAC-Guide (2000): Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement).
- EUROLAB (2002): Measurement Uncertainty in Testing. European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories, EURO-LAB Technical Report, Vol. 1.
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2005): Vergleichende Bewertung der Verfahren und Methoden des Anhangs 1 der Bundes - Bodenschutz- und Altlastenverordnung ( BBodSchV ) mit aktuellen Fassungen zur Veröffentlichung im Bundesanzeiger (Hrsg.: Umweltbundesamt), Dessau
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2008): Angabe der Messunsicherheit bei chemischen Bodenuntersuchungen für den Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, hrsg. v. Umweltbundesamt, Dessau.
- Finke, P. / Hartwich, R. / Dudal, R. / Ibanez, J. / Jamagne, M. / King, D. / Montanarella, L. / Yassoglou, N. ( 1998). Georeferenced soil database for Europe. Manual of procedures (ver. 1.0). Report EUR 18092, European Soil Bureau, Joint Research Centre, Ispra.
- Fliegner, M.& Reinirkens, P. (1993): Vorliegende Referenzwerte für PAK in Böden Nordrhein-Westfalens, Bochum
- Gámez, A.J. / Zhou, C.S. / Timmermann, A. / Kurths, J. (2004): Nonlinear dimensionality reduction in climate data. Nonlinear Processes in Geophysics, Vol. 11, p. 393-398.
- Gauger, Th., / Anshelm, F. / Schuster, H. / Erisman, J.W. / Vermeulen, A.T. / Draaijers, G.P.J. / Bleeker, A. / Nagel, H.-D. (2002): Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with Critical Loads and Critical Levels. Final Report on behalf of Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin. BMU/UBA FE-Nr. 299 42 210.



- Geng, X. / Zhan, D.-C. / Zhou, Z.-H. (2005): Supervised nonlinear dimensionality reduction for visualization and classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics (T-SMCB)*, Vol.35, No. 6, p. 1098-1107.
- Graf-Pannatier, E. / Luster, J. / Zimmermann, S. / Blaser, P. (2005): Acidification of Soil Solution in a Chestnut Forest Stand in Southern Switzerland: Are There Signs of Recovery? *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, No. 20, p. 7761-7767.
- Gupta, A.K. / Sinha, S. / Basant, A. / Singh, K.P. (2006): Multivariate Analysis of Selected Metals in Agricultural Soil Receiving UASB Treated Tannery Effluent at Jajmau, Kanpur (India). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 79, p. 577-582.
- Gustafsson, J. P. / van Hees, P. / Starr, M. / Karlton, E. / Lundström, U. (2000): Partitioning of base cations and sulphate between solid and dissolved phases in three podzolised forest soils. In: *Geoderma*, Heft 94, S. 311-333.
- Hartge, K.H. (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, Vol. 7, S. 155-163.
- Hartmann & Kainz (1997): Konzept zur Übertragung bodenkundlicher Daten aus dem Sprachgebrauch der früheren DDR in die aktuelle dt. Nomenklatur. In: *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, Vol. 43, S. 112-117.
- Hartmann, A. & Blume, H.-P. (2005): Bodenbiologie. In: Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Stuttgart, S. 83-100.
- Hässelbarth, W. (2004): BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen. BAM Forschungsbericht 2004, hrsg. v. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Bremerhaven.
- Heinemeyer, O. / Insam, H. / Kaiser, H. / Walenzik, G. (1989): Soil microbial biomass and respiration measurements: an automated technique based on infrared gas analysis. *Plant and Soil* 116, 191-195
- Henkelmann, G., Uhlmann, M., Kolb, R. & Wojtynek, E. (2005): Veränderung der Radionuklidgehalte auf den Boden-Dauerbeobachtungsflächen, In: LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern, Freising
- HLUG – Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2002). *Handbuch Altlasten*, Bd. 7, Teil 6 „Angaben der Messunsicherheit bei Feststoffuntersuchungen aus dem Altlastenbereich“.
- Hopton, M.E. & Mayer, A.L. (2006): Using Self-Organizing Maps to explore patterns in species richness and protection. In: *Biodiversity and Conservation*, Vol. 15, p. 4477-4494.
- Huschek, G. / Krengel, D. / Kayser, M. / Bauriegel, A. / Burger, H. (2004): Länderübergreifende Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung der Länder, *uba texte 50/04*, Berlin.
- Ito, E. / Ono, K. / Ito, Y.M. / Araki, M. (2008): A neuronal network approach to simple prediction of soil nitrification potential: A case study in Japanese temperate forests. In: *Ecological Modelling*, Vol. 219, p. 200-211.
- James, F. & McCulloch, C.M. (1990): Multivariate analysis in ecology and systematics: Panacea or Pandora's Box. In: *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 21, p. 129-166.

- Janetschek H. (Hrsg.) (1982): Ökologische Feldmethoden. Hinweise zur Analyse von Landökosystemen, Stuttgart.
- Joneck, M. & Prinz, R. (1993): Inventur organischer Schadstoffe in Böden Bayerns. Chlorierte Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und N-Herbizide in Böden unterschiedlicher Nutzung und Immissionssituation. GLA-Fachberichte 9, München.
- Kieft, T.L. / Soroker, E. / Firestone, M.K. (1987): Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted. In: Soil Biology and Biochemistry, Vol. 19, p. 119-126.
- Kleefisch, B. & Kues, J. (1997): Das Bodendauerbeobachtungsprogramm von Niedersachsen. Arbeitshefte Boden, Heft 2, Hannover.
- Knappe, F. / Möhler, S. / Ostermeyer, A. / Lazar, S. / Kaufmann, C. (2008): Vergleichende Auswertung von Stoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragspfade, uba texte 36/08, Umweltbundesamt Dessau.  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3644.pdf>
- Kohonen, T. (1982): Analysis of a simple self-organizing process. In: Biological Cybernetics 44 (2), S. 135–140.
- Kohonen, T. (2001): Self-Organizing Maps. Springer Series in Information Sciences, 3<sup>rd</sup> edition, Vol. 30, Berlin.
- König, N. & Bartens, H. (1995): Untersuchung zur Vergleichbarkeit der AKe-Bestimmungen mittels BaCl<sub>2</sub>-Extraktion (EG-Methode) und NH<sub>4</sub>Cl-Perkolation (deutsche Methode),- Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Band 44, Göttingen.
- Kothari, R. & Islam, S. (1999): Spatial Characterization of Remotely Sensed Soil Moisture Data Using Self Organizing Feature Maps. In: IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, Vol. 37, No. 2, p. 1162-1165.
- Kühnen, V. & Goldbach, H. E. (2004): Schwermetallbilanzen verschiedener Betriebstypen: Eintragswege, Flüsse, Minderungspotential. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, 118, 213 Seiten.
- LABO – Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2003): Hintergrundwerte für organische und anorganische Stoffe in Böden. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage. In: Rosenkranz, D / Einsele, G. / Harreß, H.-M. / Bachman, G. [Hrsg.]: Handbuch Bodenschutz, Kennziffer 9006, Bos39. Lfg.XII/03. Erich Schmidt Verlag, Berlin
- LAGB – Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (2008): Schriftliche Mitteilung von Hr. Weller (21.04.2008).
- Lange, H. / Solberg, S. / Clarke, N. (2006): Aluminum dynamics in forest soil waters in Norway. In: The science of the total environment, Vol. 357, No. 2-3, p. 942-957.
- LANU – Landesamt für Natur und Umwelt in Schleswig-Holstein (2004): Gesamtgutachten zu bodenmikrobiologischen Untersuchungen an den BDF in Schleswig-Holstein im Zeitraum von 1995 bis 2002, Trier.
- LANUV - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (2009): Bodenbiologische Untersuchungen auf Bodendauerbeobachtungsflächen in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 1995 – 2007, Essen

- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2007): Organische Schadstoffe in Waldböden Niedersachsens, GeoBerichte 4, Hannover
- Lebensministerium im Freistaat Sachsen (2004): Zum Workshop des F&E-Vorhabens „Auswertemodule Bodenmonitoring“ vom 15.06.2004.
- Lek S. / Delacoste M. / Baran P. / Dimopoulos I. / Lauga J. / Aulagnier S. (1996): Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. In: Ecological Modelling, Vol. 90, No.1, p. 39-52.
- LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2005a): Jahresbericht 2005 – Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen, Freising / Grub.
- LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2005b): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern, Freising / Attaching
- LfU – Bayerische Landesanstalt für Umwelt (2008): Bodenversauerung in Bayern, Augsburg
- Lischeid, G. (2009): Non-linear visualization and analysis of large water quality data sets: A model-free basis for efficient monitoring and risk assessment. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 23, No. 7, p. 977-990
- Lischeid, G. & Bittersohl, J. (2008): Tracing biogeochemical processes in stream water and groundwater using nonlinear statistics. In: Journal of Hydrology, Vol. 357, p. 11-28.
- Lischeid, G. / Kolb, A. / Alewell, C. / Paul, S. (2007): Impact of redox and transport processes in a riparian wetland on stream water quality in the Fichtelgebirge region, southern Germany. In: Hydrological Processes, 21: 123–132.
- LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1994): Bestimmung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Bodenproben, Merkblätter LUA NRW Nr. 1, Essen.
- LUBW – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1999): Boden-Dauerbeobachtung in Baden-Württemberg. Untersuchungen ausgewählter organischer Schadstoffe und mikrobiologische Charakterisierung der Standorte, Karlsruhe.
- LUBW – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2008): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- Lundström, U.S. / van Breemen, N. / Bain, D. / van Hess, P.A.W. / Giesler, R. / Gustafsson, J.P. / Ilvesniemi, H. / Karlton, E. / Melkerud, P.-A. / Olsson, M. / Riise, G. / Wahlberg, O. / Bergelin, A. / Bishop, K. / Finlay, R. / Jongmans, A.G. / Magnusson, T. / Mannerkoski, H. / Nordgren, A. / Nyberg, L. / Starr, M. / Tau Strand, L. (2000): Advances in understanding the podzolization process resulting from a multidisciplinary study of three coniferous forest soils in the Nordic Countries. In: Geoderma, Vol. 94, S. 335-353.
- LWF – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2001): Bayerische Waldklimastationen – bodenphysikalische Untersuchungen, Materialien der LWF, Band 2, Freising.
- Magnusson, B. / Näykki, T. / Havard, H. / Krysell, M. (2004): Handbook for Calculation of Measurement Uncertainty in Environmental Laboratories,- NORDTEST-Report TR 537 ([www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/tec537.pdf](http://www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/tec537.pdf)).

- Mahecha, M.D. / Martinez, A. / Lischeid, G. / Beck, E. (2007): Nonlinear dimensionality reduction: Alternative ordination approaches for extraction and visualizing biodiversity patterns in tropical mountain forest vegetation data. In: Ecological informatics, Vol. 2, p. 138-149.
- Malburg-Graf, B. & Blümel, D. (2002): Überprüfung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Bodennutzung in der Region Stuttgart mit Hilfe einer Schwermetallbilanz, Stuttgart.
- Martens, R. (1987): Estimation of microbial biomass in soil by the respiration method: importance of soil pH and flushing methods for the measurement of respired CO<sub>2</sub>, In: Soil Biology & Biochemistry, Vol. 19, No. 6, p. 703-707.
- Matzner, E. / Alewell, C. / Bittersohl, J. / Lischeid, G. / Kammerer, G. (2001): Biogeochemistry of a spruce forest catchment of the Fichtelgebirge in response to changing atmospheric deposition. In: Tenhunen, J.D. (Editor), Ecosystem approaches to landscape management in Central Europe, Springer, Berlin, pp.463-503.
- Matzner, E. / Zuber, T. / Alewell, C. / Lischeid, G. / Moritz, K. (2004): Trends in Deposition and Canopy Leaching of Mineral Elements as Indicated by Bulk Deposition and Throughfall Measurements. In: Matzner, E. (Editor), Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment - A German case study. Ecological Studies, 172, Springer, Heidelberg, pp. 233-250.
- Mehlich, A. (1953): Rapid determination of cation and anion exchange properties and pH<sub>e</sub> of soils. In: Journal of the Association of Official Agricultural Chemists, Vol. 36, Nr. 2, p. 445-457.
- Meiwe, K.J. / König, N. / Khanna, P.K. / Prenzel, J. / Ulrich, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben 7, Reihe A, S. 1-67.
- Meesenburg, H., Meiwe K. J., Rademacher P., 1995. Long term trends in atmospheric deposition and seepage output in northwest German forest ecosystems. In: Water, Air & Soil Pollution, Vol. 85: p. 611-616.
- Meesenburg, H. & Schulze, A. (2001): Umweltmonitoring lohnt sich - Bedeutung von Langzeitmessungen und deren Anforderungen an die Qualitätssicherung - In: LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: 10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen, Hannover.
- Metzger, F. / Haag, R. / Stempelmann, I. (2005): Boden-Dauerbeobachtung in NRW Konzeption und Sachstand, Hrsg.: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen.
- Mico, C. / Recatala, L. / Peris, M. / Sanchez, J. (2006): Assessing heavy metal sources in agricultural soils of a European Mediterranean area by multivariate analysis. In: Chemosphere, Vol. 65, p.863-872.
- Navabi, K. & Paetz, A. (1998): Methodenhandbuch Bodenschutz II. ubatexte 76/98. Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin.
- NLfB – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (2001): Untersuchung bodenbiologischer Parameter im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung, Arbeitshefte Boden, Heft 4, Hannover

- Pawlitcki, K. & Heim, U.(2005): Boden-Dauerbeobachtung in Bayern – Konzept und Auswertung der Bewirtschaftungsdaten, In: LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern, Freising
- R Development Core Team. 2006. R: A Language and Environment for Statistical Computing. (At: <http://www.R-project.org/>. Accessed: 17/10/2009)
- Rademacher, P. / Meesenburg, H. / Meiwes, K. J. (2001): Schwermetallbelastung und -bilanzierung in niedersächsischen Waldböden, In: LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie : 10 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen, Hannover.
- Rinklebe, J. (2004): Differenzierung von Auenböden der Mittleren Elbe und Quantifizierung des Einflusses von deren Bodenkennwerten auf die mikrobielle Biomasse und Bodenenzymaktivitäten von  $\beta$ -Glucosidase, Protease und alkalischer Phosphatase. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Landwirtschaftliche Fakultät, Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Halle/Saale,
- Ruppert, H. (1987): Bestimmung von Schwermetallen im Boden sowie die ihr Verhalten beeinflussenden Bodeneigenschaften. In: Ruppert, H. (1987): Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherungen von Schwermetallen in Böden Bayerns,- GLA-Fachberichte 2, München.
- Sachs, L. (2000): Statistische Auswertungsmethoden, Berlin.
- Sänger-von Oepen, P. / Nack, T. / Nixdorf, J. / Mencke, B. (1993): Vorstellung der  $\text{SrCl}_2$ -Methode nach Bach zur Bestimmung der effektiven Austauschkapazität und Vergleich mit der  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -Methode. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft 156, S. 311-316.
- Sammon, J.W. (1969): A Nonlinear Mapping for Data Structure Analysis. In: IEEE Transaction on computers, Vol.18, p. 401-409.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, Stuttgart.
- Schilli, C. / Lischeid, G. / Rinklebe, J. (2010): Which processes prevail? Analyzing long-term soil-solution monitoring data using nonlinear statistics, In: Geoderma, Heft 158, S. 412-420
- Schilling, B. (1994): Boden-Dauerbeobachtungsflächen des Bayerischen Geologischen Landesamtes, GLA Fachbericht, Bd. 11, München.
- Schinner, F. / Ühlinger, R. / Kandeler, E. / Margesin, R. (1993): Bodenbiologische Arbeitsmethoden, Heidelberg.
- Schlichting, E. / Blume, H.-P. / Stahr, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum, Berlin.
- Schröder, W. / Schmidt, G. / Pesch, R. (2003): Repräsentanz und Vergleichbarkeit von Daten und Flächen der Bodendauerbeobachtung. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Heft 166, S.649-659.
- Schröder, W. / Schmidt, G. / Pesch, R. / Matejka, H. / Eckstein, T. (2001): Konkretisierung des Umweltbeobachtungsprogrammes im Rahmen eines Stufenkonzeptes der Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder - Teilvorhaben 3; In: UBA (Hrsg.): Konkretisierung des Umweltbeobachtungsprogrammes im Rahmen eines Stufenkonzeptes der Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder; Umweltprobenbank einschließlich Human- und Biomonitoring - Förderkennzeichen 299 82 212 / 02, Berlin

- Schröder, W. / Fränzle, O. / Daschkeit, A. / Bartels, F. / Kaske, A./ Kerines, A. / Schmidt, G. / Stech, C. (1997): Organisation und Methodik des Bodenmonitoring, uba texte 21/98, Berlin.
- Schubert, A. (2002): Bayerische Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen – Bodenuntersuchungen, Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 187, hg. v. Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising.
- Schwarz, R. (2001): Geschichte der Klassifikation und Systematik von Auenböden in der Bundesrepublik Deutschland. In: Hamburger bodenkundliche Arbeiten, Vol. 48, S. 107-117.
- Seling, S. (2005): Proteinbestimmung von Weizen nach Kjeldahl und Dumas: Ein mehrjähriger Vergleich. Tagung für Getreidechemie der Arbeitsgemeinschaft für Getreideforschung e.V., Detmold 23.06.2005.
- Spatz, P. (2001): Möglichkeiten der länderübergreifenden Auswertung an Standorten Bodendauerbeobachtung, ausgehend von der Zusammenstellung der Metadaten aus den Ländern, uba texte 22/01, Berlin.
- Spörlein, P. / Dilling, J. / Joneck, M. (2004): Pilotstudie zur Gleichwertigkeit oder Vergleichbarkeit der Korngrößenbestimmungen von Bodenproben nach E DIN ESO 11277:06.94 (Pipettmethode) und mit dem Sedigraphen. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Heft 167, S. 649-656.
- STMELF – Bayerische Staatsministerien für Landesentwicklung und Umweltfragen und für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1990): Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern. Standortauswahl, Einrichtung, Probenahme, Analytik, München.
- Tennenbaum, J.B. / de Silva, V. / Langford, J.C. (2000): A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction. In: Science, Vol. 290, p. 2319-2323.
- TLUG – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2006): Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Freistaat Thüringen. Einführung und Überblick über die Boden-Dauerbeobachtung im Freistaat Thüringen, Fachstandpunkte der TLUG, Nr. 10.
- TLUG – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2008): Mündliche Mitteilung von Fr. Hanußek-Biermann (19.03.2008).
- TMLNU – Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (2006): Boden-Dauerbeobachtung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Monitoring zur Erfassung von Veränderungen wesentlicher Bodenfunktionen, Jena.
- Tollkühn, T. / Hofbauer, H. / Schubert, A. (2001): Methodenvergleich unterschiedlicher bodenphysikalischer Probenahmeverfahren. Erfahrungsbericht von fünf bayerischen Waldstandorten. In: LWF (2004): Bayerische Waldklimastationen – bodenphysikalische Untersuchungen. Ergebnisse der bodenphysikalischen Basiserhebung an den zweiundzwanzig Bayerischen Waldklimastationen, Materialien der LWF, Bd. 2, Freising.
- UBA – Umweltbundesamt (2010): Anwendung von Bodendaten bei der Klimaanpassung - Workshop des Umweltbundesamtes am 29./30.09.2009, uba texte 29/10, Berlin.
- UBA – Umweltbundesamt (2008): Schriftliche Mitteilung von Hr. Marahrens vom 12.03.2008.

- UBA – Umweltbundesamt (2007): Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. Workshop in Weimar, 30. November bis 1. Dezember 2006, uba texte 34/07, Berlin.
- Uhlig, S. (2008): Leitfaden zur Bewertung der Gleichwertigkeit von unterschiedlichen Messverfahren für anorganische und organische Schadstoffparameter im Rahmen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), Dresden <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3510.pdf>
- Uhlig, S. (2002): Statistische Modellierung von Gleichwertigkeitsuntersuchungen im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes anhand von unterschiedlichen Messverfahren anorganischer und organischer Schadstoffparameter, Dresden.
- Utermann, J. / Fuchs, M. / Düwel, O. (2010): Hintergrundwerte für Spurenelemente in Böden mit Blick auf Bodenarten-Hauptgruppen, Bodenschutz, Heft 4, S. 103-108
- Utermann, J. (2004): Comparison of pH-measurements in soils according to ISO 10390 and DIN 19684-1. In: Niedersächsische forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.) (2005): Handbuch forstliche Analytik, Loseblattsammlung.
- Utermann, J. / Gorny, A. / Hauenstein, M. / Malessa, V. / Müller, U. / Scheffer, B. (2000): Labormethoden-Dokumentation. Geologisches Jahrbuch Reihe G, Heft 8, Hannover.
- Vance, E.D. / Brookes, P.C. / Jenkinson, D. S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C.- Soil Biology & Biochemistry, Vol. 19, No. 6, p.703-707.
- VDLUFA (2007): Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methoden-Handbuch) des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Band I: Die Untersuchung von Böden.
- Vestin, J.L.K. / Norström, S.H. / Bylund, D. / Mellander, P.-E. / Lundström, U.S. (2008): Soil Solution and stream water chemistry in a forested catchment I: Dynamics. In: Geoderma, Vol. 144, S. 256-270.
- Wagner, B. / Töpfner, C. / Lischeid, G. / Scholz, M. / Klinger, R. / Klaas, P. (2003): Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns. GLA-Fachberichte 21, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- Wasserchemische Gesellschaft (2008): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Loseblattsammlung, 71. Lieferung.
- Weyer, C. / Lischeid, G. / Aquilina, L. / Pierson-Wickmann, A.-C. / Martin, C. (2008): Mineralogical sources of the buffer capacity in a granite catchment determined by strontium isotopes. In: Applied Geochemistry, Vol. 23, S. 2888-2905
- Wilcke, D.E. (1967): Oligochaeta. In: Brohmer, P. / Ehrmann, P. / Ulmer, G. / Schmienz, H.: Die Tierwelt Mitteleuropas, I. Urtiere, Hohltiere, Würmer, S. 1-161.
- Zeien, H. & G.W. Brümmer (1989): Chemische Extraktion zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. - Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft 59, S. 505-510.





## Anlage 1 Beschreibung der vorliegenden Messergebnisse obligater Parameter

### Anorganik

Nach Barth et al. 2001 sind 36 anorganische Parameter als obligat aufgeführt. Für alle Parameter liegen Messungen vor. Die Anzahl der Messungen schwankt deutlich (vgl. Tabelle 10). Die Messungen des pH-Wertes werden auf Grund der Anwendung verschiedener Methoden unterteilt. Messungen mit abweichenden Methoden wurden häufig an einer Probe durchgeführt, wodurch die hohe Anzahl der pH-Wert-Messungen insgesamt zu begründen ist. Für die anderen untersuchten Stoffe wird im ersten Schritt auf eine Unterteilung in verschiedene Parameter aufgrund eventueller Unterschiede in der Messmethodik (vgl. Tabelle 14) verzichtet. Die mit über 5000 Messungen am häufigsten gemessenen Parameter sind der pH-Wert in  $\text{CaCl}_2$ , Gesamt-Stickstoff und der organische Kohlenstoff. Auffällig sind die Unterschiede der Messungsanzahlen bei den mit Königswasser extrahierbaren Gehalten. Die Schwermetalle (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn mit über 4.000 Messungen) wurden im Vergleich zu den Nährstoffen meist mehr als doppelt so häufig gemessen. Die mit Königswasser extrahierbaren Gehalte der Nährstoffe liegen mit knapp 2.000 Messungen in der gleichen Größenordnung wie die Parameter der potentiellen Austauschkapazität ( $\text{KAK}_{\text{pot}}$ ) und der Cäsium-Isotope. Die Parameter der effektiven Kationenaustauschkapazität vermitteln mit ca. 3200 Messungen.

Tabelle 10: Anzahl der Messungen obligater anorganischer Parameter

| Parameter                                   | Anzahl |
|---------------------------------------------|--------|
| <b>effektive KAK</b>                        |        |
| Al                                          | 3132   |
| Ca                                          | 3210   |
| Fe                                          | 2773   |
| H                                           | 627    |
| K                                           | 3194   |
| Mn                                          | 3191   |
| Mg                                          | 3194   |
| Na                                          | 3094   |
| <b><math>\text{KAK}_{\text{pot}}</math></b> |        |
| Ca                                          | 1955   |
| H-Wert                                      | 89     |
| K                                           | 1959   |
| Mg                                          | 1953   |
| Na                                          | 1936   |
| <b>Königswasserextrakt</b>                  |        |
| Al                                          | 1543   |
| As                                          | 2860   |
| Ca                                          | 1976   |
| Cd                                          | 4135   |
| Cr                                          | 4246   |

| Parameter                      | Anzahl |
|--------------------------------|--------|
| Cu                             | 4324   |
| Fe                             | 1948   |
| Hg                             | 3190   |
| K                              | 1954   |
| Mg                             | 2160   |
| Mn                             | 2091   |
| Ni                             | 4368   |
| Pb                             | 4357   |
| P                              | 1996   |
| S                              | 420    |
| Zn                             | 4384   |
| <b>Kohlenstoff</b>             |        |
| C <sub>ges</sub>               | 2312   |
| C <sub>org</sub>               | 5023   |
| Carbonatgehalt                 | 3378   |
| <b>Stickstoff</b>              |        |
| N <sub>ges</sub>               | 5492   |
| <b>Langlebige Radionuklide</b> |        |
| <sup>134</sup> Cs              | 1949   |
| <sup>137</sup> Cs              | 1991   |
| <b>pH-Wert</b>                 |        |
| pH-Wert-CaCl <sub>2</sub>      | 5627   |
| pH-Wert-H <sub>2</sub> O       | 2585   |
| pH-Wert-KCl                    | 2311   |
| pH-Wert-Methode unbekannt      | 224    |

## Organik

Die obligaten Parameter der organischen Schadstoffe lassen sich in die drei Gruppen der Chlorpestizide, der Polychlorierte Biphenyle (PCB) und der Polycyclischen aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) unterteilen. Für die meisten untersuchten Parameter liegen zwischen 1000 und 1300 Messungen vor (Tabelle 11). Die Chlorpestizide DDD, DDE und DDT wurden, mit weniger als 100 Messungen, nur in geringem Umfang analysiert.

Tabelle 11: Anzahl der Messungen obligater organischer Schadstoffe

| Parameter                                                 | Anzahl |
|-----------------------------------------------------------|--------|
| <b>Chlorpestizide</b>                                     |        |
| λ-HCH                                                     | 1164   |
| β-HCH                                                     | 1128   |
| δ-HCH                                                     | 824    |
| γ-HCH                                                     | 1286   |
| HCB                                                       | 1337   |
| DDD                                                       | 76     |
| DDE                                                       | 76     |
| DDT                                                       | 82     |
| <b>Polychlorierte Biphenyle (PCB)</b>                     |        |
| PCB 28                                                    | 1119   |
| PCB 52                                                    | 1125   |
| PCB 101                                                   | 1043   |
| PCB 138                                                   | 1268   |
| PCB 153                                                   | 1271   |
| PCB 180                                                   | 1248   |
| <b>Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)</b> |        |
| Acenaphthen                                               | 822    |
| Acenaphthylen                                             | 554    |
| Anthracen                                                 | 1068   |
| Benzo(a)anthracen                                         | 1025   |
| Benzo(a)pyren                                             | 1360   |
| Benzo(b)fluoranthen                                       | 1298   |
| Benzo(ghi)perylene                                        | 1313   |
| Benzo(k)fluoranthen                                       | 1296   |
| Chrysen                                                   | 999    |
| Dibenz(ah)anthracen                                       | 925    |
| Fluoranthen                                               | 1379   |
| Fluoren                                                   | 836    |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren                                     | 1322   |
| Naphthalin                                                | 893    |
| Phenanthren                                               | 1151   |
| Pyren                                                     | 1144   |

## Bodenbiologie

Im Vergleich zu den organischen Schadstoffen und den anorganischen Parametern liegen für die bodenbiologischen Parameter mit weniger als 1000 Messungen wenige Daten vor (Tabelle 12). Die 934 Analyseergebnisse der mikrobiellen Biomasse sind an 816 Proben erhoben worden. Grund für die erhöhte Anzahl an Messergebnissen im Vergleich zur Probenanzahl ist, wie beim pH-Wert, eine parallele Anwendung von verschiedenen Messmethoden (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 12: Anzahl der Messungen obligater biologischer Parameter

| Parameter                             | Messungen |
|---------------------------------------|-----------|
| Metabolischer Quotient                | 338       |
| Mikrobielle Basalatmung <sup>*1</sup> | 934       |
| Mikrobielle Biomasse                  | 752       |

<sup>\*1</sup> teilweise Messungen mit verschiedenen Methoden an einer Probe.  
Messungen an 816 Proben (vgl. Tabelle 14)

## Physik

Die Anzahl der Messungen der verschiedenen obligaten physikalischen Parameter zeigt deutliche Unterschiede. Während für die Fraktionen der Korngröße jeweils deutlich über 5000 Messungen und für die Trockenrohdichte 3632 Messungen vorliegen, wurden die verbleibenden obligaten Parameter seltener als 1000-mal gemessen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Anzahl der Messungen obligater physikalischer Parameter

| Parameter                                               | Anzahl |
|---------------------------------------------------------|--------|
| Festsubstanzdichte                                      | 740    |
| Leitfähigkeit $k_f$ -Wert                               | 948    |
| Rohdichte, trocken                                      | 3632   |
| <b>Korngröße</b>                                        |        |
| Korngrößen (Sand) <sup>*1</sup>                         | 5388   |
| Korngrößen (Schluff) <sup>*1</sup>                      | 5322   |
| Korngrößen (Ton)                                        | 5207   |
| <b>Porengrößenverteilung</b>                            |        |
| Grobporenanteil (10-50 $\mu\text{m}$ )                  | 720    |
| Mittelporenanteil (0,2-10 $\mu\text{m}$ ) <sup>*2</sup> | 437    |

<sup>\*1</sup> Die Fraktionen wurden teilweise in Unterfraktionen unterteilt und gemessen.

<sup>\*2</sup> 426 Messungen unterteilen die Mittelporen zusätzlich in 0,2-3  $\mu\text{m}$  und 3-10  $\mu\text{m}$ .

Da die Empfehlung (Barth et al. 2001) für physikalische Parameter nur eine einmalige Messung vorsieht, ist die hohe Anzahl der vorliegenden Daten zur Korngröße, welche die Anzahl der aufgenommenen Horizonte überschreitet auffällig. Die hohe Anzahl kann zum einen durch die Beprobung eines Schurfes und der BDF bei Einrichtung erklärt werden, zum anderen durch von einigen Bundesländern durchgeführte Wiederholungsuntersuchungen.

## Untersuchungsmethoden

Bei der Auswertung des länderübergreifenden Datenbestandes sind die bei der Datenerhebung eingesetzten Methoden zu berücksichtigen. In der Bodenchemie ist z.B. von der sequentiellen Extraktion bekannt (z.B. Zeien & Brümmer 1989), dass Methoden bei der Untersuchung eines Stoffes zu teilweise erheblich abweichenden Ergebnissen führen. Eine gemeinsame Verwendung von Daten, die mit unterschiedlichen Methoden erhoben werden, ist nicht immer möglich. In einigen Fällen können vergleichbare Ergebnisse umgerechnet und anschließend als gleichwertig angesehen werden (siehe Teil A, Kapitel 2). Dementsprechend ist die angewandte Methode eine essentielle Information bei der Ergebnisdokumentation (im stofflichen Bereich z.B. Extraktions- und Bestimmungsverfahren). Bereits in den früheren länderübergreifenden Arbeiten wurde auf die Heterogenität der angewandten Methoden und der damit verbundenen Problematik der Vergleichbarkeit hingewiesen (Spatz 2001, Huschek et al. 2004). Die in diesen Arbeiten beschriebenen methodischen Abweichungen der Bundesländer finden sich auch in den vorliegenden Daten wieder. In einzelnen Bundesländern haben die beauftragten Labore für die Analysen einzelner Stoffe Hausmethoden verwendet, die sich an die empfohlenen Vorschriften anlehnen. In Einzelfällen ist besonders bei älteren Daten eine Recherche der genauen Methodik nicht mehr möglich. In Tabelle 14 sind exemplarisch einige Beispiele aufgeführt.

Tabelle 14: Beispiele der mitgeteilten Methoden zur Erfassung von Cd, dem pH-Wert und der mikrobiellen Basalatmung

| Cadmium                                          | Mikrobielle Basalatmung                     | pH-Wert           |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|
| Ammoniumnitratextrakt (DIN EN 19730)             | Anderson & Domsch                           | CaCl <sub>2</sub> |
| DTPA Extraktion                                  | Anderson & Domsch – CO <sub>2</sub>         | H <sub>2</sub> O  |
| EDTA Aufschluss (DIN 68406 E29)                  | Anderson & Domsch, DIN ISO 16072 - O2       | KCl               |
| Gesamtgehalt (Hausmethode I) *1                  | Durchflussverfahren (DIN 19737)             | nicht definiert*2 |
| Gesamtgehalt (Hausmethode II) *1                 | Durchflussverfahren (Domsch, DIN ISO 16072) |                   |
| Gesamtgehalt (HFA 3.3.2)                         | Nicht definiert*2                           |                   |
| Gesamtgehalt (HNO <sub>3</sub> -Druckaufschluss) |                                             |                   |
| Gesamtgehalt (nach Ruppert)                      |                                             |                   |
| KAKeff                                           |                                             |                   |
| KAKpot                                           |                                             |                   |
| Königswasser (DIN 38414-7, DIN ISO 11446)        |                                             |                   |
| Königswasser (DIN ISO 11466)                     |                                             |                   |
| Königswasser (Hausmethode)                       |                                             |                   |
| oxalatlösliche Metalle (Hausmethode)             |                                             |                   |
| RFA (Presslinge)                                 |                                             |                   |
| nicht definiert*2                                |                                             |                   |

\*1 Angabe „Gesamtgehalt (Hausmethode)“ von zwei unterschiedlichen Institutionen

\*2 „nicht definiert“ meint: nicht mitgeteilt, nicht recherchierbar oder nicht zuzuordnen

Für die Auswertungen der Daten müssen die Informationen zu den verschiedenen Untersuchungsmethoden bewertet werden. Fehlende Informationen zur Analysemethode, wie z.B. der Eintrag „Nicht definiert“, führen zum Ausschluss der Daten, da diese nicht sinnvoll bewertet und dem entsprechend nicht verwendet werden können. Unterschiedliche Methoden, wie beispielsweise die Methoden zur Ermittlung der Gesamtgehalte sollten auf eine gemeinsame Anwendbarkeit geprüft werden. Eine nicht ausreichende Dokumentation des verwendeten Verfahrens bedingt, dass nachträgliche Recherchen zur Ermittlung der Vergleichbarkeit durchgeführt werden müssten. Erst im Anschluss daran kann eine realistische Einschätzung der Verwendbarkeit stattfinden.

### Zeitliche Verteilung

Für die Ermittlung von Veränderungen der Böden mit der Zeit spielt die Laufzeit der Untersuchung, sowie die Anzahl und die Frequenz der durchgeführten Untersuchungen eine wesentliche Rolle. In Abbildung 41 ist das Jahr der ersten Messung auf den jeweiligen BDF dargestellt. Die Abbildung zeigt nur Flächen, für die in der vorliegenden Datenbank Messungen enthalten sind. Die bereits erwähnte Heterogenität der Betriebsdauer wird deutlich.

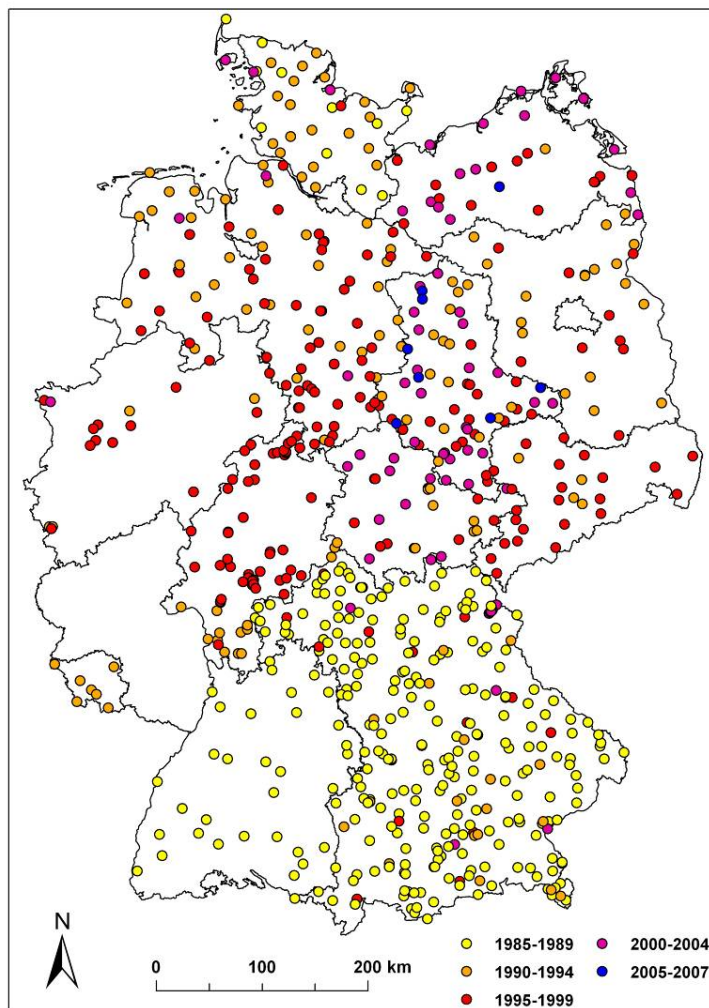


Abbildung 41: Zeitpunkt der ersten Messung an Flächen der Boden-Dauerbeobachtung

Während beispielsweise im Süden Deutschlands auf lange Messzeiträume im bestehenden Messnetz zurückgeblickt werden kann, ist das Messnetz in den neuen Bundesländern teilweise sehr jung. Teilweise ist sogar eine Neueinrichtung von Flächen zur Ergänzung des Messnetzes geplant. Zeitreihenanalysen für einzelne Flächen werden somit teilweise erst in einigen Jahren möglich sein, da eine minimal notwendige Anzahl an Stichproben für das Berechnen tragfähiger Aussagen häufig noch nicht vorliegt. Die zeitliche Verteilung der Proben ist in den Abbildungen (Abbildung 42 – Abbildung 45) für die verschiedenen Parametergruppen exemplarisch an jeweils einem einzelnen Parameter dargestellt. Die Abbildung 42 zeigt ein Maximum der Messungen in der Mitte der neunziger Jahre. Die hohe Anzahl in diesen Jahren erklärt sich durch Erstmessungen an zahlreichen Flächen sowie durchgeführten Wiederholungsuntersuchungen (nach ca. fünf und/oder zehn Jahren) früher eingerichteter Flächen. Auffällig ist die vergleichsweise geringe Anzahl der vorliegenden Messungen seit 2000, insbesondere ab 2004.

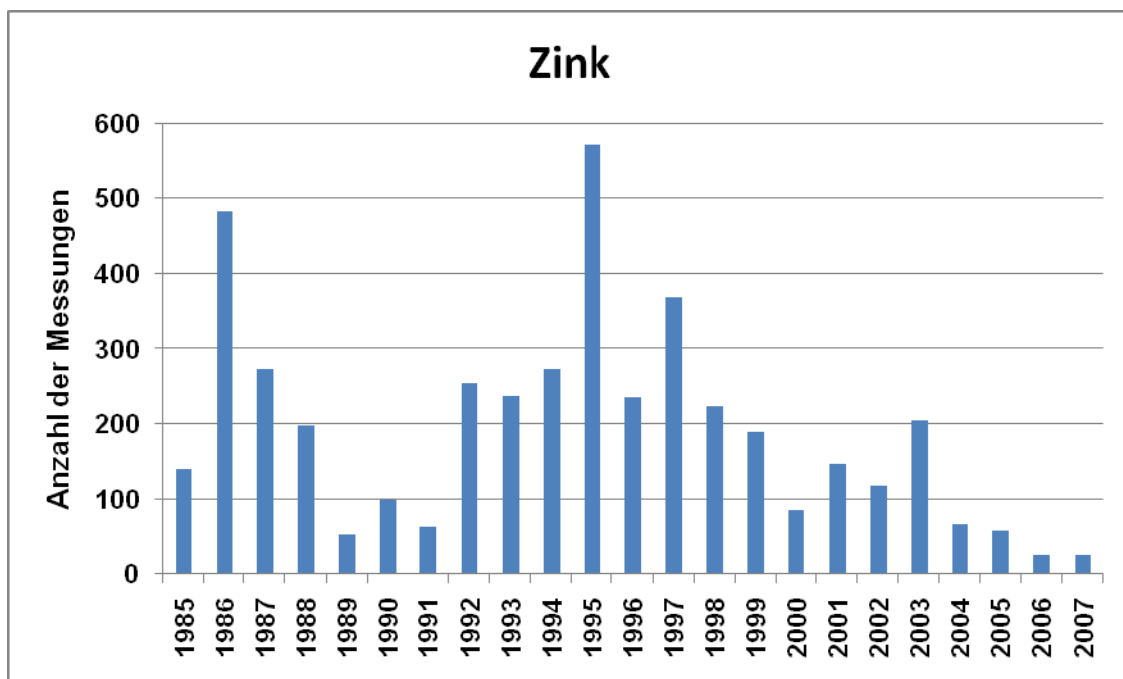


Abbildung 42: Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für Zink im Königswasserextrakt

Die ältesten Ergebnisse von Messungen bodenbiologischer Parameter liegen für das Jahr 1989 vor (Abbildung 43). Ergebnisse der Messungen der Basalatmung reichen nicht über das Jahr 1993 zurück. Jahre mit auffallend hohen Anzahlen an Messungen, wie die Jahre 1986 und 1995 für den Parameter Zink, sind für die mikrobielle Biomasse nicht zu erkennen. Die mit der Zeit steigende Anzahl von Flächen und das empfohlene hohe Messintervall für bodenbiologische Parameter spiegelt sich nicht in Abbildung 43 wieder. Die Anzahl der jährlichen Messergebnisse sollte, aufgrund der geringen empfohlenen Abstände von einem Jahr und der steigenden Flächenanzahl seit Beginn der Messung, mehr oder weniger kontinuierlich mit der Zeit ansteigen. Diese Entwicklung ist jedoch nicht zu erkennen. Ein vergleichbarer deutlicher Rückgang der Messungen wie er bei den anorganischen Parametern festgestellt werden kann, ist ebenfalls nicht zu erkennen. Ein möglicher Grund ist das niedrigere Messintervall.

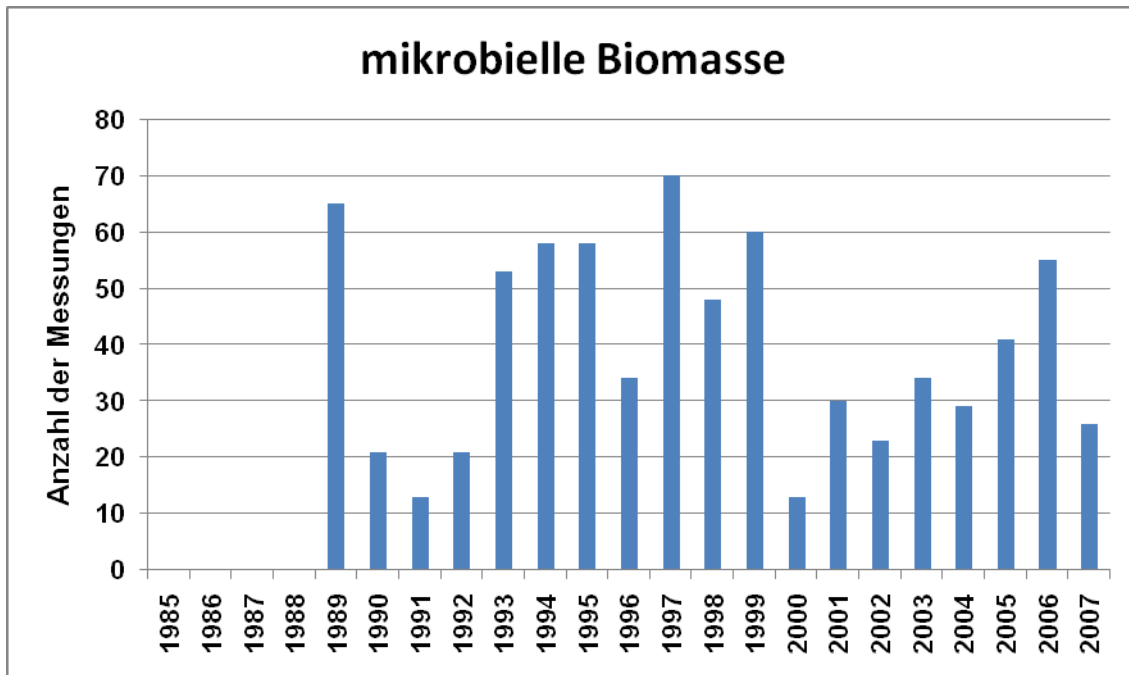


Abbildung 43: Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für die mikrobielle Biomasse

Erste Messungen organischer Schadstoffe (Chlorpestizide und drei PCBs) liegen aus dem Jahr 1985 vor. Aus dem Zeitraum 1985-1987 sind insgesamt 228 Analysenergebnisse der genannten Parameter in der Datenbank enthalten. Für die Jahre 1988 und 1989 liegen keine Informationen zu organischen Schadstoffen vor. Abbildung 44 zeigt am Beispiel von B(a)p, dass seit 1990 aus jedem Jahr Daten zu organischen Schadstoffen vorliegen.

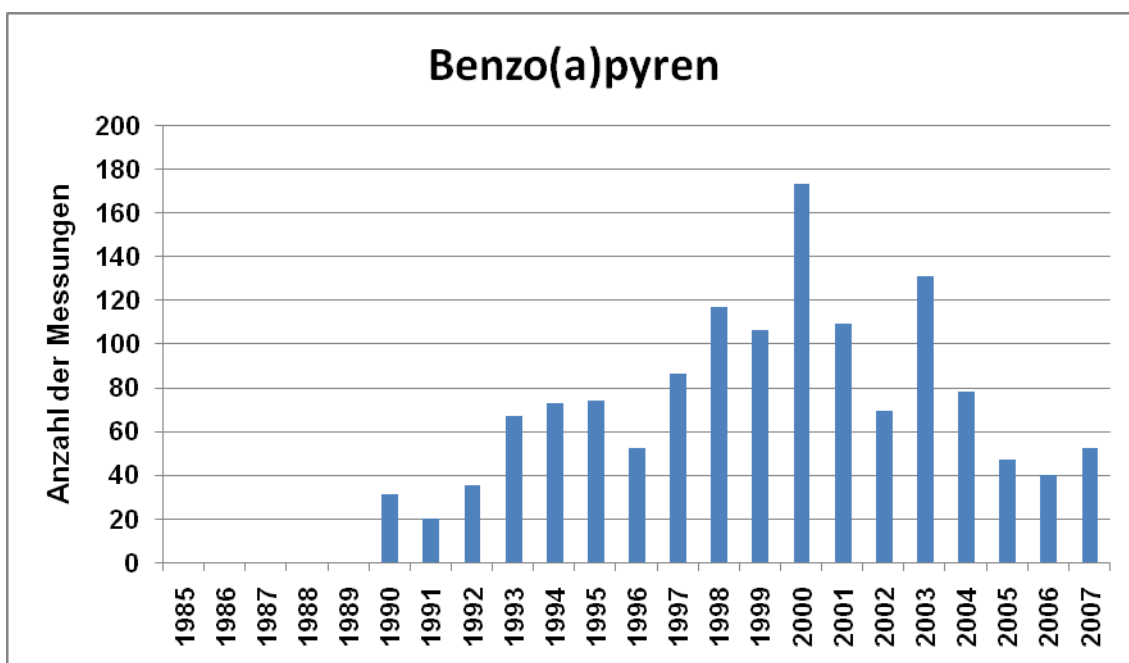


Abbildung 44: Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für Benzo(a)pyren



Die häufigsten Messungen der Trockenrohdichte, als Beispiel für einen physikalischen Parameter, sind in den Jahren 1985 und 1986 durchgeführt worden (Abbildung 45). Diese Verteilung entspricht in etwa der Anzahl der in diesem Zeitraum eingerichteten Flächen und somit der Empfehlung einer einmaligen Messung bei Einrichtung der Flächen.

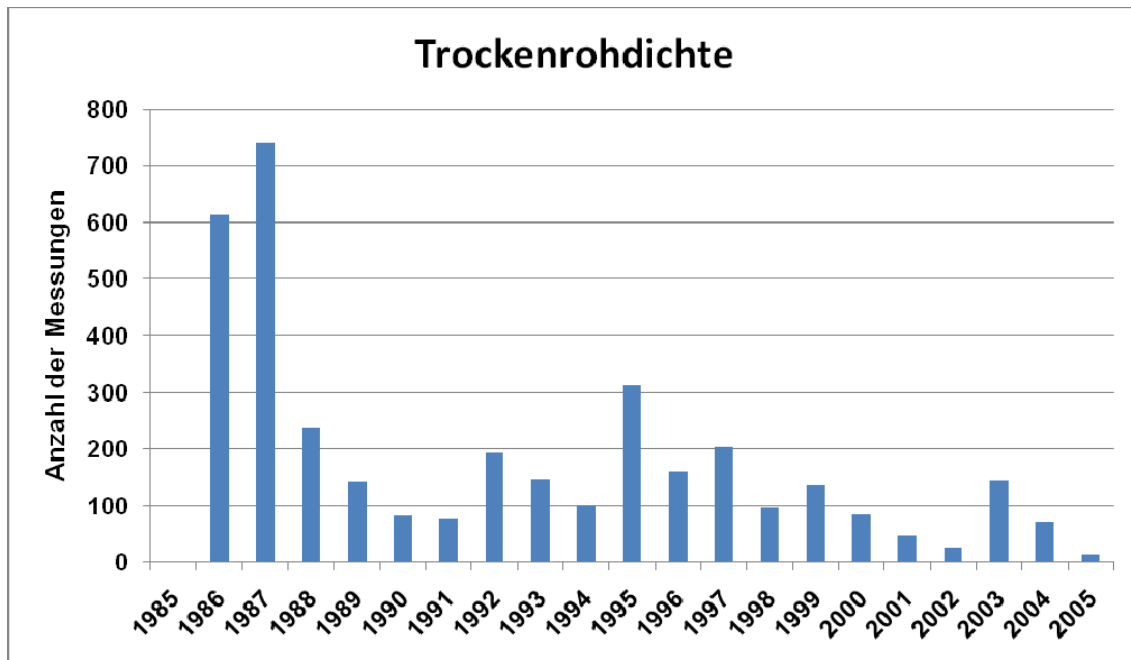


Abbildung 45: Anzahl der vorliegenden Analysenergebnisse für die Trockenrohdichte

Ein großes Problem für die gemeinsame Verwendung der Daten der unterschiedlichen Parametergruppen stellen die nicht aufeinander abgestimmten Zeitpunkte der Probenahme zur Ermittlung der Parameter der einzelnen Gruppen dar. In Tabelle 15 sind Beispiele von zwei Flächen aufgeführt.

#### Beispielstandort A:

*Eine Zuordnung der gemessenen Werte von organischen Schadstoffen zu einer Erhebung von anorganischen Parametern ist nicht sinnvoll möglich, da die Abstände zur Erstbeprobung und zur Wiederholungsbeprobung in etwa gleich sind.*

#### Beispielstandort B:

*Für die zusammen verwendbaren Parametergruppen Anorganik und Organik stehen keine korrespondierenden Werte obligater bodenbiologischer Analysen zur Verfügung. Die Erstbeprobung zur Ermittlung von Parametern der Gruppe Bodenbiologie kann keinen anderen Erhebungen zugeordnet werden, da die zeitlichen Abstände zu groß sind. Die möglicherweise noch parallel verwendbaren Werte der Parametergruppen der Biologie und Anorganik der ersten Wiederholungsbeprobung können keinen entsprechenden Werten zu organischen Schadstoffen zugewiesen werden. Parametergruppen übergreifende Auswertungen im Hinblick auf die zeitliche Veränderung sind somit nicht möglich.*

Tabelle 15: Beispiele für die Problematik der unterschiedlichen Beprobungszeitpunkte

| Standort | Jahr | Beprobung       | Parametergruppe |
|----------|------|-----------------|-----------------|
| A        | 1992 | Erstbeprobung   | Anorganik       |
| A        | 1996 | Erstbeprobung   | Organik         |
| A        | 2001 | 1. Wiederholung | Anorganik       |
| B        | 1990 | Erstbeprobung   | Anorganik       |
| B        | 1990 | Erstbeprobung   | Organik         |
| B        | 1995 | Erstbeprobung   | Biologie        |
| B        | 1998 | 1. Wiederholung | Biologie        |
| B        | 1999 | 1. Wiederholung | Anorganik       |

Die gezeigten Beispiele zeigen, dass eine parametergruppenübergreifende Auswertung einer sorgfältigen Prüfung der Daten bedarf. Es ist notwendig zu prüfen, in wie fern eine Zuweisung der Ergebnisse einzelner Gruppen zueinander statthaft ist. Die zu wählenden hinnehmbaren Toleranzen sollten für die jeweiligen Parametergruppen unterschiedlich definiert werden. So sind Abweichungen in den Messungen von zwei Jahren beim Vergleich von Parametern der Gruppen Anorganik und Physik möglicherweise tolerierbar, während die gleiche zeitliche Abweichung bei der Verwendung von Messwerten bodenbiologischer Parameter vermutlich größere Auswirkungen haben könnte. Diese Parameter reagieren deutlich sensibler auf monatlich und jährlich schwankende Einflüsse wie beispielsweise die Temperatur oder den Bodenwassergehalt.

### Räumliche Verteilung

Um die Möglichkeit bundesweiter Auswertungen beurteilen zu können, ist die räumliche Verteilung der Daten das wesentliche Kriterium. Die Darstellung erfolgt aggregiert für die obligaten Parameter der vier Gruppen Anorganik, Organik, Biologie und Physik (Abbildung 46 bis Abbildung 49). Die Voraussetzung ist, dass Daten für mindestens einen der obligaten Parameter der jeweiligen Gruppe am Standort vorliegen.

Die größte Flächenabdeckung ist für die anorganischen Parameter zu erkennen. Nahezu für jede Fläche liegen Messergebnisse verschiedener obligater anorganischer Parameter vor. Die Anzahl der in einem Horizont gemessenen Parameter schwankt jedoch stark zwischen 1 und 34.

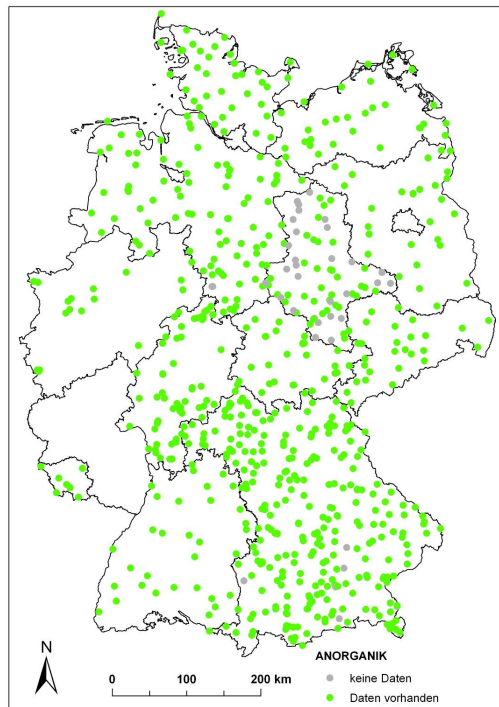


Abbildung 46:  
Räumliche Verteilung von gemessenen  
Parametern der Gruppe Anorganik

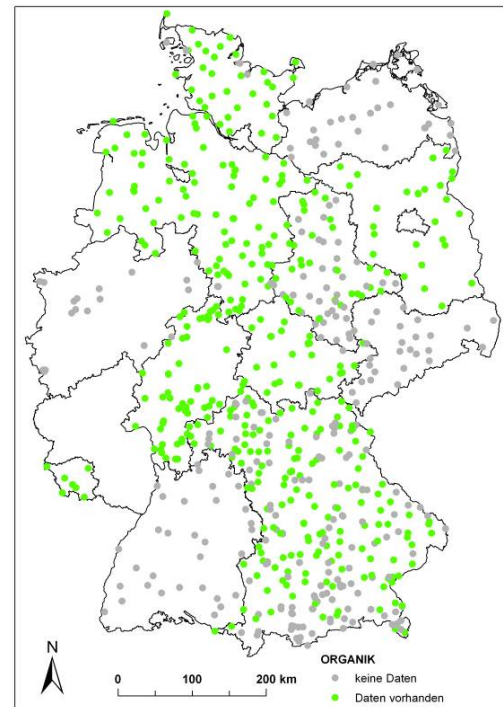


Abbildung 48:  
Räumliche Verteilung von gemessenen  
Parametern der Gruppe Organik

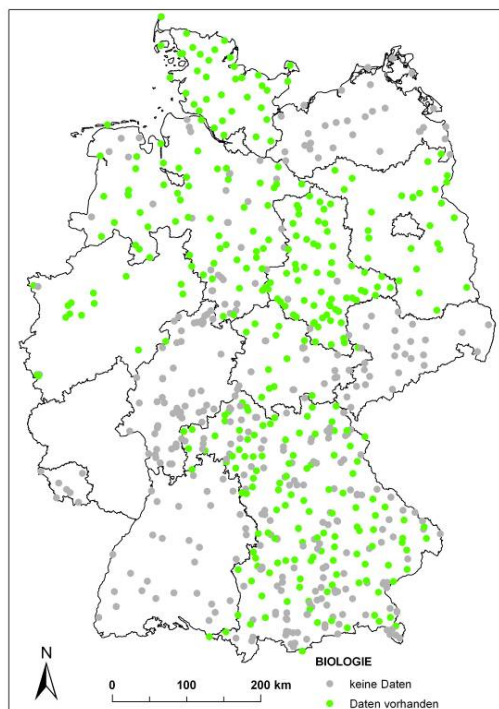


Abbildung 47:  
Räumliche Verteilung von gemessenen  
Parametern der Gruppe Biologie

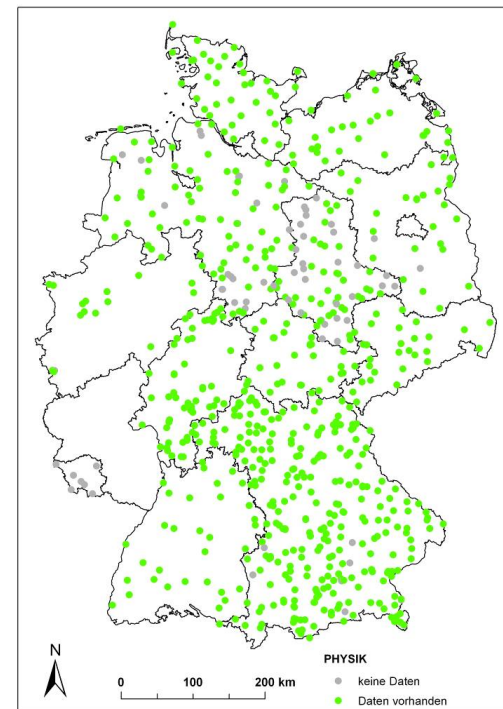


Abbildung 49:  
Räumliche Verteilung von gemessenen  
Parametern der Gruppe Physik

## Bewertung des Datenbestandes

Die genaue Analyse des Datenbestandes hat gezeigt, dass zu der von Barth et al. 2001 empfohlenen Vorgehensweise Abweichungen bestehen. Die Anzahl der Messdaten der obligaten Parameter, die nach den Empfehlungen (Barth et al. 2001) vorliegen sollten wurden meist nicht erreicht. Die Anzahl der Daten zu den obligaten Parametern ist teilweise deutlich geringer als angenommen. Die Erwartungen, die zu Projektbeginn an den Datenbestand gestellt wurden, konnten nicht vollständig erfüllt werden. Die folgenden Tabellen stellen exemplarisch die Anzahl der vorhandenen Analysedaten den nach Barth et al. erwarteten Anzahlen gegenüber. Da Messungen verschiedener Parameter nicht immer über die gesamte Profiltiefe durchgeführt werden, beschränkt sich die Gegenüberstellung auf den oberen Horizont einer BDF (ohne Berücksichtigung von Auflagehorizonten). Grundlage für die Anzahl der theoretisch erwarteten Messungen ist eine Messung bei Einrichtung der jeweiligen BDF und Wiederholungsuntersuchungen mit einer Frequenz von einem Jahr für die Parametergruppe der Bodenbiologie und von fünf Jahren für die der Organik und Anorganik. Bei den physikalischen Parametern wird von einer einmaligen Aufnahme bei Einrichtung ausgegangen (vgl. Barth et al. 2001). Diesen Annahmen auf Grundlage von Barth et al. sind als maximale theoretische Anzahl zu verstehen, da die Messzeiträume dort nicht festgelegt, sondern als Mindestanforderung empfohlen sind. Daher wurden zusätzlich die möglichen Messungen der anorganischen und organischen Parameter bei einer Wiederholungsbeprobung im Zyklus von zehn Jahren ermittelt.

Tabelle 16: Anzahl der Messungen obligater anorganischer Parameter seit Einrichtung der jeweiligen Flächen

| Parameter           | Messungen                  |          |                                     |
|---------------------|----------------------------|----------|-------------------------------------|
|                     | theoretisch mit Messzyklus |          | vorliegend mit realen<br>Messzyklen |
|                     | 5 Jahre                    | 10 Jahre |                                     |
| effektive KAK       |                            |          |                                     |
| Al                  | 3223                       | 1742     | 686                                 |
| Ca                  | 3223                       | 1742     | 713                                 |
| Fe                  | 3223                       | 1742     | 606                                 |
| H                   | 3223                       | 1742     | 120                                 |
| K                   | 3223                       | 1742     | 710                                 |
| Mn                  | 3223                       | 1742     | 710                                 |
| Mg                  | 3223                       | 1742     | 711                                 |
| Na                  | 3223                       | 1742     | 686                                 |
| potentielle KAK     |                            |          |                                     |
| Ca                  | 3223                       | 1742     | 560                                 |
| H                   | 3223                       | 1742     | 0                                   |
| K                   | 3223                       | 1742     | 560                                 |
| Mg                  | 3223                       | 1742     | 560                                 |
| Na                  | 3223                       | 1742     | 557                                 |
| Königswasserextrakt |                            |          |                                     |
| Al                  | 3223                       | 1742     | 313                                 |
| As                  | 3223                       | 1742     | 679                                 |
| Ca                  | 3223                       | 1742     | 546                                 |

| Parameter                      | Messungen                  |          |                                  |
|--------------------------------|----------------------------|----------|----------------------------------|
|                                | theoretisch mit Messzyklus |          | vorliegend mit realen Messzyklen |
|                                | 5 Jahre                    | 10 Jahre |                                  |
| Cr                             | 3223                       | 1742     | 1049                             |
| Cd                             | 3223                       | 1742     | 1089                             |
| Cu                             | 3223                       | 1742     | 1103                             |
| Fe                             | 3223                       | 1742     | 510                              |
| Hg                             | 3223                       | 1742     | 878                              |
| K                              | 3223                       | 1742     | 539                              |
| Mg                             | 3223                       | 1742     | 598                              |
| Mn                             | 3223                       | 1742     | 563                              |
| Ni                             | 3223                       | 1742     | 1107                             |
| Pb                             | 3223                       | 1742     | 1110                             |
| P                              | 3223                       | 1742     | 527                              |
| S                              | 3223                       | 1742     | 90                               |
| Zn                             | 3223                       | 1742     | 1110                             |
| <b>Kohlenstoff</b>             |                            |          |                                  |
| C <sub>ges</sub>               | 3223                       | 1742     | 697                              |
| C <sub>org</sub>               | 3223                       | 1742     | 1187                             |
| Carbonatgehalt                 | 3223                       | 1742     | 855                              |
| <b>Stickstoff</b>              |                            |          |                                  |
| N <sub>ges</sub>               | 3223                       | 1742     | 1464                             |
| <b>Langlebige Radionuklide</b> |                            |          |                                  |
| <sup>134</sup> Cs              | 3223                       | 1742     | 535                              |
| <sup>137</sup> Cs              | 3223                       | 1742     | 558                              |
| <b>pH-Wert</b>                 |                            |          |                                  |
| pH-Wert-CaCl <sub>2</sub>      | 3223                       | 1742     | 1369                             |
| pH-Wert-H <sub>2</sub> O       | 3223                       | 1742     | 584                              |
| pH-Wert-KCl                    | 3223                       | 1742     | 486                              |
| pH-Wert-Methode unbekannt      | 3223                       | 1742     | 64                               |

Tabelle 17: Anzahl der Messungen obligater organischer Schadstoffe seit Einrichtung der jeweiligen Flächen

| Parameter                                          | Messungen                  |          |                                  |
|----------------------------------------------------|----------------------------|----------|----------------------------------|
|                                                    | Theoretisch mit Messzyklus |          | Vorliegend mit realen Messzyklen |
|                                                    | 5 Jahre                    | 10 Jahre |                                  |
| Chlorpestizide                                     |                            |          |                                  |
| λ-HCH                                              | 3223                       | 1742     | 494                              |
| β-HCH                                              | 3223                       | 1742     | 467                              |
| δ-HCH                                              | 3223                       | 1742     | 316                              |
| γ-HCH                                              | 3223                       | 1742     | 567                              |
| HCB                                                | 3223                       | 1742     | 582                              |
| DDD                                                | 3223                       | 1742     | 27                               |
| DDE                                                | 3223                       | 1742     | 27                               |
| DDT                                                | 3223                       | 1742     | 33                               |
| Polychlorierte Biphenyle (PCB)                     |                            |          |                                  |
| PCB 28                                             | 3223                       | 1742     | 432                              |
| PCB 52                                             | 3223                       | 1742     | 434                              |
| PCB 101                                            | 3223                       | 1742     | 407                              |
| PCB 138                                            | 3223                       | 1742     | 523                              |
| PCB 153                                            | 3223                       | 1742     | 523                              |
| PCB 180                                            | 3223                       | 1742     | 511                              |
| Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) |                            |          |                                  |
| Acenaphthen                                        | 3223                       | 1742     | 396                              |
| Acenaphthylen                                      | 3223                       | 1742     | 289                              |
| Anthracen                                          | 3223                       | 1742     | 494                              |
| Benzo(a)anthracen                                  | 3223                       | 1742     | 472                              |
| Benzo(a)pyren                                      | 3223                       | 1742     | 603                              |
| Benzo(b)fluoranthen                                | 3223                       | 1742     | 558                              |
| Benzo(ghi)perylen                                  | 3223                       | 1742     | 576                              |
| Benzo(k)fluoranthen                                | 3223                       | 1742     | 563                              |
| Chrysen                                            | 3223                       | 1742     | 469                              |
| Dibenz(ah)anthracen                                | 3223                       | 1742     | 403                              |
| Fluoranthen                                        | 3223                       | 1742     | 606                              |
| Fluoren                                            | 3223                       | 1742     | 405                              |
| Indeno(1,2,3-cd)pyren                              | 3223                       | 1742     | 583                              |
| Naphthalin                                         | 3223                       | 1742     | 432                              |
| Phenanthren                                        | 3223                       | 1742     | 523                              |
| Pyren                                              | 3223                       | 1742     | 526                              |

Tabelle 18: Anzahl der Messungen obligater biologischer Parameter seit Einrichtung der jeweiligen Flächen

| Parameter                                   | Messungen   |             |
|---------------------------------------------|-------------|-------------|
|                                             | theoretisch | vorliegende |
| Metabolischer Quotient                      | 14508       | 211         |
| Mikrobielle Basalatmung                     | 14508       | 229         |
| Mikrobielle Basalatmung-Durchflussverfahren | 14508       | 257         |
| Mikrobielle Biomasse                        | 14508       | 324         |

Tabelle 19: Anzahl der Messungen obligater physikalischer Parameter seit Einrichtung der jeweiligen Flächen

| Parameter                                 | Messungen   |             |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|
|                                           | theoretisch | vorliegende |
| Festsubstanzdichte                        | 733         | 160         |
| Leitfähigkeit $k_f$ -Wert                 | 733         | 326         |
| Rohdichte, trocken (TRD)                  | 733         | 973         |
| <b>Korngröße</b>                          |             |             |
| Korngrößen (Sand)                         | 733         | 1239        |
| Korngrößen (Ton)                          | 733         | 1246        |
| Korngrößen (Schluff)                      | 733         | 1236        |
| <b>Porengrößenverteilung</b>              |             |             |
| Grobporenanteil (10-50 $\mu\text{m}$ )    | 733         | 241         |
| Mittelporenanteil (0,2-10 $\mu\text{m}$ ) | 733         | 168         |
| Mittelporenanteil (0,2-3 $\mu\text{m}$ )  | 733         | 96          |
| Mittelporenanteil (3-10 $\mu\text{m}$ )   | 733         | 96          |

Die Tabellen 16 bis 19 zeigen am Beispiel des oberen Mineralbodenhorizontes, dass die Anzahl der theoretisch zu erwartenden Messungen lediglich für die physikalischen Parameter Sand, Schluff, Ton und der TRD erfüllt werden konnten. Die anderen Parametergruppen unterschreiten die Anzahlen an Messungen meist deutlich.

Im Hinblick auf die Erfassung von stofflichen Vorräten, besonders ihrer zeitlichen Veränderung, stellt sich die Frage, ob eine einmalige Aufnahme der TRD ausreichend ist. Zur Erfassung der Vorräte wäre eine zeitgleiche Messung der TRD und des zu betrachtenden Parameters sinnvoll. Zur Ermittlung der Schwermetallvorräte in einem Zyklus von 10 Jahren sollten somit 1742 Messungen der TRD vorliegen (vgl. Tabelle 16). Vor diesem Hintergrund einer Vorratsberechnung erscheint die Zahl der vorliegenden TRD-Messungen mit 973 als zu gering.

Unter Annahme eines zehnjährigen Zyklus der Messung der Parametergruppen Anorganik und Organik liegen für den pH-Wert Messungen in der nach *Barth et al 2001* empfohlenen Größenordnung vor (Tabelle 17). Mit über 1000 vorliegenden Werten von TOC,  $N_{\text{ges}}$ , Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zink sowie 878 Messungen von Hg im Königswasserextrakt und 855 des Carbonatgehaltes liegen für diese zehn anorganischen Parameter mehr als 50 % der theoretisch erwarteten Proben der am

intensivsten untersuchten Tiefenstufe vor. Auffallend gering, im Vergleich zur Empfehlung, ist die Anzahl der vorliegenden Werte zu obligaten biologischen Parametern. Durch ein Zusammenfassen der unterschiedlichen Analysemethoden liegen 488 Werte zur mikrobiellen Basalatmung vor. Bei jährlicher Messung an allen hier betrachteten 733 Standorten liegen somit weniger als 4 % der theoretisch erwarteten Analysenergebnisse vor. Die Tabelle 20 ermöglicht eine Einschätzung zur Verteilung der vorliegenden Daten hinsichtlich durchgeführter Wiederholungsuntersuchungen (mind. ein obligater Parameter erneut erhoben) über alle Parametergruppen.

Tabelle 20: Anzahl der Flächen mit Wiederholungsuntersuchungen

| <b>Beprobung</b>    | <b>Anorganik</b> | <b>Organik</b> | <b>Biologie</b> | <b>Physik</b> |
|---------------------|------------------|----------------|-----------------|---------------|
| Erstbeprobung       | 706              | 442            | 347             | 555           |
| eine Wiederholung   | 191              | 168            | 129             | 92            |
| zwei Wiederholungen | 50               | 46             | 74              | 12            |
| drei Wiederholungen | 5                | 4              | 45              | 0             |
| vier Wiederholungen | 0                | 1              | 5               | 0             |

Die Angaben zu den durchgeführten Erstbeprobungen zeigen die aus Tabelle 16 bis Tabelle 19 bekannten Ergebnisse. Die häufigsten Wiederholungsuntersuchungen wurden für anorganischen Parameter durchgeführt. Mindestens eine Wiederholungsuntersuchung liegt für etwa 38 % der beprobten Flächen für die Parametergruppen Organik und Biologie vor. Für Flächen an denen eine Aufnahme der anorganischen Parameter durchgeführt wurde, liegen nur in 27 % der Fälle Wiederholungsuntersuchungen vor. Physikalische Parameter wurden nur in 16% der Fälle erneut erhoben. Mehr als zwei Wiederholungsuntersuchungen liegen fast ausschließlich für biologische Parameter vor. Die geringe Anzahl bei anorganischen und organischen Parametern ist durch die großen Zeitintervalle der Wiederholungen ( $\geq 5$  Jahre) für diese Gruppen bedingt. Diese ergeben sich daraus, dass messbare Änderungen erst nach langen Zeiträumen zu erwarten sind. Aber auch bei den zeitlich dynamischeren Parametern wie z.B. der Bodenbiologie erschwert die gegenwärtig geringe Anzahl an Wiederholungsuntersuchungen die Analysen hinsichtlich zeitlicher Trends.



## Anlage 2 Einzelstandorte in der SOK-SAM

Die Informationen der verschiedenen bundesweiten Muster lassen Rückschlüsse für einzelne Proben oder Beobachtungsflächen zu (vgl. Kap. 5.2). In Abbildung 50 sind Proben aus verschiedenen Tiefenstufen von drei Standorten unter Wald mit unterschiedlichem Ausgangsgestein dargestellt. Informationen zu den drei Profilen sowie die Analysedaten sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

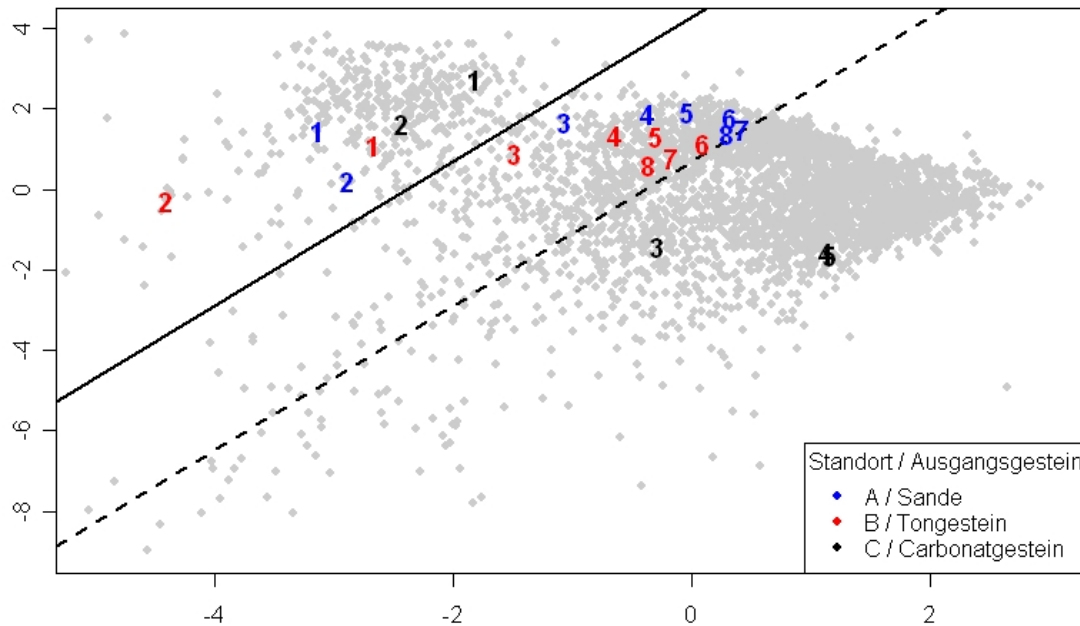


Abbildung 50: Darstellung von einzelnen Proben drei verschiedener Standorte unter forstwirtschaftlicher Nutzung. Die Zahlen kennzeichnen die Horizonte von oben nach unten (vgl. Tabelle 21)

Die Auflagehorizonte A1, A2, B1 und B2 weisen vergleichsweise hohe Gehalte an Schwermetallen auf. Die Punkte werden dementsprechend außerhalb des kleinen Clusters im Bereich der erhöhten Gehalte (vgl. Abbildung 12) dargestellt. Die Lage des L-Of- und des Oh-Horizontes zueinander entspricht dem bereits beschriebenen Muster aus Abbildung 15.

Der Vergleich der mineralischen Proben (Nummern  $\geq 3$ ) der beiden Standorte korrespondiert mit den in Abbildung 14 dargestellten Ergebnissen. Proben des Standortes A (Ausgangsgestein „Sand“) sind weiter oben, im Bereich geringerer Schwermetallgehalte, im großen Cluster zu finden als die entsprechenden Proben des Standortes B (Ausgangsgestein „Tongestein“). Die Lage spiegelt die unterschiedlichen geogenen Schwermetallgehalte wider.

Bei der näheren Betrachtung der dargestellten mineralischen Proben des Standortes B können weitere Regelmäßigkeiten festgestellt werden. Mit größerer Tiefe werden die Proben 3 bis 6 weiter rechts im Plot dargestellt und zeichnen in etwa eine Linie parallel zur X-Achse nach. Die Proben 3 bis 6 sind alle durch eine Anreicherung von Humus gekennzeichnet (vgl. Tabelle 21). Die Proben der nicht mit Humus angereicherten

Standorte 7 und 8 folgen dieser gedachten Linie nicht und machen hier einen „Knick“ in Richtung der linken unteren Ecke. Durch die Lage wird angezeigt, dass die stofflichen Eigenschaften der humusangereicherten Proben 3 bis 6 und der humusarmen Proben 7 und 8 durch unterschiedliche steuernde Einflüsse bestimmt werden.

Die Reihung der Proben 3 bis 6 zeichnet den Gradienten des Pb-Gehaltes im Bereich zwischen den Hilfslinien nach (vgl. Abbildung 19). Für die Ausprägung dieses Gradienten spielt die Deposition eine entscheidende Rolle. Die Tabelle 21 zeigt ähnliche Cr-Gehalte für die Proben 3 bis 6. Die Pb-Gehalte nehmen mit der Tiefe ab. Dies entspricht dem Muster in Abbildung 19 sehr gut. Die Interpretation des Depositionseinflusses stimmt mit dem Auftreten des Musters bei den humusangereicherten Horizonten überein. Der Knick der Proben 7 und 8 in Richtung der linken unteren Ecke zeichnet den Gradienten ansteigender Gehalte der meisten Schwermetalle nach (vgl. Abbildung 12). Dieser Gradient wird auf die geogene Ausstattung mit Schwermetallen zurück geführt.

Der Vergleich der beiden Standorte zeigt, dass die für den Gesamtdatenbestand erkannten Regelmäßigkeiten auch am einzelnen Standort erkennbar sind. An den Proben der mineralischen Horizonte mit deutlicher Anreicherung von Humus ist ein Einfluss der Deposition erkennbar. Der sauer wirkende Einfluss der Deposition ist an der entsprechenden Lage in der Abbildung 50 zu erkennen. Ein Ansteigen der pH-Werte mit größerer Tiefe wird bis zum Horizont A7 bzw. B6 wird angezeigt (vgl. pH-Gradient in Abbildung 11). In tieferen Horizonten ist der Einfluss der Deposition und der mit der Versauerung verbundenen Prozesse von untergeordneter Rolle für die untersuchten Parameter. An diesen Horizonten beginnt der „Knick“, dessen Richtung die verstärkte Bedeutung der geogenen Ausstattung hervorhebt.

Die Unterschiede der Standorte hinsichtlich des Ausgangsgesteins zeigen sich nicht in den Auflagehorizonten (kleines Cluster links der durchgezogenen Linie). Beide Standorte weisen, im Vergleich zu den meisten anderen Auflagen, höhere Schwermetallgehalte auf. Dies ist an der Lage links unterhalb des Clusters erkennbar. Die verschiedenen Horizonte der Auflage sind ebenfalls an Hand der Lage zueinander zu erkennen. Das jüngere Auflagenmaterial (L-Of) weist höhere Y-Werte auf, als die zugehörigen Oh-Horizonte. Dieses in Abbildung 15 beschriebene Muster trifft also sowohl auf Auflagehorizonte die stark von der Deposition beeinflusst sind (Standorte A und B), als auch für Standorte mit geringem Depositionseinfluss wie dem Standort C zu.

Im Gegensatz zu den sauren Standorten A und B steht der dritte betrachtete Waldboden. Die für einen Waldstandort mit  $\geq 6,0$  vergleichsweise hohen pH-Werte der mineralischen Horizonte führen dazu, dass sich die Punkte im Bereich der meist landwirtschaftlichen Nutzflächen (vgl. Abbildung 10) einordnen. Der um 1,4 niedrigere pH-Wert der Probe C3, im Vergleich zu den Proben C4 und C5, ist für die großen Abstand der Punkte parallel zur X-Achse in der Darstellung verantwortlich. Die niedrigeren Y-Werte der Proben rechts durchgezogenen Hilfslinie dieses Standortes (verglichen mit Standort A und B) sind auf höhere geogene Gehalte an Schwermetallen zurückzuführen. Dies entspricht den Ergebnissen der Abbildungen 14 und 17.

Die gezeigten Beispiele verdeutlichen auch noch einmal die Ergebnisse aus Abbildung 18. Hohe Gehalte von fast allen Schwermetallen der Standorte A und B sind in deren Auflage zu finden. Für einzelne Parameter (z.B. Pb) sind auch erhöhte Gehalte in oberflächennahen mineralischen Proben, die nahe der durchgezogenen Linie dargestellt werden, zu erkennen, was auf einen Depositionseinfluss hindeutet. Die mineralischen Proben dieser Standorte sind generell im oberen Bereich des großen Clusters angesiedelt und zeigen somit keine auffällig hohen geogenen Gehalte.

Der umgekehrte Fall trifft auf Standort C zu. In Böden die sich auf Carbonatgesteinen entwickelt haben sind typischerweise höhere Gehalte an Schwermetallen in mineralischen Proben zu finden. Diese werden durch die Lage am unteren Rand, bzw. leicht außerhalb des großen Clusters dargestellt. Ein auffälliger Einfluss der Deposition, der sich in der Lage der Punkte der Auflagehorizonte ausdrücken würde, ist nicht zu erkennen. Die Punkte der Auflagehorizonte ordnen sich in das kleine Cluster ein.

Die Position eines einzelnen Punktes gibt somit verschiedene Hinweise, die sich auf den betrachteten Datenbestand beziehen. Für den dritten Horizont des Standortes C kann beispielsweise festgestellt werden, dass er erhöhte geogene Schwermetallkonzentrationen aufweist. Die Lage verschiedener Punkte zueinander lässt ebenfalls Rückschlüsse zu. Ein Vergleich der Horizonte 2 der jeweiligen Standorte gibt beispielsweise Hinweise auf die unterschiedliche Deposition. Je weiter der Punkt in Richtung der linken unteren Ecke verschoben ist, desto stärker ist der Einfluss der Deposition auf den Gehalt an Schwermetallen.

Der Vergleich der Punkte eines einzelnen Standortes kann Hinweise darauf geben, welche Einflüsse wo im Profil dominieren. Wie bereits beschrieben kann am „Knick“ in der Reihe der mineralischen Horizonte des Standortes 2 erkannt werden, bis in welche Tiefe ein Einfluss der Deposition auf die Stoffgehalte erkennbar ist.

Ausreißer in Gruppen von Punkten (vgl. rote Markierung in Abbildung 7) oder Veränderungen von gerichteten Entwicklungen (z.B. der beschriebene „Knick“ in Abbildung 50) weisen also immer auf geänderte oder besondere Umstände hin. Ob diese durch pedogene Prozesse, anthropogene Ursachen, Datenfehler oder sonstige Ursachen hervorgerufen werden, sollte dann im Einzelfall geprüft werden.

Das Beispiel zeigt, dass in den Ergebnissen der Auswertung eine größere Menge (als die hier im Bericht beschrieben) Informationen enthalten ist. Für jeden einzelnen Standort sind Auswertungen hinsichtlich der erreichten Ergebnisse möglich. Die Identifikation der bundesweiten Trends ist somit nur ein Schritt der möglichen Anwendung. Weiterhin kann eine Betrachtung eines jeden einzelnen Standortes, die systematische Untersuchung aller auffälligen Daten oder die Auswahl von Daten zur weiteren fragestellungsbezogenen Auswertung durchgeführt werden.

Tabelle 21: Profilbeschreibung und Analysenergebnisse der in Abbildung 50 dargestellten Standorte

| S* | Ausgangsgestein       | ID | Cd<br>[mg/kg] | Cr<br>[mg/kg] | Cu<br>[mg/kg] | Ni<br>[mg/kg] | Pb<br>[mg/kg] | Zn<br>[mg/kg] | pH  | Nges<br>[M-%] | TOC<br>[M-%] | Horizont | OK*<br>[cm] | UK*<br>[cm] |
|----|-----------------------|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|---------------|--------------|----------|-------------|-------------|
| A  | Sande                 | 1  | 0,84          | 16,5          | 33,5          | 10,2          | 192           | 161           | 3,3 | 1,81          | 40,9         | L-Of     | -2          | -1          |
|    |                       | 2  | 0,62          | 28,9          | 54,8          | 15,7          | 357           | 148           | 2,9 | 1,04          | 23,6         | Oh       | -1          | 0           |
|    |                       | 3  | 0,25          | 13,9          | 31,5          | 6,19          | 181           | 77,2          | 2,9 | 0,50          | 12,0         | Ap-Aeh   | 0           | 2           |
|    |                       | 4  | 0,12          | 12,4          | 15,8          | 4,49          | 89,8          | 46,3          | 2,9 | 0,26          | 5,94         | Ap-Aeh   | 2           | 5           |
|    |                       | 5  | 0,06          | 11,6          | 7,18          | 3,07          | 44,2          | 27,8          | 3,0 | 0,14          | 3,06         | Ap-Aeh   | 5           | 10          |
|    |                       | 6  | 0,06          | 9,3           | 2,27          | 1,50          | 7,57          | 16,4          | 3,5 | 0,059         | 1,03         | Ap-Bhs   | 10          | 30          |
|    |                       | 7  | 0,07          | 10,3          | 1,08          | 4,49          | 45,2          | 21,9          | 4,0 | 0,032         | 0,48         | Sw-Bhv   | 30          | 60          |
|    |                       | 8  | 0,07          | 15,3          | 1,45          | 8,68          | 27,2          | 20,7          | 3,9 | 0,013         | 0,16         | Sw       | 60          | 90          |
| B  | Tongesteine           | 1  | 1,57          | 18,5          | 23,0          | 8,45          | 238           | 145           | 4,3 | 1,55          | 36,6         | L-Of     | -8          | -2          |
|    |                       | 2  | 1,01          | 28,5          | 51,4          | 26,9          | 751           | 136           | 3,5 | 1,47          | 29,5         | Oh       | -2          | 0           |
|    |                       | 3  | 0,52          | 23,1          | 22,8          | 11,8          | 306           | 79,2          | 3,6 | 0,78          | 14,4         | Sw-Ahe   | 0           | 2           |
|    |                       | 4  | 0,27          | 21,3          | 14,2          | 7,73          | 192           | 54,7          | 3,5 | 0,42          | 8,11         | Sw-Ahe   | 2           | 5           |
|    |                       | 5  | 0,25          | 20,2          | 11,0          | 7,67          | 127           | 53,4          | 3,6 | 0,28          | 5,67         | Bhs-Swd  | 5           | 10          |
|    |                       | 6  | 0,09          | 21,4          | 9,65          | 8,80          | 36,1          | 51,2          | 3,9 | 0,087         | 1,26         | Bhv-Sw   | 10          | 30          |
|    |                       | 7  | 0,09          | 29,0          | 20,7          | 13,1          | 32,0          | 57,3          | 3,9 | 0,075         | 0,51         | Sw       | 30          | 60          |
|    |                       | 8  | 0,13          | 28,9          | 30,6          | 14,7          | 36,8          | 67,9          | 3,9 | 0,081         | 0,25         | Cv-Sd    | 60          | 90          |
| C  | Carbonat-<br>gesteine | 1  | 0,34          | 4,60          | 13,0          | 5,40          | 21,4          | 81,6          | 5,5 | 1,71          | 43,5         | L        | -3          | -1          |
|    |                       | 2  | 0,52          | 14,4          | 19,2          | 13,8          | 48,4          | 112           | 4,9 | 2,21          | 38,7         | Of       | -1          | 0           |
|    |                       | 3  | 0,82          | 61            | 23,8          | 52,8          | 97,8          | 156           | 6,0 | 0,70          | 10,5         | Ah       | 0           | 5           |
|    |                       | 4  | 0,02          | 51            | 18,6          | 48,2          | 41,6          | 66,6          | 7,4 | 0,18          | 6,22         | rAcp     | 5           | 20          |
|    |                       | 5  | 0,01          | 51,4          | 19,8          | 51,2          | 37,2          | 68,0          | 7,4 | 0,11          | 4,98         | elCv+Tc  | 20          | 30          |

\* S=Standort, OK = Oberkante, UK = Unterkante

### Anlage 3 Statistische Kennwerte

Tabelle 22: Statistische Kennwerte der untersuchten Parameter – Datenbestand der Auswertung von ausschließlich anorganischen Parametern (Kap. 5.2.1)

|                                  | min. | Quantile |      |      |      |      |      |      |      |      | max. |
|----------------------------------|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                  |      | 10 %     | 20 % | 25 % | 40 % | 50 % | 60 % | 75 % | 80 % | 90 % |      |
| <b>Cd [mg/kg]</b>                | n.n  | n.n      | n.n  | 0,01 | 0,08 | 0,11 | 0,20 | 0,36 | 0,48 | 0,86 | 103  |
| <b>Cr [mg/kg]</b>                | n.n  | 4,24     | 8,39 | 10,6 | 17,9 | 24,0 | 30,8 | 45,0 | 50,0 | 67,0 | 361  |
| <b>Cu [mg/kg]</b>                | n.n  | 2,01     | 4,34 | 5,73 | 9,30 | 11,4 | 14,5 | 20,5 | 24,0 | 38,2 | 914  |
| <b>Ni [mg/kg]</b>                | n.n  | 2,90     | 5,6  | 7,20 | 11,9 | 16,0 | 20,2 | 30,0 | 33,0 | 45,4 | 545  |
| <b>Pb [mg/kg]</b>                | n.n  | 3,02     | 8,82 | 10,7 | 16,9 | 21,6 | 27,1 | 41,5 | 51,0 | 92,6 | 7985 |
| <b>Zn [mg/kg]</b>                | n.n  | 12,8     | 23,1 | 28,0 | 42,9 | 52,0 | 60,8 | 79,5 | 89,0 | 129  | 5905 |
| <b>TOC [Masse-%]</b>             | n.n  | 0,12     | 0,30 | 0,38 | 0,80 | 1,21 | 1,79 | 4,29 | 6,50 | 27,8 | 81,8 |
| <b>N<sub>ges</sub> [Masse-%]</b> | n.n  | 0,02     | 0,04 | 0,05 | 0,09 | 0,12 | 0,17 | 0,33 | 0,49 | 1,34 | 26,6 |
| <b>pH</b>                        | 1,9  | 3,5      | 3,99 | 4,19 | 4,83 | 5,31 | 5,90 | 6,60 | 6,88 | 7,30 | 8,20 |

n.n. = nicht nachgewiesen

Tabelle 23: Statistische Kennwerte der untersuchten Parameter – Datenbestand der Auswertung von anorganischen und organischen Parametern (Kap. 5.3.1)

|                                  | min.  | Quantile |       |       |       |       |       |       |       |      | max. |
|----------------------------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|                                  |       | 10 %     | 20 %  | 25 %  | 40 %  | 50 %  | 60 %  | 75 %  | 80 %  | 90 % |      |
| <b>B(a)p</b> [mg/kg]             | n.n.  | n.n.     | 0,005 | 0,007 | 0,011 | 0,017 | 0,028 | 0,060 | 0,077 | 0,19 | 3,27 |
| <b>B(b)fluor</b> [mg/kg]         | n.n.  | 0,005    | 0,011 | 0,015 | 0,026 | 0,038 | 0,063 | 0,15  | 0,21  | 0,43 | 4,60 |
| <b>B(ghi)per</b> [mg/kg]         | n.n.  | 0,003    | 0,007 | 0,009 | 0,015 | 0,020 | 0,032 | 0,077 | 0,094 | 0,22 | 1,90 |
| <b>B(k)fluor</b> [mg/kg]         | n.n.  | n.n.     | 0,004 | 0,006 | 0,010 | 0,014 | 0,024 | 0,051 | 0,071 | 0,15 | 1,77 |
| <b>Fluoranthen</b> [mg/kg]       | n.n.  | n.n.     | 0,008 | 0,011 | 0,024 | 0,038 | 0,063 | 0,14  | 0,20  | 0,49 | 7,65 |
| <b>Hexachlorb.</b> [mg/kg]       | n.n.  | n.n.     | n.n.  | 0,20  | 1,00  | 1,00  | 2,00  | 4,00  | 5,00  | 10   | 124  |
| <b>PCB 101</b> [µg/kg]           | n.n.  | n.n.     | n.n.  | n.n.  | 0,25  | 1,00  | 1,00  | 2,00  | 2,12  | 4,38 | 257  |
| <b>PCB 138</b> [µg/kg]           | n.n.  | n.n.     | n.n.  | n.n.  | 1,00  | 1,00  | 2,00  | 5,00  | 7,00  | 13,1 | 480  |
| <b>PCB 153</b> [µg/kg]           | n.n.  | n.n.     | n.n.  | n.n.  | 1,00  | 1,00  | 2,00  | 5,00  | 7,00  | 13,3 | 489  |
| <b>PCB 180</b> [µg/kg]           | n.n.  | n.n.     | n.n.  | n.n.  | 0,25  | 1,00  | 1,00  | 2,00  | 3,00  | 6,39 | 310  |
| <b>Cd</b> [mg/kg]                | n.n.  | 0,025    | 0,07  | 0,10  | 0,17  | 0,23  | 0,30  | 0,45  | 0,50  | 0,67 | 14,3 |
| <b>Cr</b> [mg/kg]                | 0,15  | 5,37     | 8,21  | 10,2  | 14,5  | 19,5  | 25,1  | 38,0  | 46,4  | 68,7 | 361  |
| <b>Cu</b> [mg/kg]                | 0,45  | 4,88     | 7,99  | 8,87  | 12,2  | 14,6  | 17,4  | 23,8  | 28,2  | 42,7 | 408  |
| <b>Ni</b> [mg/kg]                | 0,27  | 3,20     | 5,68  | 6,9   | 11,1  | 15,7  | 20,2  | 31,3  | 34,5  | 55,2 | 239  |
| <b>Pb</b> [mg/kg]                | n.n.  | 11,1     | 15,3  | 17,1  | 22,6  | 30,5  | 38,9  | 57,0  | 66,3  | 98,9 | 3363 |
| <b>Zn</b> [mg/kg]                | 4,48  | 23,1     | 34,5  | 43,1  | 56,0  | 61,0  | 69,7  | 90,9  | 105   | 153  | 3543 |
| <b>TOC</b> [Masse-%]             | 0,14  | 0,86     | 1,27  | 1,44  | 2,44  | 3,22  | 4,90  | 10,5  | 24,0  | 38,9 | 57,0 |
| <b>N<sub>ges</sub></b> [Masse-%] | 0,010 | 0,090    | 0,12  | 0,14  | 0,20  | 0,28  | 0,36  | 0,81  | 1,28  | 1,73 | 2,87 |
| <b>pH</b>                        | 2,60  | 3,32     | 3,80  | 3,96  | 4,54  | 4,9   | 5,35  | 6,2   | 6,35  | 7,07 | 7,73 |

n.n. = nicht nachgewiesen

Tabelle 24: Tiefen- und flächenspezifische Mediane des Datenbestandes für die Analyse mit Isomap (Kap. 6)  
 nur Parameter mit weniger als 25 % nicht nachgewiesener Werte (verändert nach Schilli et al. 2010)

| Fläche   | Tiefe<br>[cm] | pH<br>CaCl <sub>2</sub> | Al<br>[mg/l] | Ba<br>[mg/l] | Ca<br>[mg/l] | K<br>[mg/l] | Mg<br>[mg/l] | Mn<br>[mg/l] | Na<br>[mg/l] | Si<br>[mg/l] | Cl<br>[mg/l] | NO <sub>3</sub><br>[mg/l] | SO <sub>4</sub><br>[mg/l] | DOC<br>[mg/l] |
|----------|---------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| <b>C</b> | 20            | 3,63                    | 3,10         | 0,04         | 2,53         | 1,52        | 0,47         | 0,09         | 1,62         | 5,97         | 1,99         | 18,9                      | 15,0                      | 24,5          |
|          | 35            | 3,88                    | 5,43         | 0,05         | 2,60         | 1,12        | 0,58         | 0,11         | 1,79         | 7,45         | 2,25         | 21,6                      | 19,9                      | 19,5          |
|          | 90            | 4,13                    | 5,55         | 0,05         | 1,96         | 1,13        | 0,48         | 0,15         | 1,89         | 5,45         | 2,11         | 19,3                      | 23,3                      | 4,8           |
| <b>K</b> | 50            | 4,93                    | 0,39         | n.n.         | 0,70         | 0,48        | 0,11         | n.n.         | 3,36         | 7,73         | 3,05         | n.n.                      | 1,4                       | 14,7          |
|          | 100           | 5,25                    | 0,16         | n.n.         | 1,05         | 0,49        | 0,27         | n.n.         | 3,82         | 8,19         | 2,34         | n.n.                      | 2,2                       | 6,7           |
| <b>G</b> | 50            | 4,25                    | 5,26         | 0,02         | 0,47         | 0,98        | 0,32         | 0,05         | 1,61         | 6,03         | 1,93         | 1,9                       | 29,2                      | 6,1           |
|          | 100           | 4,22                    | 6,44         | 0,02         | 0,55         | 1,58        | 0,31         | 0,15         | 1,55         | 3,93         | 2,68         | 6,5                       | 32,3                      | 4,5           |
|          | 150           | 4,28                    | 5,00         | 0,03         | 0,37         | 1,10        | 0,21         | 0,12         | 1,65         | 2,96         | 1,68         | 2,6                       | 28,7                      | 2,4           |
|          | 200           | 4,22                    | 5,02         | 0,04         | 0,57         | 1,01        | 0,34         | 0,11         | 1,93         | 4,32         | 1,87         | 1,6                       | 30,3                      | 4,6           |
| <b>W</b> | 50            | 4,13                    | 10,27        | 0,14         | 1,15         | 3,82        | 0,53         | 0,24         | 1,12         | 4,73         | 2,08         | 60,9                      | 14,8                      | 4,8           |
|          | 100           | 4,12                    | 9,66         | 0,08         | 1,26         | 1,78        | 0,54         | 0,34         | 1,51         | 3,47         | 2,41         | 52,8                      | 16,8                      | 3,5           |
|          | 150           | 4,05                    | 11,08        | 0,06         | 0,99         | 1,41        | 0,47         | 0,24         | 1,36         | 3,41         | 2,88         | 53,3                      | 20,0                      | 3,5           |
|          | 200           | 4,07                    | 9,95         | 0,06         | 0,97         | 1,57        | 0,42         | 0,20         | 1,44         | 2,55         | 3,29         | 49,3                      | 18,9                      | 5,9           |

C = Coulissenhieb, K = Köhlerloh, G = Gemös, W = Weidenbrunnen, n.n. = nicht nachgewiesen