

# KABO AG

Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau

**Fachbericht**  
Ergebnisse der zweiten Hauptuntersuchung (1996/97)  
Veränderung der Bodenbelastung nach fünf Jahren

Dezember 2001

# **KABO AG**

Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau

Fachbericht:

Ergebnisse der zweiten Hauptuntersuchung (1996/97)  
Veränderung der Bodenbelastung nach fünf Jahren

Dezember 2001

## Impressum

Herausgeber/Auftraggeber	Baudepartement des Kantons Aargau Abteilung Umweltschutz Entfelderstrasse 22 5001 Aarau
Projektleitung	Thomas Muntwyler Abteilung Umweltschutz
Auswertung und Bericht	Basler & Hofmann Dr. Hans Pfister  AgroLab AG Mijo Jozic
Statistische Beratung	Institut für terrestrische Ökologie, ITÖ, ETH Zürich Dr. Armin Keller
Analytik	AgroLab AG, Root
Beprobung	Landwirtschaftsstandorte: Terre AG, Eggliswil Waldstandorte: AgroLab AG, Root
Bezugsquelle	Baudepartement des Kantons Aargau Abteilung Umweltschutz Entfelderstrasse 22 5001 Aarau  Tel.: 062 835 33 60 Fax: 062 835 33 69 e-mail: <a href="mailto:umwelt.aargau@ag.ch">umwelt.aargau@ag.ch</a>
Foto Titelbild	Urs Mühlethaler

20. Dezember 2001, B3096.00, HP/AEC/BGR/MJ

AgroLab AG  
Labor für Landwirtschaft und Umwelt  
Oberfeld 3  
6037 Root  
Tel. 041 450 26 57, Fax 041 450 26 66

Basler & Hofmann  
Ingenieure und Planer AG, Mitglied SIA/USIC  
Zürich: Forchstrasse 395  
CH-8029 Zürich  
Tel. 01 387 11 22, Fax 01 387 11 00

Aarau: Laurenzenvorstadt 19  
5001 Aarau



<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>Zusammenfassung</b>	
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Aufbau des KABO</b>	<b>6</b>
2.1    Gesetzliche Grundlagen	6
2.2    Voruntersuchung	7
2.3    Handbuch KABO AG	7
2.4    Erste Hauptuntersuchung	7
2.5    Zweite Hauptuntersuchung	7
<b>3. Beprobung und Analytik</b>	<b>9</b>
3.1    Beprobung	9
3.1.1    Vorgehen	9
3.1.2    Landwirtschaftsstandorte	9
3.1.3    Waldstandorte	12
3.2    Analytik	12
3.2.1    Analysenmethoden	12
3.2.2    Landwirtschaftsstandorte	12
3.2.3    Waldstandorte	13
<b>4. Qualität der Messresultate</b>	<b>14</b>
4.1    Ursachen von Messungenauigkeiten	14
4.2    Qualität der KABO-Messwerte	15
4.2.1    Parallelanalytik	15
4.2.2    Wiederholungsmessungen 1999	16
4.2.3    Vergleich der Wiederholungsmessungen 1999 mit NABO-Ringversuchen	17
4.2.4    Kleinräumige Variabilität der Totalgehalte	18
4.2.5    Streuungen der löslichen Schadstoffgehalte	19
<b>5. Ergebnisse der zweiten Hauptuntersuchung</b>	<b>20</b>
5.1    Schadstoffgehalte der Flächenproben 0 - 20 cm	20
5.1.1    Beurteilungskriterien	20
5.1.2    Messwerte 0 - 20 cm	21
5.1.3    Richtwertüberschreitungen	21
5.2    Stoffgehalte, nach Standortgruppen differenziert	23
5.2.1    Charakterisierung der Standortgruppen	23
5.2.2    Schadstoffgehalte der Standortgruppen	25
5.2.2.1    Übersicht über Schadstoffgehalte und Bodenkenwerte	25
5.2.2.2    Vergleich der Totalgehalte mit schweizerischen Medianwerten	25



5.2.2.3	Vergleich der löslichen Gehalte mit schweizerischen Medianwerten	26
5.3	Verteilung der Totalgehalte verschiedener Bodenschichten	28
5.3.1	Flächenproben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm der Waldstandorte	28
5.3.2	Profilproben	29
5.4	Überblick über Schadstoffquellen und Belastungsmuster	30
5.5	Gefährdungspotenziale bei den sauren Waldböden	31
5.5.1	Ursachen und Auswirkungen der anthropogenen Bodenversauerung	31
5.5.2	Beurteilung des Gefährdungspotenzials der Schwermetallverlagerung und -verfügbarkeit	32
5.5.3	Gefährdungspotenzial der Aluminium-Toxizität	34
5.5.4	Weitere Gefährdungspotenziale	34
<b>6.</b>	<b>Veränderungen der Messwerte nach fünf Jahren</b>	<b>35</b>
6.1	Übersicht über die Veränderungen	35
6.2	Veränderungen der Anzahl Richtwertüberschreitungen	36
6.3	Veränderungen der Totalgehalte	38
6.3.1	Beurteilungskriterien	38
6.3.2	Beurteilung der Veränderungen	39
6.4	Veränderungen der Bodenkennwerte und löslichen Gehalte	42
<b>7.</b>	<b>Standortspezifische Ursachen von Gehaltsveränderungen</b>	<b>44</b>
7.1	Landwirtschaftsstandorte	44
7.1.1	Überblick	44
7.1.2	Standortgruppe La 1	45
7.1.3	Standortgruppe La 2	46
7.1.4	Standortgruppe La 3	47
7.2	Waldstandorte	47
7.2.1	Standortgruppe Wa 1	47
7.2.2	Standortgruppe Wa 2	48
7.2.3	Wald-Spezialstandort	52
<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>52</b>
8.1	Überblick über Höhe, Veränderungen und Ursachen der Belastungen	52
8.2	Landwirtschaft	53
8.3	Waldstandorte im Jura	53
8.4	Waldstandorte im Mittelland	53
<b>9.</b>	<b>Empfehlungen für das Weiterführen des KABO</b>	<b>55</b>
<b>10.</b>	<b>Literatur</b>	<b>57</b>
	<b>Anhang</b>	

## Zusammenfassung

### Einleitung, Methodik und Vorgehen

Ziel des Bodenschutzes

Durch vorsorgenden Bodenschutz soll die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhalten werden. Nur gesunde, fruchtbare Böden können ihre Funktionen als Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen, als Lebensraum für Bodenlebewesen, als Grundlage für die Nahrungsmittelproduktion sowie als Filter für Schadstoffe erfüllen.

Rechtliche Grundlagen

Bund und Kantone sind nach dem Umweltschutzgesetz (USG 1983, Art. 44) verpflichtet, Erhebungen über Umweltbelastungen durchzuführen. Im Kanton Aargau sieht das Umweltschutzdekret (USD, 1998) Massnahmen zur allgemeinen Beurteilung des Zustandes der Böden und zur Erkennung von Veränderungen der Bodenbelastungen vor.

KABO AG

Das bereits seit mehr als zehn Jahren bestehende Kantonale Bodenbeobachtungsnetz (KABO AG) gibt mit periodischen Zustandserhebungen Auskunft über Höhe und Veränderungen der Schadstoffbelastung der Aargauer Böden. Im Vordergrund steht zur Zeit der chemisch-stoffliche Bodenschutz.

1991/92 wurden in der ersten Hauptuntersuchung 76 Standorte, davon 53 Wald- und 23 Landwirtschaftsstandorte, beprobt und analysiert. Die Ergebnisse sind im Bericht KABO AG 1994 dargestellt. 1996/97 wurde die zweite Hauptuntersuchung vorgenommen. Dabei wurden Flächenproben von 38 ausgewählten Standorten (22 Landwirtschafts- und 16 Waldstandorte) sowie Profilproben von drei Waldstandorten analysiert. Das Ziel der zweiten Hauptuntersuchung besteht darin:

- den Belastungszustand der Aargauer Böden 1996/97 zu erfassen, systematisch auszuwerten und mit Referenzwerten zu vergleichen,
- Veränderungen seit 1991/92 festzustellen, zu beurteilen, Folgerungen daraus zu ziehen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen abzugeben,
- das Vorgehen, die Methodik und die Messwerte in einem Fachbericht als Grundlage für künftige Untersuchungen zu dokumentieren.

Qualitätssicherungs-  
massnahmen

Um Messungenauigkeiten bei der Analytik weitgehend auszuschliessen, wird beim KABO AG das Konzept der Parallelanalytik angewendet: Bei der zweiten Hauptuntersuchung werden gleichzeitig mit den Proben von 1996/97 auch die archivierten Proben der ersten Hauptuntersuchung von 1991/92 analysiert. Zur Quantifizierung möglicher Fehler wurden Wiederholungsmessungen von archivierten Proben dreier Standorte durchgeführt und statistisch ausgewertet. Um die Reproduzierbarkeit der KABO-Untersuchungen zu gewährleisten, sind im Handbuch „Qualitativer Bodenschutz im Kanton Aargau“ alle Methoden und Arbeitsvorgänge detailliert beschrieben.



## Belastungen, Veränderungen, Massnahmen

Beurteilung der Belastungssituation	17 der 38 analysierten Standorte zeigen Richtwertüberschreitungen an. Im Vergleich zur ersten Hauptuntersuchung wurden sie mehrheitlich bestätigt. Das heisst, die Fruchtbarkeit der Böden ist an diesen Standorten langfristig nach wie vor nicht gewährleistet. Daher muss der vorsorgende Schutz der Böden vor Schadstoffen weitergeführt werden. Prüf- oder Sanierungswerte gemäss Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) wurden an keinem Standort überschritten. Eine Gefährdung von Menschen, Tieren und Pflanzen kann ausgeschlossen werden.
Veränderungen nach fünf Jahren	Bei 15 der untersuchten KABO-Standorte wurden nach fünf Jahren signifikante und relevante Veränderungen der Schadstoff-Totalgehalte festgestellt. Sechs Veränderungen betreffen Landwirtschafts- und neun Waldstandorte. Bei den Landwirtschaftsstandorten sind mehrheitlich Abnahmen der Schadstoffgehalte und bei den Waldstandorten hauptsächlich Zunahmen zu verzeichnen.
Vielfalt von Standort- und Nutzungsbedingungen	Die KABO-Standorte repräsentieren eine Vielfalt von Standort- und Nutzungsbedingungen, die sich in unterschiedlichsten Belastungsarten, -höhen, und –ursachen widerspiegeln. Deshalb wurden auffällige Standorte individuell und vor dem Hintergrund ihrer Standort- und Nutzungsgeschichte beurteilt. Mit der Einteilung der KABO-Standorte in fünf Standortgruppen lassen sich jedoch auch Gesetzmässigkeiten bezüglich Belastungssituationen feststellen.
Gesamtschweizerischer Vergleich	<p><b>Landwirtschaftsstandorte</b></p> <p>Bei den Juraböden liegen die Blei-, Cadmium- und Zink-Totalgehalte über den gesamtschweizerischen Vergleichswerten für Ackerland (um Faktoren 1.3 – 2.0). Diese Anreicherungen sind geogen bedingt. Bei den Mittellandstandorten auf Moränen, Molassen und Schottern sind die Totalgehalte der drei Schwermetalle mit schweizerischen Durchschnittswerten vergleichbar beziehungsweise liegen leicht darunter (um Faktoren 0.7 – 1.0). Mittellandstandorte auf Flussablagerungen, d.h. Alluvionen, weisen Gehalte auf, die über schweizerischen Durchschnittswerten liegen (Faktoren 1.3 – 1.5). Diese Anreicherungen dürften hauptsächlich auf den Einsatz von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen zurückzuführen sein. Die löslichen Schadstoffgehalte sind bei keinem Landwirtschaftsstandort auffällig.</p>
Richtwertüberschreitungen	Drei der fünf Richtwertüberschreitungen bei den Totalgehalten dürften auf direkte Einträge von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen und zwei auf geogene Ursachen zurückzuführen sein. Bei den löslichen Gehalten wurden keine Richtwertüberschreitungen festgestellt.
Veränderungen nach fünf Jahren	Die Mehrheit der Standorte weist nach fünf Jahren keine signifikante und relevante Veränderungen der Totalgehalte auf. Bei einigen Standorten wurden Abnahmen, vorwiegend bei den Elementen Cadmium und Kupfer, festgestellt. Einzig bei zwei Standorten wurde je eine signifikante und relevante Zunahme bei Zink beziehungsweise bei Kupfer festgestellt.



Beurteilung der Schadstoffsituation	<p>Mit Ausnahme der beiden erwähnten Standorte hat sich die Schadstoffsituation im Bereich der Landwirtschaft stabilisiert bis leicht verbessert. Es wäre wohl noch zu früh, diese Entwicklung als Folge integrierter Anbausysteme beziehungsweise des ökologischen Leistungsnachweises zu deuten. Die dritte Hauptuntersuchung, die unter anderem als Wirkungskontrolle für den ökologischen Leistungsnachweis eingesetzt werden soll, wird zeigen, ob die positive Tendenz anhält.</p>
Gesamtschweizerischer Vergleich	<p><b>Waldstandorte im Jura</b></p> <p>Die Belastung der Jura-Waldböden liegt bei den Totalgehalten der Elemente Blei, Cadmium und Zink über den gesamtschweizerischen Wald-Vergleichswerten (Faktoren 1.6 - 3.7). Diese Belastung ist vorwiegend auf das natürliche Ausgangsmaterial zurückzuführen. Die löslichen Gehalte sind nicht auffällig.</p>
Richtwert-Überschreitungen	<p>Drei der vier Standorte weisen Totalgehalten auf, die über den Richtwerten liegen. Es werden keine Richtwerte für lösliche Gehalte überschritten.</p>
Veränderungen	<p>Zwei Standorte weisen signifikante und relevante Zu- und Abnahmen auf, deren Ursachen nicht geklärt werden konnten.</p>
Überwachung der pH-Werte und des Kalkgehaltes	<p>In den nächsten Hauptuntersuchungen sind besonders den pH-Werten und dem Kalkgehalt hohe Beachtung zu schenken. Durch den anthropogenen Eintrag von Säuren und Säurebildnern wird die natürliche Kalkauflösung und Bodenversauerung beschleunigt. Damit besteht die Gefahr, dass die geogen erhöhten Schadstoffe dieser Standorte in Lösung gehen und ins Grundwasser verlagert werden.</p>
Gesamtschweizerischer Vergleich	<p><b>Waldstandorte im Mittelland</b></p> <p>Bei den Mittellandstandorten auf Moränen, Molassen und Schottern liegen die Schwermetall-Totalgehalten der drei Elemente Blei, Cadmium und Zink im Bereich beziehungsweise leicht unterhalb der schweizerischen Durchschnittswerte (Faktoren 0.7 - 1.1). Im Gegensatz zu den Totalgehalten sind die löslichen Gehalte von Cadmium, Zink und Nickel deutlich erhöht (Faktoren 1.4 - 5.4). Diese hohen löslichen Gehalte sind auf saure Bodenbedingungen, die eine vermehrte Löslichkeit und Mobilität verursachen, zurückzuführen.</p>
VBo-Richtwertüberschreitungen	<p>Neun der elf Standorte weisen Richtwertüberschreitungen bei den löslichen Gehalten auf. Zwei dieser Standorte zeigen zusätzliche Richtwert-Überschreitungen von Blei-Totalgehalten, die wahrscheinlich auf zivilisationsbedingte Einträge über die Luft zurückzuführen sind.</p>
Veränderungen	<p>Die Blei-Totalgehalten nahmen bei fünf der elf Standorte signifikant und relevant zu. Dabei handelt es sich vorwiegend um Standorte in den Agglomerationsbereichen Lenzburg, Oftringen, Suhr, Möriken/Wildegg/Niederlenz, die in der Nähe von Schadstoffemittenten gelegen sind.</p>



**Gefährdungspotenzial**

Bedingt durch die sauren Bodenverhältnisse können Schadstoffe in Lösung gehen und in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser verlagert werden. Als besonders kritisch sind diejenigen Standorte einzustufen, die zusätzlichen anthropogenen Belastungen ausgesetzt sind.

Bedingt durch die tiefen pH-Werte ist die Bodenfruchtbarkeit der Standorte langfristig nicht gewährleistet, und einige Bodenfunktionen dürften beeinträchtigt sein. Dies gilt zum Beispiel für die Funktion als Lebensraum für Bodenlebewesen, als Pflanzenstandort (eingeschränkte Verankerung der Bäume) und als Filter für Schadstoffe.

**Massnahmen**

Die Bodenversauerung, die an sich ein natürlicher Prozess ist, wird durch den atmosphärischen, zivilisationsbedingten Eintrag von Säuren und Säurebildnern beschleunigt. Mit der konsequenten Umsetzung der Luftreinhalteverordnung, insbesondere mit dem Einhalten der Stickstoffdioxid-Immissions-Grenzwerte, kann ein Beitrag gegen weitere Bodenversauerung geleistet werden. Aus waldbaulicher Sicht wäre abzuklären, wie stark sich die Artenzusammensetzung eines Baumbestandes auf die Bodenversauerung auswirkt. In Agglomerationsgebieten, wo erhöhte Schadstoffbelastungen festgestellt wurden, ist die Bodenbelastung flächenhaft zu erfassen und die zeitliche Veränderung zu verfolgen.

**Koordination mit weiteren Untersuchungen**

Zur Zeit sind diverse Forschungsarbeiten der Thematik der sauren Waldböden und möglichen Massnahmen gegen die weitere Versauerung gewidmet. Basierend auf den Ergebnissen dieser Projekte sind – in Koordination mit der Abteilung Wald des Finanzdepartementes des Kantons Aargau, der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) sowie mit weiteren Institutionen – Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen zu ziehen.

**Ausblick auf die dritte Hauptuntersuchung**

Die Resultate der ersten Hauptuntersuchung wurden durch die Resultate der zweiten Hauptuntersuchung im Wesentlichen bestätigt. Die zweite Hauptuntersuchung zeigte aber auch, dass die Bodenfruchtbarkeit einiger Flächen langfristig nicht gewährleistet ist und die Funktionen verschiedener Böden gefährdet sind. Im Sinne einer Frühwarnung wurde auf mögliche Verschlechterungen der Situation in der Zukunft hingewiesen. Die dritte Hauptuntersuchung wird zeigen, ob sich die vermuteten Entwicklungstendenzen bestätigen. Sie wird zudem weiterhin als Kontrollinstrument eingesetzt werden, um die Wirkung von Massnahmen zum Schutz des Bodens feststellen und beurteilen zu können.

## 1. Einleitung

Funktionen des Bodens	<p>Das Umweltschutzgesetz definiert den Boden als die oberste, unversiegelte Erdschicht, in der Pflanzen wachsen können. Der Boden ist einerseits Lebensraum für Bodenlebewesen und andererseits eine zentrale Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen. Er filtert und puffert Schad- und Schmutzstoffe, die sowohl über die Luft als auch direkt, vor allem durch landwirtschaftliche Aktivitäten eingetragen werden, regelt die natürlichen Kreisläufe von Wasser, Luft sowie organischen und mineralischen Stoffen. Für die Land- und Forstwirtschaft bildet er die Grundlage zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln sowie von erneuerbaren Rohstoffen.</p>
Ziel des Bodenschutzes	<p>Alle diese Funktionen können nur dann erfüllt werden, wenn der Boden gesund und fruchtbar ist. Ziel des vorsorglichen Bodenschutzes ist es, die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu erhalten.</p>
Gefährdungen des Bodens	<p>Mit intensiven und vielfältigen Aktivitäten greift der Mensch in die ökologischen Stoffkreisläufe ein. Schadstoffe werden durch Verkehr, Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft in Zirkulation gebracht und gelangen in den Boden. Die gegenüber der Luft, den Gewässern und den Pflanzen wesentlich höhere Verweildauer von nicht abbaubaren Schadstoffen im Boden führt zu langfristigen Anreicherungen, welche die Bodenfruchtbarkeit gefährden. Mit dem Eintrag von Säuren und Säurebildnern über die Luft wird zudem der natürliche Prozess der Bodenversauerung beschleunigt. Dadurch gehen Schadstoffe vermehrt in lösliche Formen über und können durch Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln aufgenommen oder in tiefere Bodenschichten verlagert werden. Auf diesem Weg gelangen Schadstoffe in die Nahrungskette und ins Grundwasser und sind in der Lage, die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen zu beeinträchtigen.</p>
Massnahmen zum Schutz des Bodens	<p>Durch politische und rechtliche Massnahmen auf eidgenössischer und kantonaler Ebene wird der Schadstoffeintrag in die Böden reduziert. Schadstoffeinträge sollen möglichst schon an der Quelle gestoppt werden. Hier greifen beispielsweise die Stoffverordnung (1986), die Technische Verordnung über Abfälle (1990), die Luftreinhalteverordnung (1985) und agrarpolitische Massnahmen wie ökologischer Leistungsnachweis, Förderung der integrierten Produktion und des biologischen Landbaus.</p> <p>Zur Beurteilung des Erfolgs solcher Massnahmen sowie als Grundlage zur Früherkennung von Umweltrisiken durch Schadstoffeinflüsse wird die Schadstoffbelastung der Böden durch Bund (NABO, Nationales Bodenbeobachtungsnetz) und Kantone langfristig beobachtet.</p>
KABO AG	<p>Das vor mehr als zehn Jahren aufgebaute Messnetz des Kantons Aargau (KABO) gibt durch periodische Zustandserhebungen auf Dauerbeobachtungsflächen Auskunft über Höhe und Veränderung der Schadstoffbelastung der Aargauer Böden.</p>



Die Dauerbeobachtungsflächen dienen somit als Referenzstandorte für die Beurteilung der flächenhaften Schadstoffbelastung der Böden im Kanton Aargau. Das KABO kann auch im Sinne eines Frühwarnsystems weitere kantonale Massnahmen zum Schutze des Bodens und der ganzen Umwelt auslösen.

Während im ersten KABO-Bericht von 1994 die Schadstoffsituation und die räumliche Verbreitung der Schadstoffgehalte dargestellt wurden, stehen im zweiten Fachbericht die Entwicklungstendenzen im Vordergrund. Dazu werden die Ergebnisse der zweiten Hauptuntersuchung systematisch ausgewertet und beurteilt sowie mit jenen der ersten Hauptuntersuchung verglichen.

Inhalt des KABO

Zur Zeit konzentriert sich das KABO auf den chemisch-stofflichen Bodenschutz. Für die Zukunft ist geplant, auch biologische und physikalische Parameter in die Langzeitbeobachtung zu integrieren.

Der flächenbezogene, quantitative Schutz des Bodens ist nicht Bestandteil des KABO. Dieser wird mit Instrumenten der Raumplanung vollzogen.

Auftrag

Die Abteilung Umweltschutz des Baudepartementes des Kantons Aargau (AUS) beauftragte die Arbeitsgemeinschaft AgroLab / Basler & Hofmann mit der Auswertung des KABO und dem Bericht zur zweiten Hauptuntersuchung. Dr. A. Keller vom Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich wertete die Wiederholungsmessungen 1999 statistisch aus (ITÖ, 2001) und beriet die Arbeitsgemeinschaft im Bereich der Statistik.

## 2. Aufbau des KABO

### 2.1 Gesetzliche Grundlagen

USG  
VBBo  
USD AG

Bund und Kantone sind nach dem Umweltschutzgesetz (USG 1983, Art. 44) verpflichtet, Erhebungen über Umweltbelastungen durchzuführen. Die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo 1998, Art. 3) beauftragt das BUWAL, ein nationales Referenznetz zur Beobachtung des Bodens zu betreiben (NABO). Mit der VBBo Art. 4 und den dazugehörigen Erläuterungen des Bundes (BUWAL, 2001a) werden die Kantone aufgefordert, das NABO durch Untersuchungen auf Flächen mit vermuteter oder erwiesener erhöhter Bodenbelastung zu ergänzen und zu vertiefen. Gestützt auf diese Vorgaben haben verschiedene Kantone ein Beobachtungsnetz aufgebaut. Im Kanton Aargau ist das Bodenbeobachtungsnetz im Umweltschutzdekret (USD, 1998) verankert.

Umweltschutzdekret, §19:

- 1) Der Kanton betreibt ein Messnetz zur Überwachung der Bodenbelastung und führt an ausgewählten Standorten Untersuchungen über die Bodenbelastungen durch. Er erhebt damit in regelmässigen Abständen:
  - a) physikalische, chemische und biologische Eigenschaften des Bodens;
  - b) im Boden enthaltene Schadstoffe.
- 2) Der Kanton sorgt bei Bedarf für weitere Untersuchungen zur Bodenbelastung, z.B. über die Belastung aus der Luft oder die Belastung durch landwirtschaftliche Hilfsstoffe.

## 2.2 Voruntersuchung

Standortauswahl

Als Grundlage für das KABO wurde 1988 eine Voruntersuchung durchgeführt. Diese hatte zum Ziel, geeignete KABO-Standorte festzulegen und eine erste Übersicht über den Belastungszustand zu gewinnen. Kriterien für die Standortauswahl waren der geologische Untergrund, die vorhandenen Bodentypen, die Windlage, die Erreichbarkeit, die Nutzungsart und die Entfernung zu Emissionsquellen. Bei diesen Emissionsquellen handelt es sich um Industrie- und Gewerbeanlagen, Kehr-richtverbrennungsanlagen und Strassen. Mit dem KABO sollen nicht spezifisch extrem belastete Standorte untersucht, sondern vielmehr die allgemeine Belastungssituation aufgezeigt werden. Etwa ein Drittel der 76 KABO-Standorte werden landwirtschaftlich genutzt, ein Drittel sind Waldstandorte, die in der Nähe von Emittenten liegen, und ein Drittel sind emittentenferne Waldstandorte.

## 2.3 Handbuch KABO AG

Reproduzierbarkeit

Vor der Durchführung der ersten Hauptuntersuchung wurde von der AUS das Handbuch „Qualitativer Bodenschutz im Kanton Aargau, Kantonales Bodenbeobachtungsnetz“ verfasst. Dieses 1996/97 leicht überarbeitete Handbuch regelt detailliert die Probennahmen, die Beschriftung, Nummerierung und Verwaltung der Proben sowie die Analytik (KABO AG, 1997). Damit ist die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsmethode gewährleistet.

## 2.4 Erste Hauptuntersuchung

KABO AG 1994

Im Rahmen der ersten Hauptuntersuchung wurden 1991/92 die 76 ausgewählten Standorte (53 Wald- und 23 Landwirtschaftsstandorte) beprobt und analysiert. Die Beprobung erfolgte sowohl flächen- als auch profilbezogen. Alle Proben wurden für Paralleluntersuchungen und zu Vergleichszwecken der nachfolgenden Hauptuntersuchungen archiviert. Sämtliche Daten werden in der Bodendatenbank (BODAT) verwaltet. Die Ergebnisse der ersten Hauptuntersuchung sind im KABO-Bericht von 1994 dokumentiert (KABO AG, 1994).

## 2.5 Zweite Hauptuntersuchung

In der zweiten Hauptuntersuchung wurden 1996/97 75 KABO-Standorte erneut beprobt und von 38 ausgewählten Standorten wurden die Proben analysiert. Die Standorte sind in Abbildung 2 dargestellt und in Kapitel 4 werden Beprobung und Analytik detailliert beschrieben.



Massnahmen zur Qualitätssicherung

Mit der zweiten Hauptuntersuchung sollen erstmals Aussagen über Entwicklungstendenzen bei der Schadstoffbelastung gemacht werden. Um mögliche Fehlerquellen auszuschalten, wurden verschiedene Massnahmen zur Qualitätssicherung getroffen. Nebst der strikten Einhaltung der Vorgaben des KABO AG-Handbuches wurde auch das Konzept der Parallelanalytik umgesetzt (Kapitel 4.2.1), und zur Beurteilung der Qualität der Analysenresultate wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt (Kapitel 4.2.2).

Wiederauffindung der Standorte

Besonders für langjährige Dauerbeobachtungen ist das Wiederauffinden der Beprobungsflächen von entscheidender Bedeutung. Zur Wiederauffindung und zur genauen Lokalisation der Beprobungsflächen wurden diese in der ersten Hauptuntersuchung mit Bussole (spezieller Kompass) und Messband eingemessen. Zur weiteren Präzisionserhöhung wurden die Beprobungsflächen für die zweite und für die künftigen Hauptuntersuchungen zusätzlich vermessungstechnisch aufgenommen. Der Untersuchungsplan (Abbildung 1) berücksichtigt diese ab der zweiten Hauptuntersuchung angepasste Vermessungsgrundlage.

Untersuchungsplan

In Abbildung 1 ist der Untersuchungsplan bezüglich Beprobung und Analytik schematisch dargestellt. Das Ergebnis der ersten Hauptuntersuchung ist die erste Analytik  $A_1$  der Ersterhebung  $P_1$  ( $P_1A_1$ ). Die Veränderungen der Schadstoffgehalte

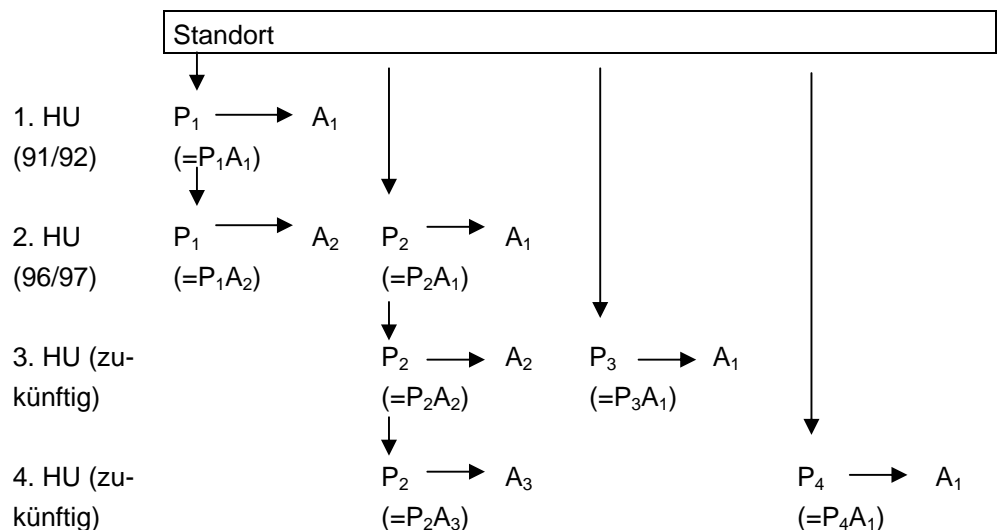


Abbildung 1: Untersuchungsplan des KABO-Netzes bis zur vierten Hauptuntersuchung

Legende: HU: Hauptuntersuchung, P: Probennahme, A: Analytik

nach fünf Jahren werden als Differenz der Messergebnisse  $P_1A_2$  (zweite Analyse der archivierten Proben der Ersterhebung) und  $P_2A_1$  (Analyse der Proben der Zweiterhebung) berechnet und beurteilt. Aufgrund der höheren Präzision bei der Flächenlokalisierung ab der zweiten Hauptuntersuchung (siehe Randnotiz „Wiederauffindung der Standorte“) werden bei den weiteren Hauptuntersuchungen die archivierten  $P_2$ -Proben als Referenzproben herangezogen. Bei der dritten Haupt-

untersuchung werden zum Beispiel die Messergebnisse von  $P_2A_2$  mit jenen von  $P_3A_1$  und bei der vierten Hauptuntersuchung die Ergebnisse von  $P_2A_3$  mit jenen von  $P_4A_1$  verglichen.

Vorgehen zweite Hauptuntersuchung

Zur weitgehenden Ausschaltung von zeitbedingten analytischen Messungenauigkeiten wurden gleichzeitig mit den Proben aus den Jahren 1996/97 auch die archivierten Proben der ersten Hauptuntersuchung aus den Jahren 1991/92 analysiert. Zur Beurteilung der Qualität der Messwerte wurden zudem die archivierten Proben dreier Standorte wiederholt auf ihre Totalgehalte analysiert, und die Messresultate wurden statistisch ausgewertet.

### 3. Beprobung und Analytik

#### 3.1 Beprobung

##### 3.1.1 Vorgehen

Flächenbeprobung

Die Beprobung der Flächen erfolgt gemäss Handbuch KABO AG 1997. Eine Beprobungsfläche besteht aus einem Grundquadrat von 10 m Seitenlänge. Pro Fläche werden rasterförmig je 25 Bohrkerne entnommen und für jede Beprobungstiefe zu einer Mischprobe vereinigt.

Profilbeprobung

Bei der zweiten Hauptuntersuchung wurden aus Kostengründen nicht mehr an allen Standorten Bodenprofile geöffnet, beschrieben und beprobt, sondern nur noch an fünf ausgewählten Standorten, die zuvor auffällige Ergebnisse gezeigt hatten. Pro Horizont wurden drei Proben zu einer Mischprobe vereinigt.

Beprobungsrhythmus

Die Beprobung zur zweiten Hauptuntersuchung wurde 1996/97 durchgeführt, um den vom NABO vorgeschlagenen Beprobungsrhythmus von fünf Jahren einhalten zu können.

Lage der Standorte

Sämtliche Standorte können den Tabellen 1 und 2 entnommen werden. Ihre Lage geht aus Abbildung 2 hervor.

##### 3.1.2 Landwirtschaftsstandorte

22 Landwirtschaftsstandorte

Mit einer Ausnahme eines Standorts wurden alle in der ersten Hauptuntersuchung analysierten Landwirtschaftsstandorte auch in der zweiten Hauptuntersuchung wieder beprobt. Der nicht mehr untersuchte Standort 102un musste aufgegeben werden, da er inzwischen durch ein Gewächshaus überbaut worden war.



Standort	Gemeinde	Ort/Flurname	Standort	Gemeinde	Ort/Flurname
100ob	Obermumpf	Hellikerberg	150sa	Safenwil	Williberg
101he	Hellikon	Ruech	151go	Gontenschwil	im Feld
103un	Unterendingen	Stölzli	152sc	Schafisheim	Staufenfeld
104me	Merenschwand	Sämpermatt	153su	Suhr	Breitenloo
105me	Merenschwand	Hagenauer Feld	154ro	Rohr	Schachen
106ue	Uezwil	Buechwald/Teufi	155el	Elfingen	Rütihof
120vo	Vordemwald	Unt. Benzligen	156bo	Bözen	Heidboden
121gr	Gränichen	Liebegg	157sc	Schinznach-Dorf	Vogelsang
122ku	Küttigen	Brunnenberg	158me	Mettau	Schiltegg
123bi	Birmenstorf	Oberholz	159st	Stetten	Wildenau
124ab	Abtwil	Moos	160un	Unterlunkhofen	Aufeld

Tabelle 1: Landwirtschaftsstandorte

Standort	Gemeinde	Ort/Flurname	Standort	Gemeinde	Ort/Flurname
220ze	Zeiningen	Zeiniger Berg	253kall	Kaisten	Äsplen
221wi	Wittnau	Homberg	254zu	Zurzach	Neugrüt
222ob	Oberhof	Buech	255zu	Zurzach	Beckenmoos
223ze	Zeihen	Talmatt	256re	Rekingen	Uf der Nürren
224el	Elfingen	Marchwald	257ru	Rümikon	Belchenhof
225et	Etzgen	Farrüti	258ge	Gebenstorf	Anzflue
226vi	Villigen	Geissberg	259tull	Turgi	Wilerhalde
227kl	Klingnau	Acheberg/Ischlag	260ba	Baden	Baregg Ost
228ri	Rietheim	Laubberg	261ba	Baden	Baregg West
229sc	Schneisingen	Chuebodentobel	262mo	Möriken	Chestenberg
230ob	Obersiggenthal	Gländbode	263mo	Möriken	Birch
231re	Remetschwil	Grosshau	264ru	Rupperswil	Ob.Farschachen
232br	Bremgarten	Hinteri Mulden	265bu	Buchs	Nord, Suret
233mu	Muri	Maiholz	266su	Suhr	Franzosenbändel
234mu	Muri	Maiholz, Pflanzgarten	267su	Suhr	Süd Eichwald
235vi	Villmergen	Oberhau	268su	Suhr	Wineruus
236du	Dürrenäsch	Chräjeloch	269le	Lenzburg	Lind
237eg	Egliswil	Gemeindewald Leutsch	270le	Lenzburg	Lind
238gr	Gränichen	Moorberg	271le	Lenzburg	Lind
239ob	Oberentfelden	Tann	272of	Oftringen	Langeren
240zo	Zofingen	Leimlöcher/Höchweid	273of	Oftringen	Münzenbuel
241ro	Rothrist	Hurtmenwäldli	274of	Oftringen	Eichenschlag
242mu	Murgenthal	Wissacher	276aa	Aarau	Telli/ Sum- mergrien
243er	Erlinsbach	Buech	277rh	Rheinfelden	Berg
250ei	Eiken	Hard	278rh	Rheinfelden	Pfärichgraben
251ka	Kaisten	Staatswald Hard	279aa	Aarau	Hasenberg/ Oberholz
252ka	Kaisten	Barüti			

Tabelle 2: Waldstandorte

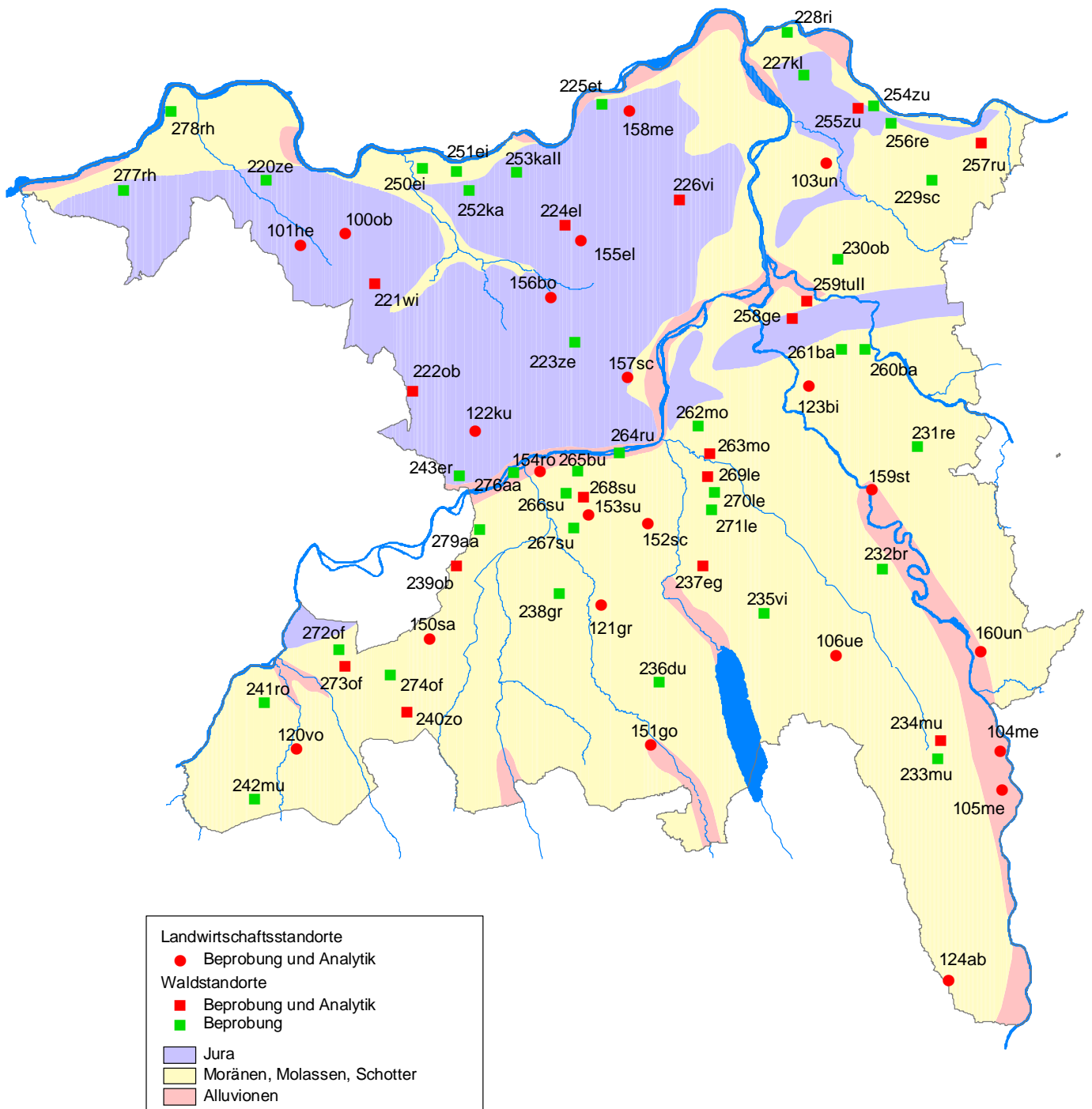


Abbildung 2: Übersicht sämtlicher KABO-Standorte. In der zweiten Hauptuntersuchung analysierte Standorte sind rot dargestellt. Der geologische Untergrund wurde modifiziert nach der Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz (NAGRA und Schweizerische geologische Kommission, 1984)





An den 22 Standorten wurden folgende Beprobungen durchgeführt:  
Eine Flächenprobe (Mischprobe) 0 - 20 cm  
Eine Flächenprobe (Mischprobe) 0 - 10 cm für organische Schadstoffe

### 3.1.3 Waldstandorte

53 Waldstandorte

Wie bei den Landwirtschaftsstandorten wurden auch beim Wald sämtliche Standorte der ersten Hauptuntersuchung wieder beprobt. Bei diesen 53 Standorten wurden die nachfolgend aufgelisteten Proben (Flächenproben ohne Streu) entnommen:

Eine Flächenprobe (Mischprobe) 0 - 5 cm  
Eine Flächenprobe (Mischprobe) 0 - 20 cm  
Eine Flächenprobe (Mischprobe) 0 - 10 cm für die organischen Schadstoffe  
Eine Streuprobe

Bei den fünf Waldstandorten 259tull, 262mo, 268su, 270le, 273of wurden zusätzlich Bodenprofile geöffnet und beprobt.

## 3.2 Analytik

### 3.2.1 Analysenmethoden

Die angewandten Analysenmethoden sind im Handbuch KABO AG 1997 aufgeführt und in Anhang B des vorliegenden Berichtes kurz beschrieben. Die Bestimmungsgrenzen für die einzelnen anorganischen Elemente gehen aus Tabelle 9 hervor.

Bei der zweiten Hauptuntersuchung wurden Proben von 38 der insgesamt 75 KABO-Standorte analysiert: 22 im Landwirtschaftsgebiet und 16 im Wald. Die Standorte sind in Abbildung 2 dargestellt. Aus Kostengründen wurde bisher auf die Analyse der organischen Schadstoffe und der Streuproben verzichtet. Die Proben für organische Schadstoffe sind tiefgekühlt (-20°C) bei der Abteilung Umweltschutz (AUS) des Kantons Aargau archiviert.

### 3.2.2 Landwirtschaftsstandorte

Analysenprogramm

Das Analysenprogramm wurde aufgrund der Ergebnisse der ersten Hauptuntersuchung auf die einzelnen Standorte abgestimmt. Es berücksichtigt diejenigen Schadstoffe, die in der ersten Hauptuntersuchung am auffälligsten waren. Das Grundprogramm umfasst die in Tabelle 3 aufgeführten Parameter. Das Zusatzprogramm zur Beurteilung von auffälligen Standorten ist in Tabelle 4 dargestellt. Von sämtlichen 22 beprobten Standorten wurden Proben analysiert.

Bodenkennwerte	Elemente: Totalgehalte	Elemente: lösliche Gehalte
pH CaCl <sub>2</sub>	Blei (Pb tot)	Cadmium (Cd lösl)
Humusgehalt	Cadmium (Cd tot)	Zink (Zn lösl)
Kalkgehalt	Zink (Zn tot)	Kupfer (Cu lösl)
KAK eff (effektive Kationen-austauschkapazität)	Kupfer (Cu tot)	

Tabelle 3: Analysen-Grundprogramm der 22 Landwirtschaftsstandorte

Zusatz-Elemente	Standorte
Quecksilber total (Hg tot)	124ab, 159st, 160un
Blei löslich (Pb lösl)	101he, 158me
Fluor total (F tot)	100ob, 104me, 122ku, 155el, 158me
Fluor löslich (F lösl)	100ob, 103un, 122ku, 155el, 158me

Tabelle 4: Analysen-Zusatzprogramm für einzelne Landwirtschaftsstandorte, spezifisch für jeden Standort

### 3.2.3 Waldstandorte

Auswahl der Standorte

Aus dem Spektrum der 53 beprobten Waldstandorte wurden für die Analytik der zweiten Hauptuntersuchung 16 Standorte nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- die am stärksten belasteten Standorte
- unbelastete Standorte als Referenzstandorte
- unterschiedliche, anthropogene und geogene Belastungsursachen
- Erfassung der wichtigsten Boden- und Landschaftstypen
- räumliche Verteilung über das ganze Kantonsgebiet

Bei den ausgewählten Standorten handelt sich um

- Standorte mit vorwiegend geogenen Anreicherungen (Jurastandorte): 221wi, 222ob, 224el, 226vi
- Standorte in der Nähe von Emittenten (Mittelland): 255zu, 258ge, 259tull, 268su, 263mo, 269le, 273of
- emittentenferne Standorte (Mittelland): 237eg, 239ob, 240zo, 257ru
- einen Standort mit Hilfsstoffeinsatz (Forst-Pflanzgarten): 234mu

Analysenprogramm

Das Grundprogramm umfasst die in Tabelle 5 und das Zusatzprogramm die in Tabelle 6 aufgeführten Parameter.

Bodenkennwerte	Elemente: Totalgehalte	Elemente: lösliche Gehalte
pH CaCl <sub>2</sub>	Blei (Pb tot)	Cadmium (Cd lösl)
Humusgehalt	Cadmium (Cd tot)	Zink (Zn lösl)
Kalkgehalt	Zink (Zn tot)	Nickel (Ni lösl)
KAK eff (effektive Kationen-austauschkapazität)	Nickel (Ni tot)	

Tabelle 5: Analysen-Grundprogramm der 16 Waldstandorte



Zusatz-Elemente	Standorte
Kupfer total (Cu tot)	234mu
Quecksilber total (Hg tot)	255zu, 258ge, 268su, 273of
Blei löslich (Pb lösl)	273of
Chrom total (Cr tot)	221wi, 222ob, 224el, 226vi
Fluor total (F tot)	259tull, 221wi, 222ob
Fluor löslich (F lösl)	259tull, 221wi, 222ob

Tabelle 6: Analysen-Zusatzprogramm für einzelne Waldstandorte, spezifisch für jeden Standort

Bei den Standorten 259tull, 268su und 273of wurden zusätzlich auch die Proben der Bodenprofile analysiert.

Zusammenfassung des  
Untersuchungsprogramms

Bei der zweiten Hauptuntersuchung wurden sämtliche Standorte beprobt und die Proben archiviert. Bei zukünftigem Auswertungsbedarf kann auf diese Proben zurückgegriffen werden. Aus Kostengründen wurde für die zweite Hauptuntersuchung ein reduziertes und auf die Ergebnisse der ersten Hauptuntersuchung abgestimmtes Analysenprogramm durchgeführt. Es wurden sämtliche 22 Landwirtschaftsstandorte, aber nur 16 der 53 Waldstandorte analysiert.

## 4. Qualität der Messresultate

### 4.1 Ursachen von Messungenauigkeiten

Bedeutung von  
Messungenauigkeiten

Bei der Interpretation von Analysenresultaten sind Kenntnisse über die Qualität der Messwerte von entscheidender Bedeutung. Um zeitliche Konzentrationsänderungen bei Dauerbeobachtungsflächen beurteilen zu können, ist insbesondere eine langjährige gute Präzision unabdingbar. Systematische Fehler müssen erkannt und quantifiziert, zufällige Fehler so weit als möglich minimiert werden. Auf jeden Fall sind die zufälligen Fehler ebenfalls zu quantifizieren und in Beziehung zu den gemessenen Gehaltsunterschieden zu setzen.

Die Qualität der Analysenresultate hängt von verschiedenen Arbeitsschritten und Einflussgrössen ab. Die Messfehler werden den beiden Arbeitsschritten Probengewinnung und Analytik zugeordnet (BUWAL, 2000).

Probengewinnung

Zu den Probengewinnungsfehlern werden Fehler bei der eigentlichen Feldbeprobung (Probennahmefehler) und bei der Probenvorbereitung (zum Beispiel beim Trocknen, Zerkleinern und Sieben) sowie die Streuungsanteile, die auf die kleinräumige Variabilität zurückzuführen sind, gerechnet. Um die Messwertstreuungen, die auf diese kleinräumige Variabilität zurückzuführen sind, erfassen zu können, werden beim NABO (BUWAL, 1993) und beim KABO SG (1995) auf allen Untersuchungsflächen Mehrfachbeprobungen durchgeführt.

Analytik	Die Analytikfehler bestehen aus Abweichungen, die bei der Probenaufbereitung, zum Beispiel Einwaage, Extraktion, und bei der Messung (Analyse), zum Beispiel Verdünnung, Eichung, entstehen (BUWAL, 2000).
Probenheterogenität	<p>Die Fehler, die auf die Probenheterogenität zurückzuführen sind, werden je nach Versuchsanordnung den Probengewinnungsfehlern oder den Analytikfehlern zugeordnet. Folgende Ursachen können allein oder in ihrem Zusammenwirken zur Heterogenität der Proben beitragen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Partikuläre Formen der Schadstoffgehalte</li><li>- Wechselnde Schwermetall-Bindungsverhältnisse</li><li>- Komplexe Bodenmatrix (mineralische und organische Stoffzusammensetzung)</li><li>- VBBo-Probenaufbereitungs- und Extraktionsvorgaben: Die Proben werden nicht zermahlen, sondern nur auf 2 mm hinunter gesiebt. Mit der Salpetersäure-Extraktion werden nicht die in der Geochemie üblichen Gesamtgehalte (effektive Totalgehalte), sondern nur „Pseudo-Totalgehalte“ erfasst (BUWAL, 2000).</li></ul>

## 4.2 Qualität der KABO-Messwerte

Nachfolgend werden sowohl Massnahmen zur Gewährleistung von qualitativ guten Daten als auch Grundlagen zur Qualitätsbeurteilung der KABO-Messwerte dargestellt.

### 4.2.1 Parallelanalytik

Bei Dauerbeobachtungsflächen werden Analysenergebnisse von Proben, die in verschiedenen Zeiträumen entnommen wurden, miteinander verglichen. Resultate von Proben, die im Abstand mehrerer Jahre analysiert wurden, sind nur bedingt miteinander vergleichbar. Unter anderem können die Weiterentwicklung von Geräten sowie von Labor- und Analysenmethoden zu unterschiedlichen Messresultaten führen.

Konzept der Parallelanalytik	Um diese zeitbedingten Fehlerquellen weitgehend auszuschalten, wurde das Konzept der Parallelanalytik ins KABO AG aufgenommen. Dabei werden die Zweiterhebungs-Proben eines Standortes in der gleichen Messserie wie die archivierten Proben der Ersterhebung desselben Standortes bearbeitet. Dieses Vorgehen umfasst sämtliche Laborprozesse – vom Aufschluss bis zur Analyse.
------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Dem Vorgehen gemäss KABO liegen Erfahrungen mit dem NABO (BUWAL, 2000) zugrunde: „Archivproben entsprechender Standorte sind für den Nachweis von zeitlichen Konzentrationsveränderungen die am besten geeignete Referenzbasis. Bodenproben sind einerseits für anorganische Schadstoffanalysen weit stabiler als die Messverfahren. Andererseits entsprechen sie, im Gegensatz zu Referenzmaterialien, in Matrixzusammensetzung und Analytkonzentration den zeitlichen Vergleichsproben weitestgehend.“



#### 4.2.2 Wiederholungsmessungen 1999

Als Wiederholbarkeit wird die Reproduzierbarkeit von Analysenergebnissen im gleichen Labor bezeichnet (BUWAL, 1993). Die Wiederholbarkeit der Analysenergebnisse der zweiten Hauptuntersuchung kann aufgrund des Projekts „Wiederholungsmessungen 1999“ beurteilt werden. Die Totalgehalte von Cadmium, Kupfer, Blei, Zink, Chrom, Quecksilber dreier Standorte (archivierte Proben 1991/92 und 1996/97) wurden 1999 erneut extrahiert und analysiert. Diese Wiederholungsmessungen hatten zum Ziel, unter sonst gleichen Bedingungen wie bei der Erst- und Zweiterhebung,

- die Streuung der Messwerte bezüglich Extraktion und Analyse zu bestimmen und
- eine mittlere Streuung dieser Faktoren zu quantifizieren und diese auf die Ergebnisse der Erst- und Zweiterhebung zu übertragen.

Die Analytik dieser Wiederholungsmessungen wurde durch die AgroLab AG in Root ausgeführt. Die statistische Auswertung erfolgte durch das Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich (ITÖ, 2001).

Auswahl der Standorte

Für die Wiederholungsmessungen wurden drei Standorte ausgewählt, deren Konzentrationsdifferenzen zwischen den Beprobungen 1991/92 und 1996/97 möglichst gross waren. Die Waldstandorte 269le und 273of wiesen bei den Bleigehalten und der Landwirtschaftsstandort 159st beim Cadmium-Gehalt grosse Unterschiede auf.

Ergebnisse der Wiederholungsmessungen 1999

Als Mass für die signifikanten Unterschiede wurde für alle drei Standorte und sechs Elemente ein 95%-Konfidenzintervall berechnet. Diese Konfidenzintervalle wurden aus der geschätzten Variation der Wiederholungsmessungen abgeleitet. Die Variation umfasst diejenige Streuung, die durch die Analytik (Extraktion und Analyse) verursacht wird. Die Konfidenzintervalle werden in Relation zu den VBBo-Richtwerten gesetzt (Tabelle 7). Die Definition des Richtwertes ist in Kapitel 6.1.2 und die Richtwerte der einzelnen Elemente sind in Tabelle 9 aufgeführt.

			Cd tot	Cu tot	Pb tot	Zn tot	Cr tot	Hg tot
Landwirtschaft	159st	mg/kg	0.142	2.72	52.00	3.45	2.7	0.126
		%	17.7	6.8	104	2.3	5.4	25.3
Wald	269le	mg/kg	0.009	0.16	2.35	1.65	0.65	0.006
		%	1.1	0.4	4.7	1.1	1.3	1.2
Wald	273of	mg/kg	0.011	0.25	3.70	2.40	1.20	0.009
		%	1.4	0.6	7.4	1.6	2.3	1.8

Tabelle 7: Konfidenzintervalle der Wiederholungsmessung 1999; Angaben in mg/kg und in Prozent des VBBo-Richtwertes

Beim Standort 159st beträgt beispielsweise das Konfidenzintervall für Kupfer 2.72 mg/kg beziehungsweise 6.8% des Richtwertes von 40 mg/kg. Gehaltsänderungen, die kleiner als diese 2.72 mg/kg sind, beziehungsweise innerhalb einer Bandbreite von  $\pm 6.8\%$  des Richtwertes liegen, sind somit nicht signifikant.

Die Konfidenzintervalle der beiden Standorte 269le und 273of lagen für alle Elemente zwischen 0.4% und 7.4% des Richtwertes.

Die am Standort 159st ermittelten Konfidenzintervalle können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Für Kupfer, Zink und Chrom lag das Intervall zwischen 2.3% und 6.8% und damit im Bereich der Konfidenzintervalle der beiden Waldstandorte. Bei der zweiten Gruppe sind die Konfidenzintervalle wesentlich höher: Cadmium 17.7%, Quecksilber 25.3% und Blei 104%. Die möglichen Ursachen dieser relativ hohen Konfidenzintervalle werden im folgenden Kapitel 4.2.3 diskutiert.

#### **4.2.3 Vergleich der Wiederholungsmessungen 1999 mit NABO-Ringversuchen**

Zur Beurteilung der Aussagekraft der Messdaten der zweiten Hauptuntersuchung können auch die Ergebnisse der NABO-Ringversuche verwendet werden. Im Hinblick auf die Dauerbeobachtung geben die Ergebnisse der Ringversuche ebenfalls Aufschluss über die langjährige Kontinuität der Qualität der Analysenresultate.

Die Ergebnisse der Ringversuche für das Jahr 1999 sind detailliert im VBBö-Ringanalysenbericht 1999 (FAL, 2000) dargestellt und werden im Folgenden in einfacher Form zusammengefasst:

Wichtig für die Beurteilung der verschiedenen Analysenwerte sind die sogenannten Sollwertbereiche (ausreisserbereinigte Variationskoeffizienten um den Medianwert auf Richtwerthöhe). Sie betragen für die Totalgehalte der Elemente Kobalt, Kupfer, Nickel, Blei, Zink  $\pm 10\%$  des Richtwertes oder korrekter des Medians in Richtwerthöhe, für den Chrom-Totalgehalt  $\pm 15\%$  und für den Cadmium-Totalgehalt  $\pm 20\%$ . Um die Ringversuchsanforderungen zu erfüllen, wurden die Messresultate der einzelnen Labors anhand der Sollwertbereiche beurteilt. Beim Quecksilber wurde kein Sollwertbereich festgelegt. Die AgroLab AG hat bei den Ringversuchen die Anforderungen weitgehend erfüllt; das heisst, die Messungenauigkeit liegt unterhalb der Sollwertbereiche.

Das Konfidenzintervall von 17.7% für den Cadmium-Totalgehalt von Standort 159st liegt im Bereich der Sollwerte (20%) der Ringversuche. Die Konfidenzintervalle der Cadmium-Proben der Standorte 269le und 273of weisen aber auf eine wesentlich höhere Wiederholpräzision hin.

Das Quecksilber-Konfidenzintervall von 25% beim Standort 159st ist, verglichen mit den Ergebnissen der Ringversuche, nicht als aussergewöhnlich hoch zu beurteilen (siehe auch BUWAL, 2000). Die geringen Konfidenzintervalle der beiden Standorte 269le und 273of weisen ebenfalls auf eine gute Wiederholpräzision hin.

Das Konfidenzintervall des Standortes 159st für Blei übersteigt den Sollwertbereich bei weitem. Der Grund hierfür dürfte nicht bei der Analytik, sondern bei der Probenheterogenität liegen. Auf dem Standort 159st wurde früher Kompost schlechter



Qualität ausgetragen. Erfahrungsgemäss können Proben von Flächen mit Kompost- oder Klärschlamm-Anwendung hohe Streuungen der Analysenresultate aufweisen.

Wiederholungsmessungen  
1999

Bei homogenen Proben sind die Analytikfehler von Totalgehalten, die durch die Extraktion und Analyse verursacht werden, relativ gering. Die Konfidenzintervalle betragen bei den Elementen Cadmium, Kupfer, Zink, Chrom und Quecksilber weniger als 5% der entsprechenden Richtwerte und bei Blei maximal 7.4%.

#### 4.2.4 Kleinräumige Variabilität der Totalgehalte

Da beim KABO AG generell nur Einfachbeprobungen durchgeführt wurden, können keine konkreten und systematischen Angaben zur kleinräumigen Variabilität auf den Probenahmeflächen gemacht werden. Die in den Wiederholungsmessungen 1999 untersuchten und berechneten Varianzen beziehungsweise Konfidenzintervalle (Kapitel 4.2.2) beziehen sich nur auf die Analytikfehler, die durch Extraktion und Analyse verursacht werden. Die Variabilität, welche durch die kleinräumige Heterogenität des Probenahmestandortes bedingt ist, wird nicht erfasst.

Der Einfluss dieses Faktors wird daher aufgrund der Ergebnisse anderer Untersuchungen abgeschätzt.

BUWAL 1993

In BUWAL 1993 sind die element- und standortbezogenen Standardabweichungen der Vierfachbeprobungen (Totalgehalte) dargestellt. Diese Standardabweichungen sind unter anderem auf die kleinräumige Variabilität zurückzuführen. Um den Bezug dieser Standardabweichungen zu den Konfidenzintervallen herzustellen, werden bei zufällig ausgewählten Standorten und Elementen die Standardabweichungen in Prozent des VBBo-Richtwertes umgerechnet. Mit wenigen Ausnahmen liegen die Standardabweichungen unterhalb von 5% des entsprechenden VBBo-Richtwertes. Das Gleiche gilt für die doppelten Standardabweichungen. In den meisten Fällen dürfte daher die Streuung, die durch die kleinräumige Variabilität verursacht wird, kleiner sein als jene Streuung, die bei der Beurteilung der Gehaltsdifferenzen berücksichtigt wurde (siehe Kapitel 6).

Wiederholungsbeprobung  
1991

Einen zusätzlichen Hinweis auf die Grösse der kleinräumigen Variabilität geben die Resultate einer Wiederholungsbeprobung, die 1991 im Rahmen der ersten Hauptuntersuchung des KABO durchgeführt wurde. An drei Standorten wurden ein zweites Mal Flächenproben 0 - 20 cm entnommen. Alle Proben wurden durch das gleiche Labor analysiert.

Standort	Pb	Cd	Ni	Zn	Hg	Cu	Cr	F
253kall	0	3.7	1.2	-0.5	0	-2.2	-1	-5.1
254zu	1	0	-1.6	0.9	4	-0.5	2.8	-1.1
275aa	-9.4	0	-1.4	-0.2		-0.7	0.5	0.3

Tabelle 8: Wiederholungsbeprobung 1991; Differenzen in Prozent des VBBo-Richtwertes

Tabelle 8 zeigt, dass auf den drei Standorten, die 1991 zweimal beprobt wurden, die Abweichungen nur in einem Fall (Blei beim Standort 275) mehr als 5% des VBBo-Richtwertes betragen.

#### Kleinräumige Variabilität

Aufgrund der Angaben aus (BUWAL, 1993) und des Hinweises aus der Wiederholungsbeprobung 1991 wird davon ausgegangen, dass die kleinräumige Variabilität bei den meisten Fällen (Standorte und Elemente) weniger als 5% der VBBo-Richtwerte beträgt. Diese Annahme ist bei der nächsten Hauptuntersuchung zu überprüfen.

#### 4.2.5 Streuungen der löslichen Schadstoffgehalte

Während die Totalgehalte als Mass für die chemisch-stoffliche Bodenbelastung herangezogen werden können, erlauben die löslichen Gehalte eine Beurteilung der biologischen Wirkung auf Bodenorganismen und Pflanzen sowie der Verlagerung ins Grundwasser. Bei den löslichen Gehalten ist aber im Gegensatz zu den Totalgehalten mit relativ grossen nicht kontrollierbaren Schwankungen zu rechnen. Diese Schwankungen und Streuungen der Analysenresultate können unter anderem auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- Verschiedene Witterungs- und Bodenfeuchtigkeitsbedingungen vor und während der Beprobung
- Verschiedene Bodentemperaturen zum Beprobungszeitpunkt
- Abhängigkeit der löslichen Gehalte vom pH-Wert, der seinerseits je nach Jahreszeit und Witterung Schwankungen ausgesetzt ist
- Zu wenig bekannte Stabilität der löslichen Gehalte bei archivierten Proben

Konzentrationsveränderungen bei den löslichen Gehalten zwischen den Beprobungen 1991/92 und 1996/97 sind deshalb nur bedingt aussagekräftig und mit Vorsicht zu interpretieren.





## 5. Ergebnisse der zweiten Hauptuntersuchung

### 5.1 Schadstoffgehalte der Flächenproben 0 - 20 cm

#### 5.1.1 Beurteilungskriterien

Die Beurteilung der Schadstoffgehalte erfolgt aufgrund verschiedener Referenzwerte.

Rechtliche Referenzwerte

Die VSBo-Richtwerte, anhand derer die Messergebnisse der ersten Hauptuntersuchung beurteilt wurden, sind in der Zwischenzeit revidiert worden. Die neuen Richtwerte sind in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 1998) enthalten. Neu wurden auch Prüfwerte und Sanierungswerte definiert. Die rechtlich relevante Bodenbelastung wird anhand dieser Richt-, Prüf- und Sanierungswerte beurteilt.

#### *Richtwert (RW)*

Die Richtwerte geben die Belastung an, bei deren Überschreitung die Fruchtbarkeit des Bodens nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung langfristig nicht mehr gewährleistet ist (USG 1987, Art. 35). Eine unmittelbare Gefährdung von Mensch und Umwelt ist nicht gegeben. Wenn der Richtwert überschritten ist oder wenn die Bodenbelastung deutlich ansteigt, so ermitteln die Kantone gemäss Art. 8 VBBo die Ursachen der Belastung mit dem Ziel, die Belastungsquellen zu stoppen.

#### *Prüfwert (PW)*

Prüfwerte geben für bestimmte Nutzungsarten Belastungen des Bodens an, bei deren Überschreitung nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Menschen, Tiere oder Pflanzen konkret gefährdet werden können (VBBo 1998, Art. 2). Anhand der Prüfwerte wird beurteilt, ob Einschränkungen der Nutzung des Bodens nötig sind.

#### *Sanierungswert (SW)*

Die Sanierungswerte geben die Belastung an, bei deren Überschreitung nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung bestimmte Nutzungen ohne Gefährdung von Menschen, Tieren oder Pflanzen nicht möglich sind (USG 1987, Art. 35). Sind in einem Gebiet die Sanierungswerte überschritten, so verbieten die Kantone die davon betroffenen Nutzungen (VBBo 1998 Art. 10).

Anreicherungsgrad,  
in Relation zum VBBo-RW

In Anlehnung an die erste Hauptuntersuchung (KABO AG, 1994) werden die Werte in der Höhe von 50 bis 80% des Richtwertes als leicht erhöht und jene von 80 - 100% des Richtwertes als mässig erhöht beurteilt. Messwerte, die zwischen den Richtwerten und den Prüfwerten liegen, werden als deutlich erhöht bezeichnet.

Gesamtschweizerische  
Vergleichswerte  
(BUWAL, 2001b)

Im Rahmen des Nationalen Bodenbeobachtungsnetzes (NABO) werden Schadstoffgehalte von 105 Standorten und ihre zeitlichen Veränderungen untersucht (BUWAL, 1993 und BUWAL, 2000). Ergänzend zu dieser Untersuchung wurden Schadstoff-Analyseergebnisse aus einer umfassenden Zahl von Projekten statis-

tisch ausgewertet (BUWAL, 2001b). Für die Interpretation der KABO-Daten werden die statistischen Kennwerte der Rubrik „Beobachtungsflächen“ aus dieser BUWAL-Publikation herangezogen. Diese Rubrik umfasst Messergebnisse von Beobachtungsflächen des Bundes und verschiedener Kantone und ist nach verschiedenen Nutzungskategorien untergliedert. Die Interpretation der KABO-Daten erfolgt aufgrund der Mediane der Nutzungskategorien Ackerland und Wald.

Gegenüber den Daten der 105 NABO-Standorte zeichnen sich die BUWAL-Vergleichswerte durch ein umfangreicheres, ebenfalls gesamtschweizerisches Datenkollektiv aus. Im Gegensatz zum NABO enthält die BUWAL-Publikation auch Vergleichswerte für lösliche Gehalte.

### 5.1.2 Messwerte 0 - 20 cm

In Tabelle 9 sind die Einzelwerte und statistische Kennwerte der Schadstoffgehalte und der Bodenkennwerte der Beprobung 1996/97 aufgelistet. Das 10. und 90. Perzentil begrenzen die „häufigen Bereiche“ (80% der Werte).

Die deutlich erhöhten Messwerte (Werte zwischen Richt- und Prüfwerten) in Tabelle 9 sind rot, erhöhte (80 - 100% des Richtwertes) gelb und leicht erhöhte (50 - 80% des Richtwertes) grün hinterlegt.

Bei 22 der 38 Standorte liegen die Blei-Totalgehalte im Bereich leicht erhöht oder darüber. 14 der 38 Standorte zeigen mindestens leicht erhöhte Cadmium-Gehalte. Elf der 22 Landwirtschaftsstandorte weisen Kupfer-Totalgehalte auf, die ebenfalls mindestens leicht erhöht sind.

### 5.1.3 Richtwertüberschreitungen

In den Landwirtschaftsstandorten kommen keine Überschreitungen von Prüf- und Sanierungswerten vor. Für die Nutzung „Wald“ wurden in der VBBo 1998 keine Prüf- und Sanierungswerte festgelegt.

In fünf von 22 Landwirtschaftsstandorten wird je ein VBBo-Richtwert für Totalgehalte überschritten: Zwei Überschreitungen betreffen Cadmium, zwei Fluor und einer Kupfer. Bei den löslichen Gehalten werden keine Richtwerte überschritten.

Bei den Waldstandorten sind insgesamt 22 Richtwerte bei zwölf von 16 Standorten überschritten:

- acht der 22 Richtwertüberschreitungen beziehen sich auf Totalgehalte (vier Blei, zwei Cadmium, einmal Chrom, einmal Fluor) und
- 14 der 22 Richtwertüberschreitungen auf lösliche Gehalte (neun Zink, drei Cadmium und zwei Nickel).

Überschreitungen von Prüf- und Sanierungswerten

Überschreitungen von Richtwerten



## 5.2 Stoffgehalte, nach Standortgruppen differenziert

Verschiedene Standortbedingungen

Der Kanton Aargau zeichnet sich durch eine hohe ökologische Vielfalt aus. Die verschiedenen Standortbedingungen, welche auch durch die KABO-Standorte repräsentiert sind, weisen zudem unterschiedliche geogen und anthropogen bedingte Muster von Schwermetallanreicherungen auf. Zur Ermittlung der Ursachen von anthropogenen oder geogenen Schadstoffanreicherungen ist deshalb eine Untergliederung der Standorte nach ökologischen, schadstoffrelevanten Faktoren und Eigenschaften unumgänglich.

Unterschiedliche Nutzungen, beispielsweise durch Landwirtschaft und Wald, sowie unterschiedliche geologische und geomorphologische Verhältnisse prägen die Schadstoffsituation auch indirekt. Sie beeinflussen die Bodenbildung und –entwicklung und damit zugleich Bodeneigenschaften, die für Gehalte und Dynamik der Schadstoffe im Boden von erheblicher Bedeutung sind.

Ursachen von Schadstoffanreicherungen

Bei den Waldstandorten kommen nebst geogenen Schadstoffanreicherungen auch Schadstoffeinträge über die Luft vor. Bei den Landwirtschafts-Standortgruppen können zusätzlich zu den geogenen und luftbürtigen Schadstoffen auch direkte Einträge über landwirtschaftliche Hilfsstoffe zu Anreicherungen im Boden führen.

### 5.2.1 Charakterisierung der Standortgruppen

Die Gruppierung der KABO-Standorte in fünf Standortgruppen erfolgt nach den Hauptnutzungen „Landwirtschaft“ und „Wald“ sowie nach den Faktorenkombinationen „geologisches Ausgangsmaterial“ und „Bodenreaktion“ (pH-Wert). Es werden drei Landwirtschafts-Standortgruppen (La 1, La 2, La 3) und zwei Wald-Standortgruppen (Wa 1, Wa 2) unterschieden. In Tabelle 10 sind die Standortgruppen, die wichtigsten Gliederungskriterien und die Zuteilung der analysierten KABO-Standorte zu den einzelnen Standortgruppen dargestellt.

Jura-Standorte:  
Gruppen La 1 und Wa 1

Die Böden der Standortgruppen La 1 und Wa 1 haben sich aus kalkhaltigen Gesteinen des Jura gebildet. Die Flächenproben 0 - 20 cm sind bei den Waldstandorten schwach sauer bis neutral und bei den Landwirtschaftsstandorten schwach alkalisch.

Mittelland-Standorte:  
Gruppe La 2 : Alluvialstandorte

Die Landwirtschafts-Standortgruppe La 2 weist Böden mit neutraler bis schwach alkalischer Bodenreaktion auf. Die Böden auf diesen Alluvionen haben sich aber nicht aus Kalkgesteinen wie die Juraböden, sondern aus Fluss- und Bachablagerungen sowie teilweise auch aus Seeablagerungen gebildet. Die meisten Standorte dieser Gruppe sind eben und werden als Ackerland genutzt. In der zweiten Hauptuntersuchung wurden keine alluvialen Waldstandorte untersucht.

Mittelland-Standorte:  
Gruppen La 3 und Wa 2  
(Moräne-, Molasse- und Schotterböden)

Die Gruppen La 3 und Wa 2 umfassen vorwiegend Molasse-, Moränen- und Schotter-Böden sowie vereinzelt auch saure Hangschutt-/Hanglehm-Böden. Die Böden (Flächenproben 0 - 20 cm) der Gruppe La 3 reagieren schwach sauer bis neutral,



jene der Gruppe Wa 2 sauer bis stark sauer. Die meisten Standorte dieser beiden Gruppen - mit Ausnahme der Schotterflächen - sind geneigt.

Nutzung	Standortgruppen <sup>1)</sup>	Geologisches Ausgangsmaterial	Bodenreaktion in 0 - 20 cm Tiefe		KABO-Standorte
			pH-Wert (CaCl <sub>2</sub> )	Säuregrad	
Landwirtschaft (n=21)	La 1 (n=7)	Kalkgesteine (Jura)	6.8-7.3	schwach alkalisch	100ob, 101he, 122ku, 155el, 156bo, 157sc, 158me
	La 2 (n=7)	Junge Alluvionen (Schwemmlehme)	6.0-7.3	neutral bis schwach alkalisch (1 Standort: schwach sauer)	104me, 105me, 150sa, 151go, 154ro, 159st, 160un
	La 3 (n=7)	Schotter, Moränen, Molasse	5.4-6.5	schwach sauer bis neutral	103un, 106ue, 120vo, 121gr, 123bi, 152sc, 153su
Wald (n=15)	Wa 1 (n=4)	Kalkgesteine (Jura)	5.5-6.6	schwach sauer bis neutral	221wi, 222ob, 224el, 226vi
	Wa 2 (n=11)	Schotter, Moränen, Molasse, Hangschutt/-lehm (sauer)	3.5-5.3	stark sauer bis sauer (1 Standort: schwach sauer)	237eg, 239ob, 240zo, 257ru, 263mo, 255zu, 258ge, 259tull, 268su, 269le, 273of

Tabelle 10: Standortgruppen

<sup>1)</sup> In den Gruppen sind zwei Standorte nicht integriert: Landwirtschaft: Halbmoor (124ab), Wald: Forstpflanzgarten (234mu); n = Anzahl Standorte

#### Spezialstandorte

Der Standort 124ab ist als Halbmoorboden nicht mit den anderen KABO-Landwirtschaftsstandorten vergleichbar. Sein Gehalt an organischer Substanz von knapp 30% liegt weit über jenen der übrigen 21 Landwirtschaftsstandorte mit maximal 7.2%. Als organischer Boden weist er ein anderes Schadstoffverhalten auf als die übrigen Landwirtschaftsböden. Die Beurteilung dieses Bodens nach dem VBBo-Richtwert ist zudem gemäss VBBo volumenbezogen – und nicht gewichtsbezogen – vorzunehmen. Er wird daher keiner Landwirtschaftsgruppe zugeordnet und individuell beurteilt.

Der Standort 234mu (Forstpflanzgarten), bei dem Pflanzenhilfsstoffe eingesetzt wurden, ist der einzige Waldstandort, bei dem direkte Stoffeinträge erfolgten. Als Spezialfall wurde er in keine Gruppe aufgenommen.

#### Nutzung und Vegetation der Standortgruppen

In Anhang C sind die Nutzung der Landwirtschaftsstandorte sowie bei den Waldstandorten die Baumbestände und die vegetationskundliche Kartiereinheit, in der die Probenahmeflächen liegen, aufgelistet. 18 der 22 Landwirtschaftsstandorte werden ackerbaulich bewirtschaftet (zwei davon als Feldgemüsebau: 123bi und 159st). Drei Standorte (122ku, 124ab und 155el) werden als Wiesland und ein Standort (157sc) als Rebberg genutzt. Beim Wald liegen gemäss vegetationskundlicher Standortkartierung die meisten Probenahmeflächen der Standortgruppe Wa 2 in Kartierungseinheiten, die als Waldmeister-Buchenwald (mit unterschiedlichen Ausprägungen) bezeichnet werden.

Varianzanteile der  
einzelnen Parameter

## 5.2.2 Schadstoffgehalte der Standortgruppen

### 5.2.2.1 Übersicht über Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte

In Anhang D sind die Box-Plots der Bodenkennwerte und der Schadstoffgehalte – nach den fünf Standortgruppen gegliedert – dargestellt. Mit Hilfe der Varianzanalyse wird jener Streuungsanteil der einzelnen Parameter, der durch diese Gruppierung erreicht wird, berechnet (Tabelle 11). Für die Bodenkennwerte erklärt diese Klassifikation bereits 56% bis 89% der festgestellten Streuung.

Bei den Totalgehalten werden vor allem Cadmium, Zink und Nickel durch die Eigenschaften, die mit den fünf Standortgruppen zusammengefasst werden, geprägt. 56% bis 67% der Varianz dieser drei Elemente lassen sich durch die fünf Gruppen erklären. Bei Blei und Kupfer ist der Varianzanteil sehr viel geringer, das heisst, die Einteilung in die gewählten Standortgruppen trägt kaum zur Erklärung der Streuung dieser Elemente bei.

Auch die Streuung der löslichen Gehalte von Cadmium, Zink und Nickel wird weitgehend durch die Gruppenfaktoren, vorwiegend durch den pH-Wert, geprägt. Die Varianzanteile betragen zwischen 54% und 64%.

Totalgehalten	Varianz (%)	lösliche Gehalte	Varianz (%)	Bodenkennwerte	Varianz (%)
Pb tot	28	Cd lösl	60	pH (CaCl <sub>2</sub> )-Wert	89
Cd tot	63	Ni lösl	54	Humusgehalt	59
Zn tot	56	Zn lösl	64	Tongehalt	70
Ni tot	67			KAK eff	69
Cu tot	11			Kalk (CaCO <sub>3</sub> )	56

Tabelle 11: Mit den fünf Standortgruppen erklärbare Varianzanteile von Bodenkennwerten und Schadstoffgehalten; Flächenproben 0 - 20 cm; Beprobung 1996/97.  
Berechnet mit Varianzanalyse (ANOVA; 5% Irrtumswahrscheinlichkeit)

### 5.2.2.2 Vergleich der Totalgehalten mit schweizerischen Medianwerten

In Tabelle 12 werden die Schadstoff-Medianwerte der KABO-Landwirtschafts-Standortgruppen mit denjenigen der Beobachtungsflächen „Ackerland“ der BUWAL (2001b)-Publikation verglichen, und in Tabelle 13 sind die Mediane der KABO-Wald-Standortgruppen jenen der BUWAL-Kategorie „Wald“ gegenübergestellt. In beiden Tabellen ist der Koeffizient KABO/BUWAL dargestellt. Werte grösser als eins bedeuten, dass die KABO-Gehalte über den gesamtschweizerischen Gehalten liegen.

Gruppe La 1

Die Kupfergehalte der Gruppe La 1 sind mit den gesamtschweizerischen Medianwerten vergleichbar. Blei, Zink und Cadmium liegen über den gesamtschweizerischen Vergleichswerten (Faktor 1.3 - 2). Besonders auffällig ist der hohe Gehalt von Cadmium. Die Anreicherungen dieser drei Elemente sind vorwiegend geogen bedingt (siehe Kapitel 5.3).

Der Kanton Basel-Landschaft führte 1999 eine Untersuchung an 154 Flächenproben im Landwirtschaftsgebiet durch (AUE, 1999). Das geologische Ausgangsmate-



rial für die Bodenbildung dieser BL-Standorte entspricht weitgehend demjenigen der Standortgruppe La 1 des KABO AG. Die Blei-, Cadmium-, Zink- und Kupfer-Totalgehalte (Medianwerte, [mg/kg]) dieser Untersuchung sind mit denen der Gruppe La 1 des KABO AG gut vergleichbar. Während die Gehalte der BL-Standorte für Blei 26, Cadmium 0.46, Zink: 60, und Kupfer 17 mg/kg betragen, liegen die Gehalte im KABO AG für Blei bei 30, für Cadmium bei 0.47, für Zink bei 66 und für Kupfer bei 20 mg/kg.

Gruppe La 2

In der Gruppe La 2 sind die Totalgehalte von Blei, Cadmium, Zink und Kupfer gegenüber den gesamtschweizerischen Medianwerten um einen Faktor von 1.2 -1.5 erhöht. Diese Anreicherung dürfte vorwiegend auf den Schwermetalleintrag über landwirtschaftliche Hilfsstoffe zurückzuführen sein (siehe Kapitel 5.3).

Gruppe La 3

Die Gruppe La 3 weist im gesamtschweizerischen Vergleich eher etwas tiefere Totalgehalte an Blei, Cadmium, Zink und Kupfer auf.

Gruppe Wa 1

In der Gruppe Wa 1 sind, wie bei der entsprechenden Landwirtschafts-Standortgruppe La 1, die Blei-, Zink- und vor allem die Cadmium-Gehalte erhöht (Faktor 1.6 - 3.7). Erhöhte Gehalte wurden auch bei Nickel, Chrom und Fluor festgestellt. Bei all diesen Elementen stehen, wie bei der Standortgruppe La 1, geogene Ursachen für die Anreicherungen im Vordergrund.

Aufgrund der Untersuchung von fünf Waldböden im Kanton Basel-Landschaft wird vermutet, dass Böden, die sich aus Kalkgesteinen gebildet haben, verhältnismässig hohe geogene Blei-, Cadmium- und Zinkgehalte aufweisen (AUE, 1997). Auch diese Beobachtung stimmt mit den Untersuchungsergebnissen der Standortgruppe Wa 1, die ähnliche geologische Verhältnisse aufweist, gut überein.

Gruppe Wa 2

Die Cadmium-, Zink- und Nickel-Totalgehalte liegen unterhalb und der Bleigehalt im Bereich der gesamtschweizerischen Durchschnittswerte.

### **5.2.2.3 Vergleich der löslichen Gehalte mit schweizerischen Medianwerten**

Die löslichen Gehalte liegen in allen drei Landwirtschafts-Standortgruppen und in der Wald-Standortgruppe Wa 1 (mit Kalkgesteinen als Ausgangsmaterial) im Bereich der Bestimmungsgrenzen oder darunter. In der Wald-Standortgruppe Wa 2 sind die hohen löslichen Gehalte von Cadmium, Zink und Nickel auffällig (Faktoren 1.4 - 5.4). Dies ist mit den sauren bis stark sauren Bodenverhältnissen, die zu einer hohen Löslichkeit dieser Schwermetalle führen, erklärbar.

Im KABO SG (1995 und 1997) weisen die Flächenproben aller sieben Waldstandorte ähnlich tiefe pH-Werte auf wie die Standortgruppe Wa 2. Bei all diesen Standorten wird der Richtwert für lösliche Zinkgehalte überschritten. Auch der lösliche Cadmium-Gehalt ist erhöht oder übersteigt teilweise den Richtwert. Auf die Problematik des tiefen pH-Wertes und dessen Auswirkungen auf die Löslichkeit und Mobilität der Schwermetalle, auf die Pflanzenverfügbarkeit und die Verlagerbarkeit

sowie auf das Gefährdungspotenzial wird in diesen Untersuchungen ebenfalls hingewiesen.

	La 1		La 2		La 3		BUWAL 2001b Median Ackerland [mg/kg]
	Median KABO [mg/kg]	KABO/ BUWAL	Median KABO [mg/kg]	KABO/ BUWAL	Median KABO [mg/kg]	KABO/ BUWAL	
Pb tot	30.2	1.5	25.7	1.3	18.9	1.0	19.5
Cd tot	0.472	2.0	0.324	1.4	0.174	0.7	0.24
Zn tot	65.8	1.3	72.4	1.5	43.3	0.9	49.6
Cu tot	19.7	1.0	23.2	1.2	12.4	0.6	20.1
Hg tot			0.273	3.7			0.073
F tot	732.6	1.8	623.6	1.5			404
Cu lösl.	0.102	1.5	0.097	1.4	0.059	0.8	0.07
Cd lösl.	0.001	0.3	0.001	0.3	0.001	0.3	0.003
Zn lösl.	0.050	1.0	0.050	1.0	0.050	1.0	0.051
Pb lösl.	0.025	5.0					0.005
F lösl.	10.7	1.3			19.2	1.2	8.3

Tabelle 12: Schadstoffgehalte der Landwirtschafts-Standortgruppen; Flächenproben 0 - 20 cm; Beprobung 1996/97; grau hinterlegt: Fünf oder mehr Messwerte

	Wa 1		Wa 2		BUWAL 2001b Median Wald [mg/kg]
	Median KABO [mg/kg]	KABO/BUWAL	Median KABO [mg/kg]	KABO/BUWAL	
Pb tot	42.4	1.6	27.9	1.1	26.0
Cd tot	0.748	3.7	0.150	0.8	0.20
Zn tot	71.6	1.6	33.6	0.7	45.5
Ni tot	21.7	1.2	11.9	0.6	18.1
Hg tot			0.152	1.4	0.105
Cr tot	34.7	1.8			19.8
F tot	994.0	2.9	363.2	1.0	345
Cd lösl.	0.002	0.2	0.014	1.4	0.01
Ni lösl.	0.025	0.2	0.174	1.4	0.122
Zn lösl.	0.167	0.9	1.024	5.4	0.189
F lösl.	6.1	2.0	2.9	0.9	3.10

Tabelle 13: Schadstoffgehalte der Wald-Standortgruppen; Flächenproben 0 - 20 cm, Beprobung 1996/97; grau hinterlegt: Fünf oder mehr Messwerte

Zusammenfassung der  
Schadstoffgehalte einzelner  
Standortgruppen

Bei den Jura-Standortgruppen La 1 und Wa 1 sind die Blei-, Zink- und vor allem Cadmium-Totalgehalte aufgrund des Ausgangsgesteins und der Aufkonzentration bei der Bodenbildung gegenüber den gesamtschweizerischen Vergleichswerten erhöht. Auch die grösseren Fluor-, Nickel- und Chrom-Totalgehalte der Jura-Standorte sind natürlichen Ursprungs.

Die Mittelland-Standortgruppen auf Moränen, Molassen und Schotter (La 3, Wa 2) weisen mit schweizerischen Medianwerten vergleichbare oder eher etwas tiefere Schadstoff-Totalgehalte auf.





Die Totalgehalte der Mittelland-Standortgruppe La 2 (Alluvialstandorte) sind gegenüber den schweizerischen Vergleichswerten erhöht. Sie dürften vorwiegend auf Einträge landwirtschaftlicher Hilfsstoffe zurückgehen.

Die löslichen Gehalte bei den Standortgruppen La 1, La 2, La 3 und Wa 1 liegen im Bereich der schweizerischen Vergleichswerte oder darunter.

Die löslichen Gehalte in der Wald-Standortgruppe Wa 2 (Mittelland) von Cadmium, Zink und Nickel liegen aufgrund der sauren bis stark sauren Bodenverhältnisse über den schweizerischen Vergleichswerten.

Hinweise auf geogene  
und anthropogene Anteile

### 5.3 Verteilung der Totalgehalte verschiedener Bodenschichten

Die Verteilung der Schadstoffgehalte in den verschiedenen Bodenhorizonten gibt Hinweise auf die Herkunft der Schadstoffe. In der Regel kann bei höheren Gehalten in oberflächennahen Horizonten auf anthropogene Einträge geschlossen werden. Höhere Gehalte in tieferen Bodenhorizonten deuten auf geogene Quellen hin.

Die 0 - 5 cm-Bodenproben weisen in der Regel geringere Raumgewichte auf als die 0 - 20 cm-Proben. Die Gehaltsunterschiede zwischen diesen beiden Schichten würden daher bei volumenbezogenen Angaben (mg/l) geringer ausfallen als bei gewichtsbezogenen (mg/kg). Bei der Interpretation der Gehaltsunterschiede wurde dieser Aspekt berücksichtigt.

#### 5.3.1 Flächenproben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm der Waldstandorte

In Anhang E werden die Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte der beiden Beprobungstiefen 0 - 5 cm und 0 - 20 cm einander gegenübergestellt. Einbezogen wurde jeweils die Beprobung 1996/97.

Bodenkennwerte

Beim Vergleich der beiden Bodenschichten 0 - 5 cm und 0 - 20 cm fällt der deutliche Unterschied im Humusgehalt der Standortgruppe Wa 2 auf. Der tiefere Gehalt in der Schicht 0 - 20 cm dürfte auf die sauren bis stark sauren Bodenverhältnisse zurückzuführen sein. Diese schränken sowohl die biologische Abbauleistung als auch die natürliche Bioturbation durch die Regenwürmer ein. Dadurch wird die Streu, die an der Oberfläche anfällt, nur sehr langsam abgebaut und die Abbauprodukte werden kaum verlagert. Bei günstigeren Bedingungen bezüglich Bodenreaktion, wie sie in der Gruppe Wa 1 anzutreffen sind, ist ein geringerer Unterschied im Humusgehalt zwischen den Schichten 0 - 5 cm und 0 - 20 cm feststellbar.

Totalgehalte Wa 1

Zwischen den 0 - 5 cm- und 0 - 20 cm-Bodenschichten bestehen kaum Unterschiede in den Cadmium-, Zink-, Nickel- und Blei-Totalgehalten. Dies deutet auf geogene Herkunft der Schwermetalle hin und bestätigt somit die Feststellung in Kapitel 5.2.

Totalgehalte Wa 2

Blei und Quecksilber weisen in der 0 - 5 cm-Schicht deutlich höhere Totalgehalte auf als im Bereich 0 - 20 cm. Dies deutet auf atmosphärische Einträge hin. Beide Elemente werden aufgrund der hohen Adsorptionskräfte in den obersten Bodenschichten immobilisiert. In den Cadmium-, Zink- und Nickel-Totalgehalten unterscheiden sich die beiden Schichten kaum. Bei Nickel ist dies auf den geogenen Ursprung zurückzuführen. Bei Cadmium und Zink sind entweder die luftbürtigen Einträge geringer als bei Blei und Quecksilber, oder sie wurden aufgrund der sauren Bodenbedingungen bereits gelöst und in tiefere Bodenschichten verlagert.

In Anhang F werden die Standorte der Gruppe Wa 2 nach ihrer Distanz zu Emittenten gemäss Angaben in Kapitel 3.2.3 in zwei Gruppen unterteilt. Die emittentennahen Standorte weisen in beiden Schichten deutlich höhere Cadmium- und Zink- und teilweise auch Bleigehalte auf als die emittentfernen Standorte.

### 5.3.2 Profilproben

An fünf Wald-Standorten der Gruppe Wa 2 wurden zusätzlich zu den Flächen auch je ein Bodenprofil beprobt. Von den drei Profilen 259tull, 268su und 273of (emittentennahe Standorte gemäss Kapitel 3.2.3) wurden Bodenkenngrössen und Schadstoffgehalte analysiert. Die Messwerte sind in Anhang O3 aufgelistet und in Anhang G grafisch dargestellt. Auch sie geben Aufschluss über das Verhalten von Schadstoffen, die hauptsächlich über die Luft in den Boden eingetragen werden.

Bodenkennwerte

Der Boden 259tull ist als „sauer“ (pH CaCl<sub>2</sub>-Werte 4.3 - 5.0) und die anderen beiden Böden sind als „stark sauer“ (pH CaCl<sub>2</sub>-Wert: 3.3 - 4.2) zu klassieren. Die pH-Werte streuen in den verschiedenen Bodenhorizonten bei allen drei Profilen nur wenig.

Totalgehalte  
(oberflächennahe Horizonte)

Die Standorte 268su und 273of weisen bei den Blei- und Quecksilber-Totalgehalten deutliche und bezüglich Cadmium- und Zink-Totalgehalten mässige Anreicherungen im obersten Horizont auf. Die Nickel-Totalgehalte nehmen mit zunehmender Profiltiefe tendenziell zu. Wie bereits in Kapitel 5.3.1 beschrieben, werden die atmosphärischen Blei- und Quecksilber-Einträge aufgrund der starken Adsorption in den beiden obersten Bodenhorizonten immobilisiert. Die relativ geringere Anreicherung von Cadmium und Zink dürfte auf deren höhere Löslichkeit und deren Verlagerung in tiefere Schichten oder auf insgesamt geringere luftbürtige Einträge zurückzuführen sein. Die Nickelkurve weist eindeutig auf eine geogene Herkunft dieses Schwermetalls hin.

Die Blei-Tiefenverteilung bei Standort 259tull deutet auf geringeren atmosphärischen Eintrag hin als die Blei-Tiefenverteilung der beiden anderen Standorte. Das Cadmium ist wie bei den beiden anderen Standorten leicht angereichert.

Tiefenprofile der  
fünf Standortgruppen

Zur Abschätzung der geogenen beziehungsweise der anthropogenen Ursache von Schadstoffanreicherungen aller fünf Standortgruppen werden von diesen Gruppen ebenfalls Tiefenprofile dargestellt. Basierend auf Daten der ersten Hauptuntersu-



chung wird in Anhang H1 die Schadstoff-Tiefenverteilung (Totalgehalte) aller fünf Standortgruppen in Form von Box-Plots gezeigt. Die Horizonte der 38 Profile wurden für diese Auswertung generalisiert. Anhang H2 zeigt die durchschnittlichen (generalisierten) Tiefenbereiche der für diese Darstellung verwendeten Horizonte. Bei den Landwirtschaftsstandorten werden die Schadstoffgehalte der Horizonte A, B1, B2, B3/BC und C, bei den Waldstandorten jene der Horizonte A1, A2, B1, B2, B3/BC und C dargestellt.

Als Beispiel sei die Bleiverteilung der beiden Waldstandortgruppen Wa 1 und Wa 2 kommentiert. Beide Gruppen weisen im A1-Horizont annähernd gleiche Bleigehalte auf. In der Gruppe Wa 2 fallen aber bei den Horizonten A2 und B1 die gegenüber A1 deutlich geringeren Gehalte auf. Bei der Gruppe Wa 1 besteht kaum ein Gefälle zwischen diesen drei Horizonten. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Bleigehalte in den A1-Horizonten auf Richtwerthöhe bei der Gruppe Wa 1 natürlichen und bei der Gruppe Wa 2 anthropogenen Ursprungs (atmosphärischer Eintrag) sind.

Weiter zeigt diese Abbildung unter anderem, dass Kupferanreicherungen auf anthropogene Einträge, darunter vor allem direkte und zu einem kleinen Anteil auch atmosphärische Einträge, zurückgeführt werden können, dass die Fluoranreicherung praktisch ausschliesslich geogenen Ursprungs ist und dass bei Chrom nebst einem vorwiegend geogenen Anteil auch direkte Einträge über landwirtschaftliche Hilfsstoffe zu Anreicherungen führen können.

#### **5.4 Überblick über Schadstoffquellen und Belastungsmuster**

Die in Kapitel 5.2 und 5.3 hergeleiteten Aussagen sind in Tabelle 14 zusammenfassend dargestellt. Die Schadstoffanreicherungen der Elemente Blei, Cadmium, Zink, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Chrom und Fluor sind anteilmässig den verschiedenen Belastungsquellen zugeordnet (= Belastungsmuster). Die Höhe der Schadstoffbelastung kann daraus nicht abgelesen werden. Diese Tabelle dient als Grundlage für die Beurteilung des anthropogenen Anteils an Schadstoffanreicherungen sowie zur Ermittlung der Ursachen von Gehaltsveränderungen.

Belastungsquelle:	anthropogen		geogen (lithogen und pedogen)		
Herkunft :	Direkter Stoffeintrag	Atmosphärischer Stoffeintrag	Kalkhaltige Gesteine	Alluvionen	Moränen, Schotter, Molasse
Region:	Jura/Mittelland	Jura/Mittelland	Jura	Mittelland	Mittelland
Standortgruppen:	La 1, La 2, La 3	alle	La 1, Wa 1	La 2	La 2, La 3, Wa 2
Pb	x	xx	x(x)	-	-
Cd	xx	x(x) <sup>1)</sup>	xx	-	-
Cu	xxx	(x)	-	-	-
Zn	xx	x(x) <sup>1)</sup>	xx	-	-
Hg	xx	xx	-	-	-
Ni	-	-	xxx	x	-
Cr	(x)	-	xxx	x	-
F	-	-	xxx	x	-

Tabelle 14: Quellen der Schadstoff-Anreicherungen in 0 - 20 cm Tiefe (Belastungsmuster)

<sup>1)</sup> in stark sauren Böden ist die Eintragshöhe wegen geringem Rückhaltevermögen schwierig abzuschätzen;

Legende: "-" = kein, x = geringer, xx = mittlerer, xxx = überwiegender Anteil

## 5.5 Gefährdungspotenziale bei den sauren Waldböden

Die Waldstandortgruppe Wa 2 zeichnet sich durch saure bis stark saure Bodenverhältnisse aus. Diese Eigenschaft prägt das Schadstoffverhalten im Boden und ist die Ursache verschiedener Gefährdungspotenziale.

### 5.5.1 Ursachen und Auswirkungen der anthropogenen Bodenversauerung

Die Bodenversauerung ist ein natürlicher Vorgang. Sie wird aber durch anthropogene, luftbürtige Einträge von Säuren und Säurebildnern, vor allem Schwefeldioxid und Stickoxide, erheblich beschleunigt. Dank grossen Anstrengungen konnte unter anderem auch im Kanton Aargau die bisherige Schwefeldioxid-Belastung wesentlich reduziert werden (Kanton Aargau, 2000).

Stickstoffeinträge  
im Kanton Aargau

Stickoxide als Säurebildner und Mitverursacher der Bodenversauerung entstehen bei allen Arten von Verbrennungsvorgängen. Hauptverursacher sind der Verkehr (ca. 65%) und die Industrie (ca. 20%). In den ländlichen Gegenden des Kantons Aargau konnten in den letzten Jahren die Stickoxidkonzentrationen in der Luft reduziert werden. Hingegen sind an verkehrsexponierten Standorten, wie zum Beispiel Windisch, Lenzburg, Aarau und Aargau, die LRV-Jahresmittel-Grenzwerte für Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) von 30 µg/m<sup>3</sup> deutlich überschritten (Kanton Aargau, 1999).

Gemäss NABEL (1998) hat der Stickstoffeintrag aus dem Regen in den letzten Jahren generell nur unwesentlich abgenommen. Dieser Stickstoffeintrag liegt – wie auch der Säuregehalt des Regens – noch immer über den kritischen Belastungsgrenzen für empfindliche Ökosysteme. Beide tragen daher hauptsächlich zur anthropogenen Bodenversauerung bei.



Bodenversauerung  
und pH-Wert

Gemäss Scheffer/Schachtschabel (1998) haben vor allem die erhöhten Säureeinträge aus der Luft in den letzten 40 und mehr Jahren zu einer starken Versauerung der obersten Bodenhorizonte geführt. In vielen Gebieten Deutschlands sind in dieser Zeit pH-Abnahmen um mehr als eine pH-Einheit, z.B. von pH (CaCl<sub>2</sub>) 4.5 auf 3.3, in Oberböden von Waldstandorten festgestellt worden. Auch Fitze et. al. (1991) kommen aufgrund von pH-Messungen von 1969 und 1988 in Waldböden zur Annahme, dass bereits kurzzeitig nachweisbare Verschiebungen zahlreicher Waldböden in saurere Pufferbereiche auf anthropogen beschleunigte Versauerungsprozesse zurückzuführen sind.

### 5.5.2 Beurteilung des Gefährdungspotenzials der Schwermetallverlagerung und -verfügbarkeit

Relative Bindungsstärke

Die ökotoxikologische Relevanz der Schwermetalle wird weitgehend durch deren Löslichkeit und damit durch deren Verlagerbarkeit und Verfügbarkeit bestimmt. Die löslichen Anteile sind stark vom Rückhaltevermögen und vom pH-Wert des Bodens abhängig. Mit der „relativen Bindungsstärke“ kann das Vermögen der Böden beurteilt werden, Schadstoffe so festzuhalten, dass sie weder durch Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen in schädlichen Konzentrationen aufgenommen werden, noch ins Oberflächen- und Grundwasser gelangen können (DVWK, 1988, zit. in Blume, 1990). Die relative Bindungsstärke wird anhand des pH-Wertes sowie des Ton- und Humusgehaltes für jedes einzelne Element berechnet. Mit abnehmender relativer Bindungsstärke eines Bodens nimmt das Rückhaltevermögen ab und damit die umweltgefährdende Wirkung der Schwermetalle zu.

Rückhaltevermögen der  
Flächenproben 0 - 20 cm

Tabelle 15 zeigt für die fünf Standortgruppen die Mittelwerte der relativen Bindungsstärke. Die Berechnung erfolgte nach Unterlagen von Schulin (1996). Die pro Standort und Element berechneten relativen Bindungsstärken sind in Anhang I aufgelistet. Auffällig sind vor allem die geringen bis mittleren Bindungsstärken der drei Elemente Cadmium, Zink und Nickel der Standortgruppe Wa 2. Die Filter- und Pufferfunktion dieser Standorte kann als beeinträchtigt beurteilt werden. Die anderen Standortgruppen weisen ein annähernd intaktes Rückhaltevermögen auf.

		Cd	Zn	Ni	Cu	Pb
Landwirtschaft	La 1	5.0	5.0	-	5.0	5.0
	La 2	4.9	4.9	-	5.0	5.0
	La 3	4.4	4.6	-	5.0	5.0
	124ab	5	5	-	5.0	5.0
Wald	Wa1	4.6	4.9	4.9	-	5.0
	Wa 2	2.0	2.5	2.7	-	4.9
	234mu	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Tabelle 15: Relative Bindungsstärken von Schwermetalle der Flächenproben 0 - 20 cm; Mittelwerte der fünf Standortgruppen sowie der Standorte 124ab und 234mu; Beprobung 1996/97

Legende: Rel. Bindungsstärke 1: sehr gering, 2: gering, 3: mittel, 4: stark, 5: sehr stark  
-: keine Werte

In Tabelle 16 sind die relativen, horizontbezogenen Bindungsstärken von Blei, Cadmium und Zink der drei Bodenprofile 259tull, 268su und 273of aufgeführt. Bei diesen drei Profilen handelt es sich um Vertreter der Standortgruppe Wa 2 (siehe Kapitel 5.3.2). In fast allen Horizonten ist die relative Bindungsstärke für Cadmium sehr gering bis gering und jene für Zink gering bis mittel.

Aufgrund der Angaben in den Tabellen 15 und 16 wird davon ausgegangen, dass die relativen Bindungsstärken für Cadmium und Zink der gesamten Gruppe Wa 2 profulumfassend gering sind und daher ein Gefährdungspotenzial besteht.

	Horizont	Pb	Cd	Zn
259tull	Ah(g)	5.0	4.0	4.5
	Ahcn	5.0	2.0	2.5
	Bw	5.0	1.5	2.5
	BC(g)	5.0	2.0	3.5
	C1	5.0	2.0	3.5
	C2	5.0	2.0	3.5
268su	Aacn	5.0	2.5	3.0
	Ah	5.0	2.0	2.5
	(A)B	4.5	1.5	2.5
	B(l)	4.5	1.5	2.5
	B(t)cn	4.5	1.5	2.5
	BC(g)	5.0	2.0	3.5
273of	Aa/h	4.5	1.5	2.0
	Ah	4.5	1.5	2.0
	Bw	4.5	1.5	2.5
	BC1	4.5	1.5	2.5
	BC2	4.5	1.5	2.5
	C(x)	5.0	1.5	2.5
	Cx	5.0	1.5	2.5

Tabelle 16: Relative Bindungsstärken der Schwermetalle von drei Profilen; Beprobung 1996/97

Legende: Rel. Bindungsstärke 1: sehr gering 2: gering 3: mittel 4: stark 5: sehr stark

#### Fazit

Die Landwirtschafts-Standortgruppen La 1, La 2, La 3 sowie die Wald-Standortgruppe Wa 1 weisen starke bis sehr starke relative Bindungsstärken auf. Die Mobilisierungstendenz und demzufolge die Pflanzenverfügbarkeit und Verlagerbarkeit von Schadstoffen ist als gering bis sehr gering einzuschätzen.

Die Wald-Standortgruppe Wa 2 zeigt geringe bis mittlere relative Bindungsstärken für Cadmium, Zink und Nickel. Das Filter- und Puffervermögen und damit eine zentrale Funktion der Böden kann beeinträchtigt sein. Es besteht die Gefahr, dass Schadstoffe verlagert oder für Pflanzen verfügbar werden.

#### Erhöhte Schwermetalllöslichkeit

Anhang K zeigt, dass - unabhängig vom Totalgehalt - mit abnehmendem pH-Wert die löslichen Gehalte zunehmen. Für die Abbildung wurden die 0 - 5 cm- und 0 - 20 cm-Proben der Waldstandorte verwendet. Der hohe Anteil an Richtwertüberschreitungen von löslichen Gehalten in der Wald-Standortgruppe Wa 2 ist auf diese Zusammenhänge zurückzuführen. Es besteht damit Gefahr, dass die löslichen



Schadstoffe vermehrt durch Pflanzen aufgenommen oder ins Grundwasser verfrachtet werden.

### 5.5.3 Gefährdungspotenzial der Aluminium-Toxizität

Al-Wirkung auf Wurzeln

Wenn der pH-Wert unter 4.2 absinkt, geht Aluminium (Al) in eine lösliche Form über. Bei Al-Konzentrationen in der Bodenlösung von 10 - 20 mg/l können gemäss Scheffer/Schachtschabel (1998) toxische Aluminium-Wirkungen auf die Wurzeln, insbesondere auf die Feinwurzeln, der Waldbäume und deren Mykorrhiza-Systeme auftreten. Das Verhältnis von Kalzium zu Aluminium (Ca/Al) und von Magnesium zu Aluminium (Mg/Al) in der Bodenlösung bzw. an den Austauschern ist ein gutes Mass für eine mögliche Al-Toxizität. So ist offenbar bei Ca/Al-Verhältnissen in der Bodenlösung von  $< 1$  eine Schädigung von Fichtenwurzeln möglich, bei Verhältnissen von  $< 0.1$  unvermeidbar.

In Anhang L sind der Kalzium- und der Aluminiumbesatz der Kationenaustauscher (KAK Ca, KAK Al) sowie das Verhältnis KAK Ca zu KAK Al in Abhängigkeit des pH-Wertes dargestellt. Es wurden alle Profilproben der ersten Hauptuntersuchung (KABO AG 1994) für die 16 ausgewählten Waldstandorte verwendet.

Standorte mit möglicher Al-Toxizität

Unter der Annahme, dass das Verhältnis Ca/Al am Austauscher in etwa jenem in der Bodenlösung entspricht, weisen einige Standorte kritische (Quotient  $< 1$ ) bis sehr kritische (Quotient  $< 0.1$ ) Ca/Al-Verhältnisse auf. Die meisten Standorte der Wald-Standortgruppe Wa 2 zeigen in mindestens einem Horizont ein KAK Ca zu KAK Al-Verhältnis von  $< 1$  (Schädigung von Wurzeln möglich). Es sind dies 237eg, 239ob, 240zo, 257ru, 259tull, 263mo, 268su, 269le, 273of. Davon weisen die vier Standorte 239ob, 240zo, 257ru, 273of in mindestens einem Horizont ein KAK Ca zu KAK Al-Verhältnis von  $< 0.1$  auf (Schädigung von Wurzeln anscheinend unvermeidbar). In Untersuchungen des Institutes für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP, 1999) wurden solche Schädigungen nachgewiesen. Als Folge der ungenügenden Durchwurzelung des Bodens werden die Waldbäume gegenüber Trockenheit und Windwurf anfällig.

### 5.5.4 Weitere Gefährdungspotenziale

Gemäss Angaben in der Fachliteratur ist bei Bodenverhältnissen, wie sie in der Gruppe Wa 2 festgestellt wurden, mit weiteren Gefährdungspotenzialen zu rechnen.

Nährstoffverarmung der Böden

Auf verschiedenen Beobachtungsflächen hat das IAP (1999) zwischen 1984 und 1996 – vor allem in Flächen mit höherer Säuredeposition – eine messbare Versauerung der Böden festgestellt. Parallel zur Bodenversauerung hat der Vorrat an basischen Kationen wie Kalium, Kalzium und Magnesium abgenommen.

Degradierung der Böden

Bei pH-Werten  $< 5.0 - 4.5$  findet eine zunehmende Auflösung von Aluminium-Oxiden und eine Zerstörung von Tonmineralien und anderen Silikaten statt. Da-

durch wird eine irreversible Degradierung der Böden bewirkt (Scheffer/Schachtschabel, 1998).

Einschränkung der biologischen Aktivität

Bei pH-Werten  $< 3.5 - 4$  sind Lumbriciden (Regenwürmer) in der Regel kaum noch in Waldböden zu finden. Von den Mikroorganismen sind Bakterien, die generell die höchsten Abbauleistungen erbringen, kaum noch aktiv (Scheffer/ Schachtschabel, 1998).

Beeinträchtigung der Verankerung von Waldbäumen

Auf stark versauerten Böden wurden gemäss Zysset et al., (1996, zitiert in WSL/BUWAL, 1999) Schäden an den Feinwurzeln beobachtet. Dadurch wird die Verankerung der Bäume im Boden beeinträchtigt und ihre Sturmanfälligkeit erhöht.

Zusammenfassung: Einschränkung der Bodenfunktionen

Aufgrund der sauren bis stark sauren Bodenverhältnisse in der Standortgruppe Wa 2 ist von Beeinträchtigungen der meisten Bodenfunktionen auszugehen:

- Lebensraum für Bodenorganismen
- Pflanzenstandort
- Lebensgrundlage für Mensch, Tier und Pflanzen
- Filter- und Pufferfunktion
- Abbau, Umbau und Aufbau von Stoffen

Gefährdungspotenzial saurer Böden

Bedingt durch die tiefen pH-Werte ist mit beeinträchtigten Bodenfunktionen der Wald-Standortgruppe Wa 2 und mit verminderter Bodenfruchtbarkeit zu rechnen. Als besonders kritisch sind diejenigen Böden dieser Standortgruppe einzustufen, welche anthropogenen Belastungen mit Schadstoffen ausgesetzt sind. Die atmosphärisch eingebrachten Schadstoffe liegen hier in hohem Grade in löslicher Form vor. Damit sind sie pflanzenverfügbar oder können ins Grundwasser verlagert werden.

## 6. Veränderungen der Messwerte nach fünf Jahren

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, werden sämtliche Veränderungen zwischen den Beprobungen 1991/92 und 1996/97 aufgrund der Ergebnisse der Parallelanalytik beurteilt. Die Analysenresultate der Proben 1996/97 ( $P_2A_1$ ) werden mit denjenigen der archivierten Proben 1991/92 ( $P_1A_2$ ) verglichen.

### 6.1 Übersicht über die Veränderungen

In Anhang N1 – N3 wird eine Übersicht über die zeitlichen Veränderungen der Messwerte sämtlicher Standorte an Hand von Streudiagrammen gegeben. Die konkrete, standortbezogene Beurteilung der Zu- und Abnahmen der wichtigsten Elemente erfolgt in Kapitel 7.





Aus den Streuungsdiagrammen wird ersichtlich, dass sich die beiden Nutzungskategorien Landwirtschaft und Wald im Veränderungsmuster einiger Parameter unterscheiden. Bei den Landwirtschaftsstandorten fallen generelle Zunahmen bei den pH-Werten und Abnahmen bei den löslichen Kupfergehalten auf. Bei den Waldstandorten zeigen die Streuungsdiagramme Zunahmen beim Humusgehalt und bei den Blei-Totalgehalten sowie Abnahmen bei den löslichen Cadmium- und Zinkgehalten. In den nachfolgenden Kapiteln werden mögliche Ursachen dieser Veränderungen diskutiert.

## 6.2 Veränderungen der Anzahl Richtwertüberschreitungen

In Tabelle 17 sind die Richtwertüberschreitungen der Proben 1991/92 ( $P_1A_2$ ) und 1996/97 ( $P_2A_1$ ) dargestellt. Bei Elementen, deren Richtwert nur in einer der beiden Proben überschritten ist, wird in Klammern der geringere Gehalt in Prozent des Richtwerts angegeben.

Anzahl Standorte mit Richtwertüberschreitungen

Von den 38 in der zweiten Hauptuntersuchung analysierten Standorten weisen 19 Standorte bei der Beprobung 1991/92 ( $P_1A_2$ ) und 17 Standorte bei der Beprobung 1996/97 ( $P_2A_1$ ) Richtwertüberschreitungen auf. An den beiden Standorte 234mu und 255zu, bei denen 1991/92 noch Richtwertüberschreitungen vorkamen, wurden 1996/97 alle Richtwerte eingehalten.

Bei den Totalgehalten wurden sowohl 1991/92 als auch 1996/97 an je zehn Standorten Richtwertüberschreitungen festgestellt. Dabei wurde eine Richtwertüberschreitung nicht mehr bestätigt. Bei einem Standort kam neu eine Richtwertüberschreitung dazu.

Anzahl Richtwertüberschreitungen

Insgesamt sind in der Beprobung 1991/92 ( $P_1A_2$ ) 30, in der Beprobung 1996/97 ( $P_2A_1$ ) 27 Richtwertüberschreitungen festgestellt worden. Bei den Totalgehalten wurden 1996/97 ( $P_2A_1$ ) zwei Richtwertüberschreitungen mehr gemessen als bei der Beprobung 1991/92 ( $P_1A_2$ ), und zwar beim Blei der Waldstandorte 222ob und 269le. Die Überschreitung des Kupfer-Richtwertes (Totalgehalt) beim Standort 234mu bestätigte sich nicht. Bei den löslichen Gehalten sind die Veränderungen von Richtwertüberschreitungen aufgrund von generell hohen Streuungen der Messwerte mit Vorsicht zu interpretieren (siehe Kapitel 4.2.5). Fünf Richtwertüberschreitungen der löslichen Gehalte konnten nicht bestätigt werden; eine Überschreitung kam neu dazu.

Fazit

Bei der zweiten Hauptuntersuchung wurden die Richtwertüberschreitungen der ersten Hauptuntersuchung im Wesentlichen bestätigt.



	Totalgehalte			Lösliche Gehalte		
	1991/92 (P <sub>1</sub> A <sub>2</sub> )	1996/97 (P <sub>2</sub> A <sub>1</sub> )	Veränderung P <sub>1</sub> A <sub>2</sub> zu P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	1991/92 (P <sub>1</sub> A <sub>2</sub> )	1996/97 (P <sub>2</sub> A <sub>1</sub> )	Veränderung P <sub>1</sub> A <sub>2</sub> zu P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>
Landwirtschaft:						
122ku	F	F				
155el	F	F				
157sc	Cu	Cu		Cu	(Cu 94%)	-1
159st	Cd	Cd				
160un	Cd	Cd				
Wald:						
221wi	Pb, Cr	Pb, Cr				
222ob	(Pb 88%), Cd, F	Pb, Cd, F	+1			
226vi	Cd	Cd				
234mu	Cu	(Cu 92%)	-1			
237eg				(Ni 93%), Zn	Ni, Zn	+1
239ob				Zn, Ni	Zn, Ni	
240zo				Zn	Zn	
255zu				Ni	(Ni 94%)	-1
257ru				Zn	Zn	
259tull				Cd, Zn	Cd, Zn	
263mo				Cd, Zn	(Cd 85%), Zn	-1
268su				Cd, Zn	Cd, Zn	
269le	(Pb 90%)	Pb	+1	Cd, Zn	Cd, Zn	
273of	Pb	Pb		Cd, Zn, Ni	(Cd 65%), Zn, (Ni 86%)	-2

Tabelle 17: Richtwertüberschreitungen in den Beprobungen 1991/92 (P<sub>1</sub>A<sub>2</sub>) und 1996/97 (P<sub>2</sub>A<sub>1</sub>)  
Angaben in Klammern: Gehalt relativ zum VBBo-Richtwert

RW-Überschreitungen der ersten Hauptuntersuchung (Proben P<sub>1</sub>A<sub>1</sub>)

Die Veränderungen der Richtwertüberschreitungen, die in Tabelle 17 dargestellt sind, beruhen auf Analysenergebnissen der Parallelanalytik, wie sie generell beim KABO AG angewendet wird. Der Vollständigkeit halber werden in Tabelle 18 die ursprünglichen Richtwertüberschreitungen des KABO AG-Berichtes 1994 (P<sub>1</sub>A<sub>1</sub>) mit den Richtwertüberschreitungen der analysierten Archivproben 1991/92 (P<sub>1</sub>A<sub>2</sub>) verglichen. Es werden also zwei Analysenwerte derselben Probe miteinander verglichen und beurteilt. Die Interpretation der P<sub>1</sub>A<sub>1</sub>-Proben erfolgte anhand der VSBo-Richtwerte und jene der P<sub>1</sub>A<sub>2</sub>-Proben anhand der VBBo-Richtwerte.



	Anzahl		P <sub>1</sub> A <sub>1</sub> :	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub> :	Differenz	Ursachen
	Landwirt- schaft	Wald	VSBo	VBBo		
Pb tot	22	16	3	2	-1	Messungenauigkeit (222ob)
Cd tot	22	16	5	4	-1	Messungenauigkeit (124ab)
Zn tot	22	16	0	0		
Cu tot	22	1	2	2		
Ni tot	0	16	0	0		
Cr tot	0	4	0	1	+1	Richtwert-Herabsetzung
Hg tot	3	4	0	0		
F tot	5	3	7	3	-4	Richtwert-Erhöhung
Pb lösl	2	1	0	-		
Cd lösl	22	16	2	5	+3	Richtwert-Herabsetzung
Zn lösl	22	16	9	9		
Cu lösl	22	0	1	1		
Ni lösl	0	16	4	3	-1	Messungenauigkeit (257ru)
F lösl	5	3	0	0		

Tabelle 18: Richtwert-Überschreitungen bei P<sub>1</sub>A<sub>1</sub> (Proben und Analysen 91/92) und P<sub>1</sub>A<sub>2</sub> (Proben 91/92, Analysen 96/97)

-: in VBBo kein Richtwert mehr

Von den insgesamt elf Veränderungen der Richtwertüberschreitungen sind acht durch die Revision der Richtwerte (VSBo-Richtwerte zu VBBo-Richtwerte) bedingt. Die Messungenauigkeiten bei zwei Totalgehalten und bei einem löslichen Gehalt lassen sich auf folgende Ursachen zurückführen:

- Analytikfehler (siehe Kapitel 4.1)
- Zwei unterschiedliche Labors in der ersten Hauptuntersuchung
- Allfällige Instabilität der löslichen Gehalte von archivierten Proben

### 6.3 Veränderungen der Totalgehalte

#### 6.3.1 Beurteilungskriterien

Zur Beurteilung der signifikanten Unterschiede zwischen den Messwerten der Beprobung 1991/92 (P<sub>1</sub>A<sub>2</sub>) und der Beprobung 1996/97 (P<sub>2</sub>A<sub>1</sub>) werden die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen 1999 (ITÖ, 2001, siehe Kapitel 4.2.2) herangezogen. Die Konfidenzintervalle des Standortes 273of werden auf die 38 analysierten Standorte der zweiten Hauptuntersuchung übertragen.

Es stellt sich die Frage, ob die signifikanten Abweichungen auch umweltrelevant sind. In Anlehnung an BUWAL (2000) wird als Relevanzkriterium eine positive oder negative Konzentrationsveränderung von mehr als 5% des Richtwertes festgelegt und als Relevanzgrenze bezeichnet. Die Bezugnahme auf die Richtwerte ist auch deshalb sinnvoll, weil dadurch bei tiefen Konzentrationen geringe absolute Veränderungen prozentual weniger stark zum Ausdruck kommen, als wenn diese auf die Messwerte bezogen werden.

Signifikante Änderungen/  
Konfidenzintervalle

Umweltrelevante  
Veränderungen

Signifikante und relevante Veränderungen

Veränderungen, die sowohl das Konfidenzintervall als auch die Relevanzgrenze überschreiten, werden als signifikante und relevante Veränderungen bezeichnet.

In Tabelle 19 sind diejenigen Werte dargestellt, mit denen die Konzentrationsänderungen aller 38 Standorte beurteilt wurden. Die Konfidenzintervalle entsprechen jenen des Standortes 273of.

	Einheit	Cd tot	Cu tot	Pb tot	Zn tot	Cr tot	Hg tot
Konfidenzintervalle	[% d. RW]	1.4	0.6	7.4	1.6	2.3	1.8
	[mg/kg]	0.01	0.25	3.7	2.4	1.2	0.01
Relevante Veränderung (5% d. RW)	[mg/kg]	0.04	2.0	2.5	7.5	2.5	0.025
signifikante u. relevante Veränderung	[% d. RW]	5	5	7.4	5	5	5
	[mg/kg]	0.04	2.0	3.7	7.5	2.5	0.025

Tabelle 19 : Kriterien für signifikante und relevante Änderungen (Grundlagen: Tabelle 7)

### 6.3.2 Beurteilung der Veränderungen

In Abbildung 3 ist die Veränderung der Schwermetall-Totalgehalte zwischen 1991/92 und 1996/97 dargestellt (Quelle: ITÖ, 2001). Die Differenzen der Totalgehalte, die Konfidenzintervalle und die Relevanzgrenzen sind in Relation zum Richtwert aufgetragen. Tabelle 20 enthält die Änderungen in absoluten Zahlen.

Veränderungen relativ zum VBBo-Richtwert

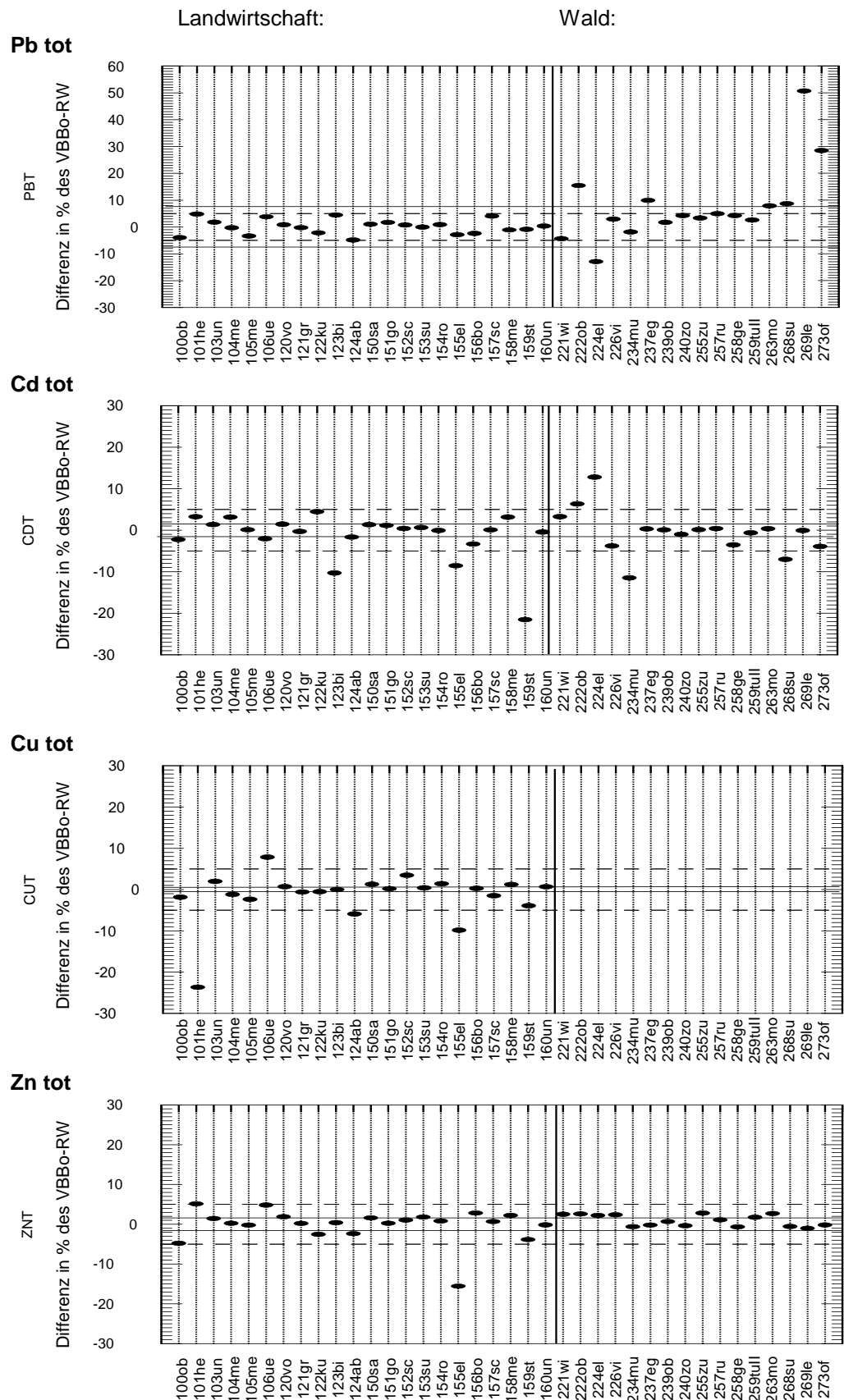
Die Differenzen der Totalgehalte der beiden Hauptuntersuchungen lagen für Cadmium zwischen einer Abnahme von -21.5% des Richtwertes (RW) bis zu einer Zunahme von +12.7% des RW, für Kupfer von -23.6% bis +7.8% des RW, für Blei von -12.9% bis 50.6% des RW und für Zink von -15.5% bis +5.1% des RW. Für Kupfer betrug an einem Standort (Waldstandort 234mu) die zeitliche Änderung ca. 140% des RW (91: 92.6 mg/kg; 96: 37.3mg/kg). Dieser Wert ist in Abbildung 3 nicht enthalten.

Fazit

Die grosse Spannbreite der Konzentrationsveränderungen ist auf einige wenige Messungen zurückzuführen. An den meisten Standorten weichen die Totalgehalte der Schwermetalle in der zweiten Hauptuntersuchung um weniger als 5% von der Ersterhebung ab, wenn man beide Messergebnisse auf den Richtwert bezieht.

Umweltrelevante Veränderungen

Differenzen der Konzentrationen, die grösser sind als die 5%-Relevanzgrenze (gestrichelte Linie), treten bei Blei und Cadmium an je sieben Standorten, bei Kupfer an fünf, bei Zink an zwei sowie bei Nickel und Quecksilber an je einem Standort auf. Es wurden sowohl zu- als auch abnehmende Gehalte nachgewiesen.



**Abbildung 3** Differenzen der Totalgehalte zwischen 1991/92 und 1996/97

Legende: gestrichelte Linie: Relevanzgrenze gemäss BUWAL 2000 (5 % des RW)  
durchgezogene Linie: 95 % Konfidenzintervall

Grundlage: ITÖ, 2001

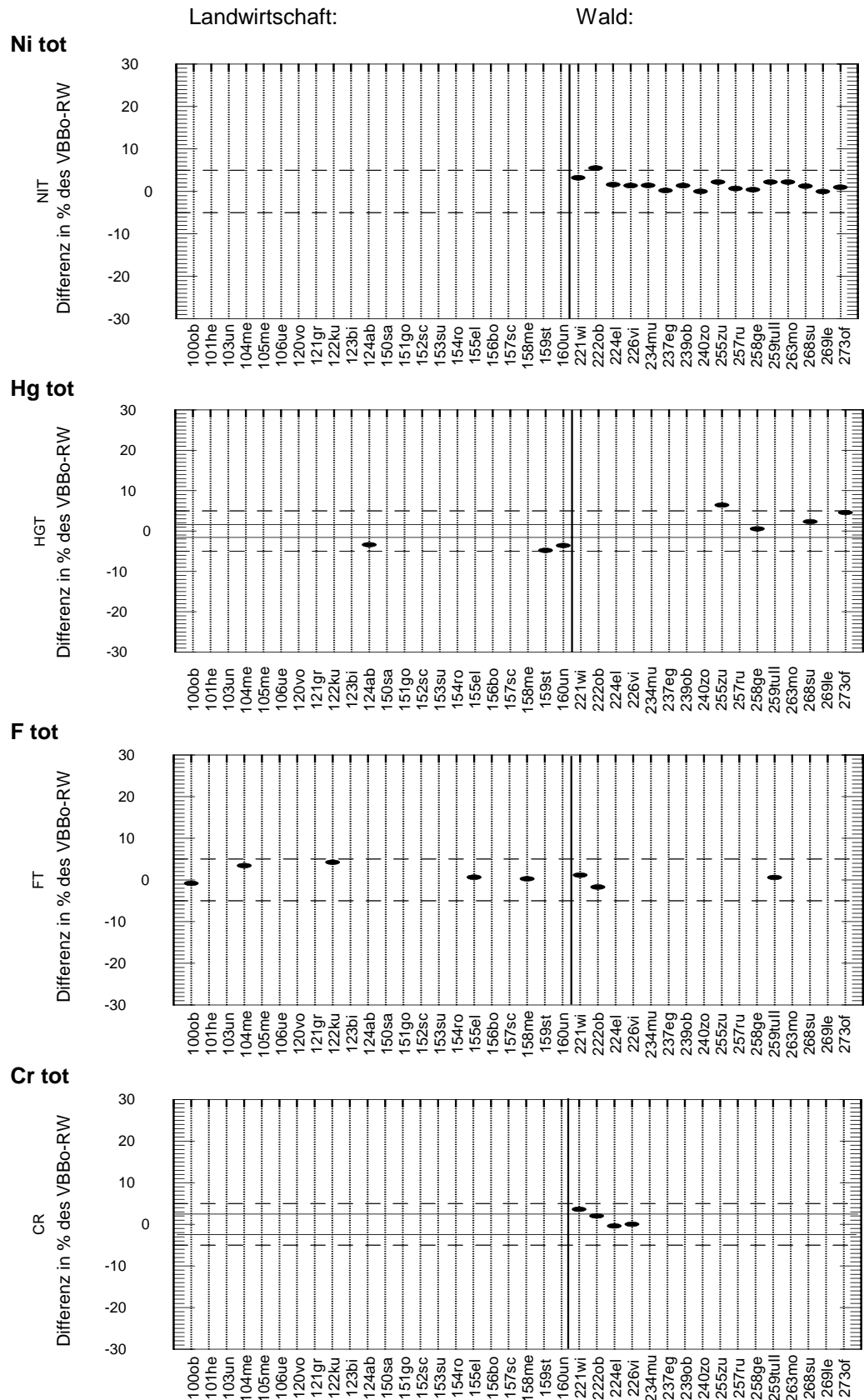


Abbildung 3: Differenzen der Totalgehalte zwischen 1991/92 und 1996/97

Legende: gestrichelte Linie: Relevanzgrenze gemäss BUWAL 2000 (5 % des RW)  
durchgezogene Linie: 95 % Konfidenzintervall

Grundlage: ITÖ, 2001



Bei Blei fällt auf, dass grössere Abweichungen nur auf Waldstandorten vorkommen.

Signifikante Änderungen

Vergleicht man die auf der Basis der getroffenen Annahmen geschätzten Konfidenzintervalle (durchgezogene Linien) mit den Konzentrationsdifferenzen, so zeigt sich, dass für Blei nur wenige Änderungen der Totalgehalte als signifikant klassiert werden konnten, d.h. an den meisten Standorten lagen die Differenzen der Blei-Werte innerhalb des Streubereichs, der durch Extraktion und Analyse verursacht ist. Für Kupfer, Cadmium, Zink, Chrom und Quecksilber waren hingegen an einigen Standorten die Differenzen grösser als das geschätzte Konfidenzband, lagen jedoch, wie oben erwähnt, zumeist unterhalb der 5% Relevanzgrenze.

Fazit

Bei 15 der 38 untersuchten *KABO-Standorte* werden Veränderungen von Schadstoff-Totalgehalten als signifikant und relevant klassifiziert. Dies betrifft sechs Landwirtschafts- und neun Waldstandorte.

Bei den Landwirtschaftsstandorten treten bei einem Standort signifikante und relevante Zunahmen, bei vier Standorten Abnahmen und bei einem Standort Zu- und Abnahmen auf. Bei drei der sechs Standorte nimmt der Cadmium-Gehalt ab.

Bei sechs Waldstandorten sind Zunahmen, bei einem Abnahmen und bei zwei Standorten sowohl Zu- als auch Abnahmen zu verzeichnen. In sechs Fällen nahm der Bleigehalt zu.

#### 6.4 Veränderungen der Bodenkennwerte und löslichen Gehalte

Lösliche Schadstoffgehalte

Die löslichen Gehalte sind wesentlich grösseren Streuungen unterworfen als die Totalgehalte. Aussagen über zeitliche Veränderungen löslicher Gehalte sind deshalb nur schwer möglich. Um trotzdem einen Hinweis auf die tendenzielle Entwicklung zu erhalten, wird als Grenze für deutliche Veränderungen  $\pm 20\%$  des Richtwertes postuliert. Das heisst, Veränderungen innerhalb einer Bandbreite von 40% werden nicht als „deutliche Veränderung“ beurteilt (Tabelle 20).

Bei den löslichen Gehalten kommen bei insgesamt 13 der 38 Standorte Konzentrationsänderungen vor, die  $\pm 20\%$  des Richtwertes überschreiten.

Bodenkennwerte

Bei den Bodenkennwerten werden, in Ermangelung „objektiver“ und statistisch geprüfter Bewertungsgrössen, Differenzen, die etwa über dem 90% Perzentil der gemessenen absoluten Differenzen liegen, als deutlich beurteilt. In Tabelle 20 sind die Werte derjenigen *KABO-Standorte* optisch hervorgehoben, deren pH-Wert sich zwischen der Beprobung 1991/92 ( $P_1A_2$ ) und der Beprobung 1996/97 ( $P_2A_1$ ) um 0.5 oder mehr Einheiten, deren Humusgehalt sich um mehr als 1% (absolut), deren Kalkgehalt sich um mehr als 2% (absolut) und derer Kationenaustauschkapazität sich um mehr als 1.5 mmol/z/100g verändert haben.



Standort		pH	Humus	Kalk	KAK eff	Pb tot	Cd tot	Cr tot	Cu tot	Ni tot	Zn tot	Hg tot	F tot	Pb lösl	Cu lösl	Cd lösl	Ni lösl	Zn lösl	F lösl
Nr.	Gruppe	(CaCl <sub>2</sub> )	%	%	mmol/ z/100g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
<b>Landwirtschaft</b>																			
100ob	La 1	0.1	0.1	5.0	-0.5	-2.0	-0.018		-0.7		-7.2		-6		-0.05	0.000		0.00	-0.2
101he	La 1	0.1	-0.6	-17.8	0.7	2.4	0.026		-9.5		7.7			0.00	-0.21	0.000		0.00	0.00
122ku	La 1	-0.2	-0.4	2.7	1.6	-1.1	0.036		-0.2		-3.8		30		-0.01	0.000		0.00	-0.3
155el	La 1	0.2	-3.3	1.8	-3.7	-1.5	-0.069		-3.9		-23.3		4		-0.08	0.000		0.00	1.9
156bo	La 1	0.0	0.9	0.6	1.5	-1.2	-0.027		0.1		4.2				-0.05	0.000		0.00	
157sc	La 1	0.1	0.0	-0.2	-0.4	2.0	0.001		-0.6		1.0				-0.30	0.000		0.00	
158me	La 1	0.1	-0.1	-2.0	0.2	-0.6	0.025		0.5		3.3		2	0.00	-0.02	0.000		0.00	1.1
104me	La 2	0.8	0.3	0.2	1.4	-0.2	0.025		-0.5		0.4		24		-0.04	-0.001		0.00	
105me	La 2	0.5	-0.2	3.3	1.2	-1.7	0.001		-0.9		-0.3				-0.02	0.000		0.00	
150sa	La 2	0.7	0.1	0.8	1.2	0.5	0.011		0.5		2.4				-0.01	-0.001		-0.01	
151go	La 2	-0.1	0.1	0.3	0.0	0.8	0.009		0.1		0.4				-0.08	0.000		0.00	
154ro	La 2	0.2	-0.2	-1.4	-0.4	0.4	-0.001		0.6		1.2				-0.12	0.000		0.00	
159st	La 2	0.2	0.3	-0.1	1.3	-0.5	-0.172		-1.6		-5.8	-0.024			-0.14	-0.001		0.00	
160un	La 2	0.2	0.3	-2.1	0.2	0.2	-0.004		0.3		-0.2	-0.018			-0.24	0.000		0.00	
103un	La 3	0.5	-0.4	-0.6	1.0	0.9	0.011		0.8		2.2				-0.04	-0.002		-0.15	2.1
106ue	La 3	0.5	0.0	1.4	1.5	1.9	-0.017		3.1		7.2				-0.02	-0.001		0.00	
120vo	La 3	-0.1	0.3	0.1	0.6	0.4	0.011		0.3		2.8				-0.01	-0.001		0.00	
121gr	La 3	-0.4	0.0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.003		-0.2		0.3				-0.04	0.000		0.00	
123bi	La 3	-1.1	0.3	-0.5	-2.2	2.2	-0.082		0.0		0.6				-0.06	0.001		0.04	
152sc	La 3	0.2	-0.1	-0.9	0.2	0.3	0.003		1.4		1.6				-0.02	-0.001		0.00	
153su	La 3	0.7	0.0	0.0	0.8	0.0	0.005		0.2		2.7				-0.04	-0.002		-0.04	
124ab		0.4	-4.8	-0.3	0.2	-2.5	-0.013		-2.4		-3.6	-0.017			-0.04	0.000		-0.02	
<b>Wald</b>																			
221wi	Wa 1	0.1	0.7	-0.1		-2.2	0.026	1.8		1.6	3.8		8			-0.001	0.00	0.00	-0.1
222ob	Wa 1	0.1	0.9	-0.5		7.7	0.051	1.0		2.7	3.9		-12			-0.001	0.00	0.04	-0.7
224el	Wa 1	0.1	1.9	0.7		-6.5	0.102	-0.2		0.8	3.3					-0.001	-0.01	-0.07	
226vi	Wa 1	-0.9	0.8	-0.5		1.5	-0.030	0.0		0.7	3.6					0.005	0.00	0.44	
237eg	Wa 2	-0.2	2.4	0.0		4.9	0.002			0.1	-0.3					0.000	0.06	-0.14	
239ob	Wa 2	0.0	0.6	0.0		0.8	0.001			0.7	1.0					0.000	0.02	-0.29	
240zo	Wa 2	0.0	0.1	0.0		2.1	-0.008			0.0	-0.5					-0.001	0.00	-0.33	
255zu	Wa 2	-0.1	0.2	0.0		1.7	0.001			1.1	4.2	0.032				-0.003	-0.02	-0.02	
257ru	Wa 2	-0.1	0.7	0.0		2.5	0.003			0.3	1.6					0.002	0.00	0.14	
258ge	Wa 2	0.0	0.1	0.4		2.1	-0.028			0.2	-1.0	0.003				-0.002	-0.01	-0.19	
259tull	Wa 2	-0.1	0.4	0.0		1.3	-0.005			1.1	2.6		4			-0.004	0.00	0.03	0.0
263mo	Wa 2	0.1	0.6	0.0		3.9	0.003			1.1	4.0					-0.005	-0.02	-0.20	
268su	Wa 2	-0.1	0.1	0.0		4.3	-0.056			0.6	-0.8	0.012				-0.011	0.01	-0.17	
269le	Wa 2	-0.1	2.7	0.0		25.3	-0.001			0.0	-1.5					-0.002	-0.02	0.02	
273of	Wa 2	0.1	-0.1	0.0		14.2	-0.031			0.5	-0.3	0.023		-0.09		-0.013	-0.07	-1.29	
234mu		0.1	1.3	-0.6		-1.0	-0.092		-55.3		0.7	-0.9				0.000	0.00	0.00	
		Deutliche Differenz:			Signifikante und relevante Differenz:							Deutliche Differenz (20 % des VBBo-Richtwertes)							
		>0.5	>1	>2	>1.5	>3.7	>0.04	>2.5	>2.0		>7.5	>0.025		-	>0.14	>0.004	>0.04	>0.1	>4
						relevante Differenz:				>2.5			>35						
<b>Legende:</b> <span style="background-color: #ffcccc; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> Signifikante und relevante Zunahme <span style="background-color: #ffffcc; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> Signifikante und relevante Abnahme <span style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> Deutliche Zunahme <span style="background-color: #ccffcc; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> Deutliche Abnahme <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">44</span> fett: VBBo-Richtwert (RW) bei Beprobung 1996/97 überschritten																			

Tabelle 20: Veränderungen der Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte zwischen den Beprobungen 1991/92 und 1996/97; Flächenproben 0 - 20 cm





## 7. Standortspezifische Ursachen von Gehaltsveränderungen

In Tabelle 21 sind mögliche Ursachen von Konzentrationsveränderungen aufgeführt, die in Anhang M eingehender kommentiert werden. Auf diesen Informationen basiert die Diskussion der standortspezifischen Ursachen der Gehaltsveränderungen. Die Gehaltsveränderungen können der Tabelle 20 entnommen werden.

Nutzungs- klasse <sup>1)</sup>	Mögliche relevante Ursachen	Wir- kun- gen <sup>2)</sup>	Zeit- horiz.	Bemerkungen, Ursachen
La/Wa	Atmosphärische Einträge	+	2-3	Deposition, (im Wald auch Interzeption)
La	Direkte Stoffeinträge durch landwirtschaftliche Hilfsstoffe	+	1-3	Düngung, Pflanzenbehandlungsmittel
La/Wa	Rückstandsanreicherung durch Kalkauflösung und -auswaschung	+	2-3	Eintrag kalkauflösender Stoffe
La	Rückstandsanreicherung durch Humusmineralisation	+	2-3	Ackerbauliche Bewirtschaftung org. Böden
La	Anthropogene Bodendurchmischung	-	1	Bodenbearbeitung
La/Wa	Natürliche Bodendurchmischung	-	1-3	Bodentiere
La (Wa)	Ernteentzüge	-	2-3	Acker- und Futterbau, Holznutzung
Wa	Vertikale Schadstoffverlagerung im Boden	-	2-3	Mobilisation der Schadstoffe

Tabelle 21: Ursachen von Veränderungen von Schadstoffgehalten bei den KABO-Standorten

Grundlage: BUWAL 2000, an KABO angepasst

<sup>1)</sup> La = Landwirtschaft, Wa = Wald, <sup>2)</sup> auf Bodenschicht 0 - 20 cm bezogen

Legende: Wirkungen: „+“ = Zunahme, „-“ = Abnahme

Zeithorizont: 1: 1-5 Jahre, 2: 5-30 Jahre, 3: >30 Jahre

Für die Beurteilung der standortspezifischen Konzentrationsveränderungen ist die Standortgeschichte jedes einzelnen Standortes zu berücksichtigen. Nachfolgend werden von den 38 Standorten der zweiten Hauptuntersuchung diejenigen besprochen, die entweder bezüglich Belastungshöhe oder bezüglich Konzentrationsveränderungen nach fünf Jahren als auffällig oder problematisch beurteilt werden. *KABO 1* bezieht sich dabei auf die erste Hauptuntersuchung 1991/92 und *KABO 2* auf die zweite Hauptuntersuchung von 1996/97.

### 7.1 Landwirtschaftsstandorte

#### 7.1.1 Überblick

Auffällig sind die pH-Erhöhungen in den Landwirtschaft-Standortgruppen La 2 und La 3. Verschiedene Ursachen können – allein oder in ihrem Zusammenwirken – in Frage kommen: Unterschiedliche Witterungs- und Vegetationsbedingungen bei der Beprobung, analytische Messungenauigkeiten, Anwendung von basisch wirkenden Düngern oder Kalkung der Parzellen. Die pH-Erhöhungen der betroffenen KABO-Standorte dürften unter dem Blickwinkel des Bodenschutzes als positiv beurteilt werden, da sie zum Beispiel zu günstigeren Bedingungen für das Bodenleben und zu grösserer Stabilität der Bodenaggregate führen.

pH-Werte

Lösliche Kupfergehalte      Der lösliche Kupfergehalt ist bei allen Landwirtschaftsstandorten zurückgegangen. Dies dürfte auf die generell hohen Schwankungen der löslichen Gehalte zurückzuführen sein (siehe Kapitel 4.2.5).

### 7.1.2 Standortgruppe La 1

Ganze Gruppe La 1

*KABO 1:*

Die relativ hohen Fluor-Totalgehalte sind geogenen Ursprungs.

*KABO 2:*

Die hohen Fluorgehalte geogenen Ursprungs werden in KABO 2 bestätigt. Bedingt durch die gesetzliche Erhöhung des Richtwertes kommen weniger Richtwertüberschreitungen vor.

Hellikon (101he)

*KABO 1:*

Der lösliche Zink-Gehalt ist leicht erhöht. Dies könnte auf Düngereintrag zurückgehen.

*KABO 2:*

Der Zink-Totalgehalt hat signifikant und relevant zugenommen. Die Schadstoff-Totalgehalte sind aber nach wie vor nur leicht erhöht (50 - 80% des Richtwertes). Die Zunahme könnte auf allfällig erhöhten Düngereinsatz zurückgeführt werden. Andererseits hat der Kupfer-Totalgehalt signifikant und relevant abgenommen, wofür zur Zeit noch keine Erklärung vorliegt.

Küttigen (122ku)

*KABO 1:*

Unauffälliger Standort

*KABO 2:*

Mit Ausnahme einer deutlichen Zunahme des Kalkgehaltes und der Kationenaustauschkapazität ist der Standort immer noch als unauffällig bezüglich Schadstoffgehalten und Konzentrationsveränderungen zu beurteilen. Er wird als Magerwiese (kein Düngereinsatz) genutzt und ist aufgrund dieser besonderen Nutzung von speziellem Interesse.

Elfingen (155el)

*KABO 1:*

Die Zink- und Kupfergehalte werden als leicht erhöht und der Cadmium-Totalgehalt als erhöht beurteilt. Die Zink- und Kupfergehalte dieser Naturwiese (Dauergrünland) sind auf die Anwendung grosser Mengen von Schweinegülle zurückzuführen.

*KABO 2:*

Die Totalgehalte an Cadmium, Kupfer und Zink haben signifikant und relevant abgenommen. Die Schadstoffgehalte sind nur noch als leicht erhöht zu beurteilen (50 - 80% des Richtwertes). Auch der Humusgehalt und die effektive Kationenaustauschkapazität sind deutlich zurückgegangen.

Die Bewirtschaftung wurde in der Zeit zwischen 1991/92 und 1996/97 geändert. Anstelle der intensiven Mähwiese mit Schweinegülle-Einsatz wird die Fläche neu als Weide (Ammenkuhhaltung) genutzt (mündl. Mitteilung Chr. Salm, Terre AG, Eggliswil). Die signifikante und relevante Konzentrationsabnahme hängt wahr-



scheinlich mit der kleinräumigen Variabilität zusammen. Bei reinen Weidenutzungen dürfte diese Variabilität höher sein als bei Mähnutzungen und die in Tabelle 19 dargestellten Konfidenzintervalle überschreiten. In der dritten Hauptuntersuchung sind die Gehaltsveränderungen und die Ursachen detaillierter zu ergründen.

Schinznach Dorf (157sc)

*KABO 1:*

In diesem Rebberg wurde eine Anreicherung von Kupfer festgestellt, die auf die Anwendung von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln zurückgeht. Zugleich ist eine Erhöhung des Blei-Totalgehaltes festzustellen, die vermutlich auf der früheren Verwendung von Kompost schlechter Qualität beruht.

*KABO 2:*

Sowohl der Kupfer- als auch der Blei-Totalgehalt haben sich nicht signifikant und relevant geändert. Die deutliche Richtwertüberschreitung beim Kupfer-Totalgehalt wurde bestätigt.

### 7.1.3 Standortgruppe La 2

Safenwil (150sa)

*KABO 1:*

Auf diesem unmittelbar neben der Autobahn A1 liegenden Standort hat sich infolge des Strassenverkehrs Blei akkumuliert. Der Richtwert ist nicht überschritten.

*KABO 2:*

Bei den Totalgehalten wurden keine signifikanten und relevanten Änderungen der Schadstoffgehalte festgestellt. Ebenso sind bei den löslichen Gehalten keine deutlichen Veränderungen aufgetreten.

Stetten (159 st)

*KABO 1:*

Auf diesem Acker-Standort wird Feldgemüse angebaut. Früher eingebrachter Kompost von minderwertiger Qualität manifestiert sich noch Jahre später mit erheblichen Schadstoff-Totalgehalten, besonders von Cadmium (Richtwert überschritten) und Blei (erhöhter Gehalt). Die Totalgehalte von Zink und Quecksilber sind leicht erhöht.

*KABO 2:*

Der Cadmium-Totalgehalt ist signifikant und relevant zurückgegangen. Der Richtwert ist nach wie vor überschritten, und der Blei-Totalgehalt mässig erhöht (80 - 100% des Richtwertes). Die Cadmium-Abnahme dürfte auf die durch frühere Kompostanwendung bedingte Probenheterogenität zurückzuführen sein (siehe Kapitel 4.2.3). Auch Ernteentzüge in Kombination mit zurückhaltender Düngung sowie eine allfällige Zunahme der Mächtigkeit der bearbeiteten Bodenschicht könnten zu den Abnahmen beigetragen haben.

Unterkunkhofen (160un)

*KABO 1:*

Der Cadmium-Totalgehalt liegt über dem Richtwert, der Blei-Totalgehalt ist erhöht. Grund hierfür bildet die Verwendung von Klärschlamm schlechter Qualität.

**KABO 2:**

Bei den Totalgehalten sind keine Veränderungen festgestellt worden. Der Cadmium-Totalgehalt liegt weiterhin über dem Richtwert, und die Totalgehalte von Blei und Zink sind mässig erhöht (80 - 100% des Richtwertes).

**7.1.4 Standortgruppe La 3**

Uezwil (106ue)

**KABO 1:**

Mit Ausnahme der Fluoranreicherung, die auf geogene Ursachen zurückgeführt wird, kommen keine erhöhten oder leicht erhöhten Gehalte vor.

**KABO 2:**

Der Kupfer-Totalgehalt hat signifikant und relevant zugenommen, liegt aber immer noch unter dem halben Richtwert. Die Totalgehalte der anderen Schadstoffe sind ebenfalls nicht erhöht. Die Kupfer-Zunahme könnte allenfalls auf den Eintrag von Schweinegülle, die auf dieser Parzelle eingesetzt wird, zurückgeführt werden. In BUWAL (2000) wurden auf einer Fläche eines Schweinehaltungsbetriebes nach fünf und zehn Jahren ebenfalls signifikante und relevante Zunahmen der Kupfer-Totalgehalte gemessen.

Birmenstorf (123bi)

**KABO 1:**

Es kommen keine erhöhten Schadstoffgehalte vor. Auf der Fläche wird Feldgemüsebau betrieben.

**KABO 2:**

Der Cadmium-Totalgehalt hat signifikant und relevant abgenommen. Dies ist möglicherweise auf die Probenheterogenität, die über den durchschnittlich angenommenen Konfidenzgrenzen liegen, zurückzuführen. Auch Ernteentzüge in Kombination mit zurückhaltender Düngung sowie eine allfällige Zunahme der Mächtigkeit der bearbeiteten Bodenschicht könnten zu den Abnahmen beigetragen haben.

**7.2 Waldstandorte****7.2.1 Standortgruppe Wa 1**

Ganze Gruppe Wa 1

**KABO 1:**

Die relativ hohen Fluor-Totalgehalte sind vorwiegend geogenen Ursprungs.

**KABO 2:**

Die hohen Fluorgehalte geogenen Ursprungs werden bestätigt. Bedingt durch die Richtwertanpassung kommen weniger Richtwertüberschreitungen vor (siehe Tabelle 18). Ebenfalls geogenen Ursprungs könnten die erhöhten Gehalte an Blei, Cadmium und Zink sein.

Witnau (221wi)

**KABO 1:**

Der Blei-Totalgehalt liegt über dem Richtwert. Die Cadmium- und Chrom-Gehalte sind erhöht. Als Ursache kommt eine geogene Belastung in Frage.

**KABO 2:**

Es treten keine signifikanten und relevanten Veränderungen auf. Die Blei-Richtwertüberschreitung wurde bestätigt. Die neu festgestellte Richtwertüber-



schreitung beim Chrom-Totalgehalt ist auf die Herabsetzung des Richtwertes zurückzuführen.

Oberhof (222ob)

*KABO 1:*

Die Richtwerte für die Blei- und Cadmium-Totalgehalte sind überschritten. Als Gründe werden geogene Belastungen angegeben.

*KABO 2:*

Die Blei-, Cadmium- und Nickel-Totalgehalte haben signifikant und relevant zugenommen. Die Vermutung der geogen bedingten Belastung wird zwar bestätigt, doch kann die Ursache für die Zunahme nicht erklärt werden. Es kommen keine Schadstoff-Emittenten in unmittelbarer Nähe vor.

Elfingen (224el)

*KABO 1:*

Die erhöhten Cadmium-Totalgehalte sind geogenen Ursprungs.

*KABO 2:*

Der Cadmium-Totalgehalt hat signifikant und relevant zu- und der Blei-Totalgehalt signifikant und relevant abgenommen. In Kombination mit den deutlichen Humuszunahmen könnten die Ursachen der Veränderungen in heterogenen Proben liegen, deren Streuung die angenommene Konfidenzgrenze überschreitet. Anders lässt sich der gegenläufige Prozess einer Zu- und gleichzeitigen Abnahme zweier geogen geprägten Schadstoffgehalte nicht erklären.

### 7.2.2 Standortgruppe Wa 2

Ganze Gruppe Wa 2:  
lösliche Gehalte

*KABO 1:*

Die Standorte dieser Gruppe zeichnen sich durch hohe lösliche Gehalte an Zink, Nickel und Cadmium aus. Von den elf in der Beprobung 1996/97 untersuchten Standorten weisen neun Richtwertüberschreitungen der löslichen Zinkgehalte auf.

*KABO 2:*

Bei den löslichen Zink- und Cadmium-Gehalten sind mehrere deutliche Abnahmen gemessen worden. Besonders beim löslichen Zink kommen aber nach wie vor sehr viele Richtwertüberschreitungen vor; alle neun Richtwertüberschreitungen des KABO 1 wurden bestätigt. Bei der nächsten Hauptuntersuchung ist zu verifizieren, ob diese Tendenz weiter anhält. Eine mögliche Erklärung der Abnahme läge darin, dass, bedingt durch die stark sauren Bodenverhältnisse, ein wesentlicher Anteil der Schadstoffe bereits verlagert ist oder durch Pflanzen aufgenommen wurde. Die Ursachen der Konzentrationsänderungen könnten auch in den hohen, unkontrollierbaren Schwankungen der löslichen Gehalte liegen.

Zunahme der Blei-  
Totalgehalte:  
Egliswil (237eg)  
Möriken (263mo)  
Suhr (268su)  
Lenzburg (269le)  
Oftringen (273of)

*KABO 2:*

Die Blei-Totalgehalte haben signifikant und relevant zugenommen. Mit Ausnahme von Egliswil handelt es sich um Agglomerationsstandorte, die als emittentennah klassiert wurden (Kapitel 3.2.3).

Im Kanton Aargau werden an verschiedenen Standorten (Standorttypen: städtisch, Agglomeration und ländlich) die Bleigehalte im Staubbiederschlag gemessen. Die-

se Gehalte nahmen generell von 1991/92 bis 1996/97 deutlich ab (Kanton Aargau, 1998). Für die beiden Agglomerationsstandorte Suhr und Oftringen sind die Werte von 1991/92 und 1996/97 und ergänzend auch jene von 1990, 1993, 1994 und 1995 in Tabelle 22 dargestellt.

Jahr/ Messstation	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Suhr	70	53	33	38	29	40	28	11
Oftringen	71	63	39	38	43	26	30	15

Tabelle 22: Blei-Staubniederschlag [ $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{Tag}$ ]

Quelle: Kanton Aargau, 1998

Auch wenn die Luftmess- und die KABO-Standorte nicht genau übereinstimmen, kann doch im Zeitraum 1991/92 bis 1996/97 von einer deutlichen Abnahme der Blei-Immission ausgegangen werden. Dies steht nicht im Widerspruch zu den Blei-Zunahmen im Boden. Einerseits besteht weiterhin ein Bleieintrag, der zu einer Akkumulation im Boden führt. Andererseits verstärkt der Auskämmeffekt der Waldbäume die Schadstoffanreicherung in Waldböden verglichen mit gleich exponierten Freilandstandorten.

Die erwähnten Waldstandorte weisen alle einen bestimmten Anteil an Nadelbäumen auf (siehe Anhang C). Gemäss Angehrn-Bettinazzi et. al. (1990) beinhaltet der jährliche Streufall Nadeln, die der atmosphärischen Deposition über fünf bis sieben Jahre ausgesetzt waren. Folglich spiegelt der Streufall in Fichtenbeständen auch Blei-Frachten der vorangegangenen Jahre wider. Da die Blei-Immissionen in Suhr und Oftringen in den Jahren vor 1991/92 wesentlich höher lagen als danach (siehe Tabelle 22), ist davon auszugehen, dass die Bleieinträge in den Boden erst mit einer Zeitverschiebung von mehreren Jahren zurückgehen werden. Diese Standorte sind in den nächsten Hauptuntersuchungen weiter zu beobachten.

Egliswil (237eg)

#### KABO 1:

Die Überschreitung des Richtwertes des löslichen Zink-Gehaltes sowie ein erhöhter löslicher Nickelgehalt gehen auf den tiefen pH-Wert zurück.

#### KABO 2:

Der Blei-Totalgehalt, der noch knapp unter dem halben Richtwert liegt, hat signifikant und relevant zugenommen. Die Zunahme des Blei-Totalgehaltes ist nicht erklärbar. Sie könnte allenfalls – in Zusammenhang mit den deutlichen Zunahmen des Humusgehaltes – auf Probenheterogenität zurückgeführt werden.

Zurzach (255zu)

#### KABO 1:

Aufgrund der Gehaltsunterschiede der Mischproben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm wird eine deutliche Quecksilber-Anreicherung in den Proben 0 - 5 cm erkennbar. Die Gehalte der Mischproben 0 - 20 cm liegen aber unter dem halben Richtwert. Die Anreicherung in diesem Gebiet dürfte auf den dort stationierten Elektrolysebetrieb zurückzuführen sein.

*KABO 2:*

Der Quecksilber-Totalgehalt hat signifikant und relevant zugenommen; der Gehalt übersteigt 50% des Richtwerts nun knapp. Der Vergleich der Mischproben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm zeigen ebenfalls wieder eine deutliche Anreicherung in der 0 - 5 cm-Schicht. Schon aufgrund des KABO AG-Berichtes von 1994 wurden die Böden im Bereich des Elektrolysebetriebes im Rahmen des EMBO-Projektes näher untersucht (EMBO, 1997). Die erhöhten Quecksilber-Gehalte wurden bestätigt. Es wurden jedoch keine Richtwertüberschreitungen festgestellt. Massnahmen waren nicht nötig. Auch die festgestellte Zunahme liegt noch im Bereich der gemessenen Werte des EMBO-Projekts. Der Standort ist aber auf jeden Fall weiter zu beobachten.

Gebenstorf (258ge)

*KABO 1:*

Bei diesem Standort zeigen Gehaltsunterschiede der Flächenproben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm eine luftseitig eingebrachte Quecksilber-Anreicherung an. Der Quecksilbergehalt liegt jedoch noch weit unter dem Richtwert. Als Verursacherin kommt eine Kehrichtverbrennungsanlage in Frage.

*KABO 2:*

Es wurden keine signifikanten und relevanten Veränderungen der Totalgehalte festgestellt. Die Quecksilber-Anreicherung in 0 - 5 cm wurde bestätigt. Der Standort ist weiter zu beobachten.

Turgi (259tull)

*KABO 1:*

Der lösliche Gehalt an Cadmium liegt über dem Richtwert. Vergleicht man die Gehalte im Oberboden mit denjenigen des Unterbodens, so deutet der höhere Gehalt im Oberboden auf eine anthropogene Belastung hin. Als Emittent wird die Kehrichtverbrennungsanlage in Turgi vermutet.

*KABO 2:*

Bei den Totalgehalten wurden keine signifikanten und relevanten Veränderungen festgestellt. Die Profilproben (Kapitel 5.3.2) weisen auf atmosphärische Einträge der Elemente Blei und Cadmium hin. Der lösliche Cadmiumgehalt hat deutlich abgenommen, liegt aber immer noch über dem Richtwert. Der Standort ist weiter zu beobachten.

Möriken (263mo)

*KABO 1:*

Es kommen keine erhöhten Totalgehalte vor.

*KABO 2:*

Der Befund aus KABO 1 bestätigt sich. Der Blei-Totalgehalt hat aber signifikant und relevant zugenommen. Da der Standort in der Nähe des Agglomerationsgebiets Möriken, Niederlenz und Wildegg sowie in der Nähe des Waldrandes liegt, ist es möglich, dass der Auskämmeffekt zur Bleianreicherung beigetragen hat (siehe Randnotiz „Zunahme der Blei-Totalgehalte“ eingangs Kapitel 7.2.2). Der Vergleich der Messwerte 0 - 5 cm und 0 - 20 cm deutet auf einen atmosphärischen Eintrag hin.

Suhr (268su)

*KABO 1:*

Es wurden eine Blei-, Cadmium- und eine leichte Quecksilber-Anreicherung festgestellt, wobei aber der Gehalt an Quecksilber unterhalb des halben Richtwertes liegt. Zu einem Teil könnten dafür die Emissionen der Kehrichtverbrennungsanlage in Buchs verantwortlich sein, zu einem andern Teil der nahe vorbeiführende Strassenverkehr (Cadmium aus dem Pneubetrieb).

*KABO 2:*

Der Blei-Totalgehalt hat signifikant und relevant zugenommen (siehe Randnotiz „Zunahme der Blei-Totalgehalte“ eingangs Kapitel 7.2.2). Er liegt aber immer noch unter 80% des Richtwertes. Im Gegenzug ging der Cadmium-Totalgehalt signifikant und relevant zurück. Aufgrund der stark sauren Bodenverhältnisse ist es wahrscheinlich, dass das Cadmium gelöst und in tiefere Schichten verfrachtet wurde.

Lenzburg (269le)

*KABO 1:*

An diesem Standort ist eine Anreicherung des Blei-Totalgehaltes, die durch den nahe gelegenen Strassenverkehr verursacht wurde, festzustellen. Der Richtwert ist jedoch nicht überschritten.

*KABO 2:*

Der Blei-Totalgehalt hat signifikant und relevant zugenommen. Er hat den Richtwert überschritten (siehe Randnotiz „Zunahme der Blei-Totalgehalte“ eingangs Kapitel 7.2.2). Der Vergleich der Mischproben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm zeigt eine sehr deutliche Anreicherung in der 0 - 5 cm-Schicht. Das Ausmass der Zunahme von 25 mg/kg ist jedoch kaum erklärbar.

Der Standort liegt 20 m von der Autobahn A1 entfernt. Damit stellt er den nächstgelegenen KABO-Standort zu einer stark befahrenen Strasse dar. Eine Untersuchung des Kantons Solothurn zeigt, dass im Wald bei einem Abstand zum Fahrbahnrand von 25 - 50 m mit ausgeprägten Bleigehalten im Bereich des Richtwertes gerechnet werden muss. Die relativ hohe Belastung in Waldböden kann durch den Auskämmeffekt erklärt werden (AFU SO, 1994).

Oftringen (273of)

*KABO 1:*

Hier werden die Richtwerte für den Blei-Totalgehalt sowie für die löslichen Zink- und Nickelgehalte überschritten. Ein erhöhter Totalgehalt wird auch beim Quecksilber festgestellt. Die Ursache dieser Belastung liegt bei den Emissionen der nahe gelegenen Autobahn und der Kehrichtverbrennungsanlage. Die Richtwertüberschreitungen bei Nickel löslich und Zink löslich sind zur Hauptsache auf die tiefen pH-Werte zurückzuführen. Bisher ist nicht geklärt, ob die hohen Gehalte von Nickel und Zink löslich an diesem Standort geogener oder anthropogener Herkunft sind.

*KABO 2:*

Der Blei-Totalgehalt hat signifikant und relevant zugenommen; die Richtwertüberschreitung wird bestätigt. Die Zunahme ist vor allem auf die Anreicherung in der obersten Bodenschicht zurückzuführen. Dies weist, wie auch die Schadstoffverteilung im Bodenprofil (Kapitel 5.3.2) zeigt, auf atmosphärische Einträge hin (siehe





Randnotiz „Zunahme der Blei-Totalgehalte“ eingangs Kapitel 7.2.2). Das Ausmass der Zunahme von 14 mg/kg kann jedoch kaum erklärt werden. Die erhöhten löslichen Gehalte von Nickel und die Richtwertüberschreitung von Zink löslich sind primär auf die stark sauren Bodenverhältnisse zurückzuführen.

### 7.2.3 Wald-Spezialstandort

Muri (234mu)

#### *KABO 1:*

Der Standort wird als Forstpflanzgarten genutzt. Er weist eine Richtwertüberschreitung des Kupfer-Totalgehaltes auf. Diese entstand als Folge der Anwendung von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln und von kupferhaltigem Kompost schlechter Qualität. Auch der Blei- und Zinkgehalt sind an diesem Standort erhöht, was ebenfalls auf die Anwendung der erwähnten Produkte zurückzuführen ist.

#### *KABO 2:*

Der Kupfer- und der Cadmium-Totalgehalt hat signifikant und relevant abgenommen. Der Richtwert von Kupfer ist knapp unterschritten. Die Abnahme des Kupfer-Totalgehaltes von 97 mg/kg auf 37 mg/kg ist kaum erklärbar. Sie könnte, in Zusammenhang mit der deutlichen Zunahme des Humusgehaltes, allenfalls mit einer grösseren kleinräumigen Variabilität, als durchschnittlich postuliert wurde, in Zusammenhang stehen.

## 8. Schlussfolgerungen

### 8.1 Überblick über Höhe, Veränderungen und Ursachen der Belastungen

17 der 38 analysierten Standorte zeigten bei der zweiten Hauptuntersuchung Richtwertüberschreitungen an. Im Vergleich zur ersten Hauptuntersuchung wurden sie mehrheitlich bestätigt. Das heisst, die Fruchtbarkeit der Böden ist an diesen Standorten langfristig nach wie vor nicht gewährleistet. Daher muss der vorsorgende Schutz der Böden vor Schadstoffen weitergeführt werden. An mehreren Standorten wurden zudem zwischen 1991/92 und 1996/97 signifikante und umweltrelevante Zunahmen von Schadstoffgehalten festgestellt.

Besonders bei den auffälligen Standorten mit Richtwertüberschreitungen und festgestellten Schadstoffzunahmen sind die Ursachen der Belastung mit dem Ziel, die Belastungsquellen zu stoppen, zu ermitteln. Bei der Diskussion der Schadstoff-Anreicherungen und -Veränderungen einzelner Standorte wurden zwar mögliche Gründe eruiert, abschliessend lassen sie sich jedoch kaum belegen. In vielen Fällen sind verschiedene Ursachen (anthropogene und geogene Schadstoffquellen, natürliche bodendynamische Prozesse), die sich auch gegenseitig überlagern und beeinflussen können, für die Höhe des Gehalts und dessen Veränderungen verantwortlich. Um die Aussagekraft der festgestellten Entwicklungstendenzen zu

erhöhen und die Ursachen von negativen Entwicklungen besser eingrenzen zu können, ist eine dritte Hauptuntersuchung notwendig.

Die KABO-Standorte repräsentieren eine Vielfalt von Standort- und Nutzungsfaktoren, welche die Schadstoffbelastung (Art, Höhe und Veränderung) beziehungsweise beeinflussen. Deshalb werden Ursachen ungünstiger Entwicklungen und mögliche Massnahmen für auffällige Standorte individuell und vor dem Hintergrund der jeweiligen Standort- und Nutzungsgeschichte diskutiert. Dennoch lassen sich auch generelle Schlussfolgerungen für einzelne Standortgruppen ableiten.

### **8.2 Landwirtschaft**

Nebst mehreren signifikanten und umweltrelevanten Abnahmen von Cadmium- und Kupfer-Totalgehalten sind einzig an zwei Standorten Totalgehalt-Zunahmen je eines Elementes, Zink und Kupfer, festgestellt worden. Die entsprechenden Schadstoffgehalte bewegen sich aber unterhalb des halben Richtwertes.

Mit Ausnahme der beiden erwähnten Standorte hat sich die Schadstoffsituation in der Landwirtschaft stabilisiert bis leicht verbessert. Es wäre wohl noch zu früh, diese Entwicklung als Folge der stark geförderten integrierten Anbausysteme beziehungsweise des aktuellen ökologischen Leistungsnachweises zu deuten. Die dritte Hauptuntersuchung, die unter anderem als Wirkungskontrolle für den ökologischen Leistungsnachweis eingesetzt werden kann, wird zeigen, ob diese Tendenz anhält.

Die zweite Hauptuntersuchung bestätigte aber auch, dass sich die Düngung mit Kompost oder Klärschlamm von minderwertiger Qualität noch Jahre später in hohen Schadstoffgehalten widerspiegelt. Die Bestrebungen, nur noch Hilfsstoffe und Dünger guter Qualität einzusetzen, müssen daher weiter vorangetrieben werden.

### **8.3 Waldstandorte im Jura**

Zwei der vier Jurastandorte weisen signifikante und relevante Veränderungen, vorwiegend Zunahmen der Schadstoffkonzentrationen, auf, die nicht erklärt werden können und daher weiter zu beobachten sind. Bei allen Jura-Waldstandorten ist bei den nächsten Hauptuntersuchungen der Entwicklung des Kalkgehaltes und des pH-Wertes Beachtung zu schenken. Bei einer feststellbaren Versauerungstendenz könnten die geogen bedingten erhöhten Schadstoffgehalte in Lösung gehen und ins Grundwasser verlagert werden.

### **8.4 Waldstandorte im Mittelland**

Auf neun von elf Standorten sind die Richtwerte für die löslichen Gehalte überschritten. Die Ursachen liegen in den sauren Bodenverhältnissen. Eine Verminderung der löslichen Gehalte ist ohne Erhöhung des pH-Wertes kaum möglich. Die Bodenversauerung kann neben erhöhten löslichen Gehalten auch irreversible Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit und verschiedener Bodenfunktionen nach



sich ziehen wie Nährstoffverarmung, Aluminiumtoxizität und erhöhte Anfälligkeit der Bäume gegen Windwurf.

Massnahmen gegen Bodenversauerung prüfen

Die Bodenversauerung, die an sich ein natürlicher Prozess ist, wird durch den zivilisationsbedingten atmosphärischen Eintrag von Säuren und Säurebildnern beschleunigt. Mit der konsequenten Umsetzung der Luftreinhalteverordnung, insbesondere mit dem Einhalten der Stickstoffdioxid-Immissions-Grenzwerte, kann ein Beitrag gegen weitere Bodenversauerung geleistet werden. Aus waldbaulicher Sicht wäre abzuklären, wie stark sich die Artenzusammensetzung des Baumbestandes auf die Bodenversauerung auswirkt.

Koordination mit weiteren Untersuchungen

Im Rahmen des Projekts „Langfristige Waldökosystem-Forschung der WSL“ werden zwei Flächen im Kanton Aargau mit sauren Böden sowie die Einträge von Säurebildnern, vor allem Stickstoff, untersucht (WSL, 2002). Basierend auf den Erkenntnissen dieses Projektes sowie in Koordination mit der Abteilung Wald des Finanzdepartementes des Kantons Aargau, der WSL und mit weiteren Institutionen, die sich mit dem Problem der sauren Waldböden befassen, sind Schlussfolgerungen bezüglich Gefährdungspotenzial und bezüglich allfälliger Massnahmen zu ziehen.

Schadstoffaneinträge in Agglomerationsgebieten

Im Rahmen des EMBO-Projektes (Emittentenbezogene Bodenuntersuchungen im Kanton Aargau) wurden bisher die Böden im Bereich von zwölf Emittenten untersucht (EMBO, 1997). In einem weiterführenden Projekt sollen die zusätzlichen, durch das KABO-Projekt festgestellten Problemgebiete detailliert untersucht werden. Bei den Waldstandorten Suhr, Lenzburg, Oftringen und Möriken haben nach fünf Jahren die Blei-Totalgehalte signifikant und relevant zugenommen. Schadstoffeinträge auf sauren Standorten sind besonders problematisch, weil die leicht löslichen Elemente mobilisiert und ausgewaschen werden können. Die Höhe und Veränderung der Schadstoffbelastung sowie deren räumliche Verteilung sind in diesen Agglomerationsgebieten detailliert abzuklären. Sollte sich in der nächsten Hauptuntersuchung zeigen, dass die Bleigehalte weiterhin zunehmen, so sind die Ursachen abzuklären und es ist allenfalls zu prüfen, ob die vorsorglichen, emissionsbegrenzenden Massnahmen des Bundes in anderen Umweltbereichen ausreichen, um in diesen Gebieten einen weiteren Anstieg der Schadstoffbelastung der Böden zu verhindern.

## 9. Empfehlungen für das Weiterführen des KABO

Dritte Hauptuntersuchung  
nötig

Mit der zweiten Hauptuntersuchung liegen erstmals Ergebnisse vor, anhand derer Schadstoffveränderungen nach fünf Jahren festgestellt und beurteilt sowie vermutete Ursachen diskutiert werden können. Gesicherte Aussagen über die Entwicklung von Schadstoffveränderungen und deren Ursachen sind aber noch nicht möglich. Mit den Ergebnissen einer dritten Hauptuntersuchung sollen bisher vermutete Tatbestände erhärtet und die Aussagekraft der Untersuchungen zu Ursachen von Schadstoffanreicherungen und negativen Entwicklungen erhöht werden.

Anzahl Standorte

Die Auswertung der zweiten Hauptuntersuchung zeigte, dass die Anzahl der Beobachtungsflächen für eine systematische Auswertung der Schadstoffbelastung und deren Veränderung mit 38 analysierten Standorten an der unteren Grenze lag. Dies geht auf die vielfältigen belastungsrelevanten Aspekte wie zum Beispiel geologisches Ausgangsmaterial, Bewirtschaftung und Schadstoffexposition der Standorte zurück. Eine gezielte Auswahl der Standorte mit Schwergewicht auf den Emittentennahen hat sich bewährt und ist weiter zu führen.

Beprobung/Probenahme

Im Rahmen der Zweiten Hauptuntersuchung wurden analytisch bedingte Messgenauigkeiten aufgrund von Wiederholungsmessungen quantifiziert. Hingegen konnten Ungenauigkeiten, die auf kleinräumige Variabilitäten der Standorte zurückzuführen sind, nur grob geschätzt werden. Im Rahmen der dritten Hauptuntersuchung ist dieser Streuungsanteil hinreichend genau zu quantifizieren.

Zur Quantifizierung der Streuung, die durch die kleinräumige Variabilität verursacht wird, ist allenfalls von der bisherigen Einfachbeprobung auf eine Dreifachbeprobung umzustellen. Der damit verbundene Mehraufwand darf aber nicht allzu viele Mittel zuungunsten der Vielfalt und des Umfangs von zu analysierenden KABO-Standorten binden. In einer Vorabklärung sind deshalb optimierte Lösungen zu prüfen, welche unter anderem einen längeren Beprobungsrhythmus, beispielsweise zehn Jahre, beinhalten. In diesem Zusammenhang ist auch die Streuung der Bodenkennwerte zu erfassen.

Biologische und physikalische  
Parameter

Durch die bisherige KABO-Untersuchungen wurden nur anorganische Schadstoffe und wichtige Bodenkennwerte erfasst und beurteilt. Verschiedene Untersuchungen deuten darauf hin, dass auch Veränderungen der biologischen und physikalischen Eigenschaften zu bedeutenden Belastungen des Ökosystems Boden und zu Gefährdungen von Pflanzen, Menschen und Tieren sowie von Grundwasser führen können. Deshalb wurde bereits in der ersten Hauptuntersuchung die Integration von biologischen und physikalischen Parametern ins KABO-Untersuchungsprogramm gefordert. Die methodischen Grundlagen wurden inzwischen erarbeitet, und die Voraussetzungen sind nun gegeben, dass diese Parameter als fester Bestandteil in die zukünftigen Hauptuntersuchungen aufgenommen werden können.



Lösliche Schadstoffgehalte	Die aktuellen löslichen Schadstoffgehalte auf den Landwirtschafts- und den Jura-Waldstandorten sind nicht auffällig und liegen ausnahmslos unter den VBBo-Richtwerten. Zur Beurteilung der Belastungssituation im Rahmen der dritten Hauptuntersuchung kann daher bei diesen Standorten, besonders bei vorliegenden aktuellen pH-Werten, auf die weiteren Analysen verzichtet werden. Hingegen ist bei den Mittelland-Standorten der Gruppe Wa 2 den löslichen Gehalten weiterhin Aufmerksamkeit zu schenken.
Handbuch	Das Handbuch „Qualitativer Bodenschutz im Kanton Aargau“, hat sich als Grundlage für die Reproduzierbarkeit der KABO-Untersuchungen bewährt. Zukünftige Änderungen, Anpassungen oder Weiterentwicklungen von Methoden und Arbeitsgängen sind konsequent und im bisherigen Detaillierungsgrad nachzuführen.

## 10. Literatur

- AfU SO (1994) Schadstoffbelastung der Böden entlang von Autobahnen. Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn.
- Angehrn-Bettinazzi C., J. Hertz (1990) Schwermetallgehalte in der Streuauflage von Waldstandorten – Rückschlüsse auf die Immissionssituation. VDI-Berichte Nr. 837. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- AUE (1997) Langfristige Überwachung der Schadstoffanreicherung in Waldböden. Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft, Liestal.
- AUE (1999) Schwermetalle in Baselbieter Böden (Landwirtschaftsböden). Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft, Liestal.
- Blume H.-P. (1990) Handbuch des Bodenschutzes. Ecomed-Verlag, Landsberg/Lerch.
- BUWAL (1993) NABO, Nationales Bodenbeobachtungsnetz, Messresultate 1985-1991, Schriftenreihe Umwelt Nr. 200. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2000) Nationales Bodenbeobachtungsnetz, Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. Schriftenreihe Umwelt Nr. 320. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2001a) Erläuterungen zur Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2001b) Böden der Schweiz. Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990 - 1996). Umweltmaterialien, im Druck. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- EMBO (1997) Emittentenbezogene Bodenuntersuchungen im Kanton Aargau. Kurzbericht. Abteilung Umweltschutz des Kantons Aargau, Aarau.
- FAL (1997) Prognosen von Richtwertüberschreitungen löslicher Schwermetall- und Fluorgehalte anhand von Totalgehalten im Boden. Nationale Bodenbeobachtung. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich.
- FAL (2000) Richtwertüberschreitungen löslicher Schwermetall- und Fluorgehalte im NABO-Messnetz: Prognosezuverlässigkeit und Analysen-Sparpotential. Nationale Bodenbeobachtung. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich.
- FAL (2000) VBBo-Ringanalysenbericht 1999, Nationale Bodenbeobachtung. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich.



- Fitze P., Burri A., Achermann M., Kuhn N., und Polomski J. (1991) Bodenversauerung. In Bulletin Nr. 15 der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz. Zollikofen.
- IAP (1999) Wie geht es unserem Wald? Untersuchungen in Walddauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 1998. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.
- ITÖ (2001) Statistische Auswertung der Wiederholungsmessungen 1999 dreier Standorte des Kantonalen Beobachtungsnetzes Aargau. Dr. A. Keller, Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zürich.
- KABO AG (1994) Bodenbeobachtung im Kanton Aargau, Belastungszustand der Böden 1991/1992. Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung Umweltschutz, Aarau.
- KABO AG (1997) Qualitativer Bodenschutz im Kanton Aargau, Kantonales Bodenbeobachtungsnetz. Handbuch. Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung Umweltschutz, Aarau.
- KABO SG (1995) Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) St. Gallen. Auswertung der Erstbeprobung, Fachbericht, Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen.
- KABO SG (1997) Kantonale Bodenbeobachtung (KABO): Auswertung der Zweitbeprobung, Fachbericht. Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen.
- KABO SH (2000) Schwermetallbelastung der Böden im Kanton Schaffhausen (Kabo SH). Amt für Lebensmittelkontrolle und Umweltschutz, Kanton Schaffhausen.
- Kanton Aargau (1998) Luftreinhaltung, Immissionsmessungen im Kanton Aargau. Resultate 1997. Sondernummer 1. Abteilung Umweltschutz, Aarau.
- Kanton Aargau (2000) Luftbelastung im Kanton Aargau. Immissionsmessbericht 1999. Sondernummer 7. Abteilung Umweltschutz, Aarau.
- NABEL (1998) Luftbelastung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 311. BUWAL, Bern.
- Scheffer/Schachtschabel (1998) Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Schulin (1996) Bodenschutz II. Unterlagen zur Vorlesung. Institut für terrestrische Ökologie, ETH Zürich.
- WSL/BUWAL (2001) Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- WSL (2002) Langfristige Waldökosystem-Forschung (LWF): Bodencharakterisierung. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. In Vorbereitung.

# Anhang

## Verzeichnis

- A Abkürzungen, Erklärungen
- B Analytik-Methoden
- C Nutzungen bzw. Pflanzenbestände der KABO-Standorte
- D Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte der 5 Standortgruppen
- E Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte in 0 - 5 cm und 0 - 20 cm Tiefe (Wald-Standortgruppen)
- F Emittentenbezogene Darstellung der Schadstoffgehalte (Mittelland-Waldstandortgruppe, Wa 2)
- G Tiefenverteilung der Schadstoff-Totalgehalte dreier saurer Waldböden
- H Schadstoff-Tiefenverteilung der 5 Standortgruppen
- H1 Schadstoff-Totalgehalte
- H2 Bodenkennwerte und Legende
- I Relative Bindungsstärken der KABO-Standorte
- K Beziehung zwischen löslichen Gehalten und dem pH-Wert
- L Calcium-Aluminium-Verhältnis in der Mittelland-Waldstandortgruppe
- M Ursachen von Schadstoffveränderungen
- N Streudiagramme der Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte, Proben 1991/92 und 1996/97
- O Messwerte (Analysenresultate)
- O1 Flächenproben 0 - 20 cm Landwirtschaft
- O2 Flächenproben Waldstandorte 0 - 5 cm und 0 - 20 cm
- O3 Profilproben Waldstandorte 259tull, 268su und 273of





## Abkürzungen, Erklärungen

AUS	Abteilung Umweltschutz (Baudepartement)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
KABO	Kantonale Bodenbeobachtungen bzw. Bodenbeobachtungsnetzte
NABO	Nationale Bodenbeobachtung bzw. Nationales Bodenbeobachtungsnetz
RW	Richtwert (VBBo)
USD	Umweltschutzdekret
USG	Umweltschutzgesetz
VBBo	Verordnung über Belastungen des Bodens (1998)
VSBo	Verordnung über Schadstoffe im Boden (1986, 1998 durch VBBo abgelöst)
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf

### Elemente:

Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
F	Fluor
Hg	Quecksilber
Ni	Nickel
Pb	Blei
Zn	Zink

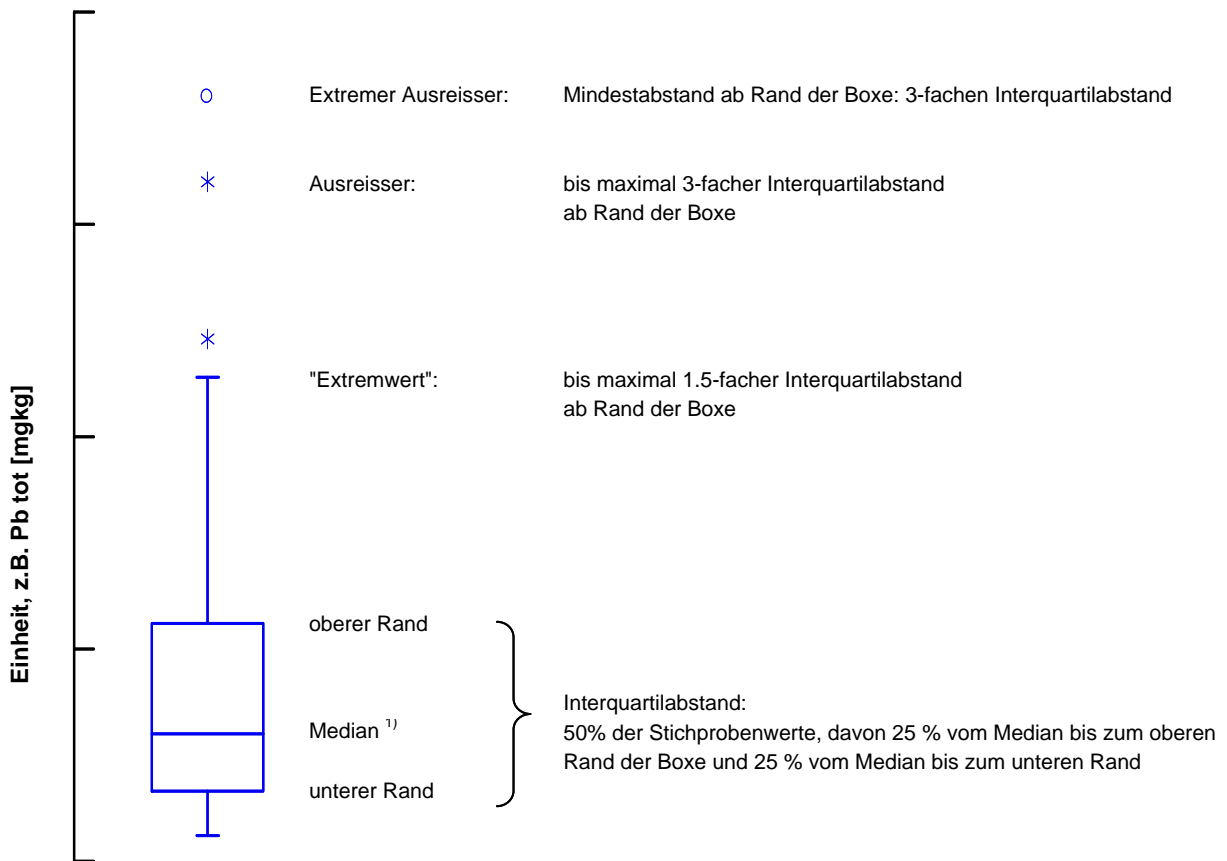
### Schadstoffgehalte:

lösl	lösliche Gehalte
tot	Totalgehalte

### Schadstoffquellen:

anthropogen	vom Menschen stammend
geogen	durch Gesteinsverwitterung (lithogen) und Bodenbildung (pedogen) entstandene Anreicherungen

## Box-Plot



<sup>1)</sup> Mittlerer Wert der nach Grösse geordneten Stichprobe

## Kurzbeschreibung Analytik-Methoden

Grundlagen: KABO AG (1997)

### KAK (pot), KAK (eff) und pH

Aufbereitungsmethode: Methode für Bodenuntersuchungen, Schriftenreihe der FAC, 1989, Nr. 5. (*Methodenhandbuch FAC, 1989*), und Wegleitung für die Probenahme und Analyse von Schadstoffen im Boden (FAC, BUWAL, 1987, Nachdruck Februar 1989, Wegleitung VSBo).

### Körnung (Ton, Schluff, Sand)

Aufbereitungsmethode gemäss *Methodenhandbuch FAC, 1989*; Wegleitung VSBo.

### Methode für Körnung der Feinerde

*Methodenhandbuch FAC, 1989*

Für die Bestimmung der Körnung der Feinerde wird die Pipett-Methode (oder Sedimentationsmethode) angewandt. Es wird der Anteil Ton (< 0.002 mm), Schluff (oft auch als Silt bezeichnet, 0.002–0.05 mm) und Sand (0.05–2 mm) bestimmt.

### Methode für die pH-Messung

*Methodenhandbuch FAC, 1989*

Der pH wird in Wasser, in einer 1 M KCl- und in einer 0.01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung gemessen.

### Methode für organische Substanz

*nach Walkley-Black*

Es handelt sich um eine Oxidation des organischen Kohlenstoffes mit Kaliumbichromat und Schwefelsäure. Der Humusgehalt wird durch Multiplikation des Gehaltes an organischem C mit 1.724 erhalten

### Methode für Kalkgehalt

*Methodenhandbuch FAC, 1989*

Passon-Methode

### Analyse der anorganischen Schadstoffe

*Methodenhandbuch FAC, 1989*

Die Bestimmungen erfolgen entweder mit Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) oder mit Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES). Die Analysen mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) werden mit der Flammen- oder Graphitrohrtechnik (F-AAS oder ETA-AAS) durchgeführt. Je nach erforderlicher Nachweisgrenze muss die ICP-Spektroskopie durch Messungen mit der Graphitrohratomabsorptionsspektrometrie (ETA-AAS) ergänzt werden.

Das Element Cd muss immer mit ETA-AAS gemessen werden (Handbuch).

Das Element Hg wird mit Kaltdampf-AAS gemessen (Handbuch).



<b>Landwirtschaft</b>			
Standort	Gruppe	Nutzungskategorie	Bemerkungen zu Nutzungen <sup>1)</sup>
100ob	La 1	Ackerbau	
101he	La 1	Ackerbau	
122ku	La 1	Dauergrünland	Magerwiese, ohne Düngung
155el	La 1	Dauergrünland	ursprünglich intensive Mähwiese, später Kuhweide
156bo	La 1	Ackerbau	
157sc	La 1	Rebberg	
158me	La 1	Ackerbau	
104me	La 2	Ackerbau	
105me	La 2	Ackerbau	
150sa	La 2	Ackerbau	
151go	La 2	Ackerbau	
154ro	La 2	Ackerbau	
159st	La 2	Ackerbau	Feldgemüsebau
160un	La 2	Ackerbau	
103un	La 3	Ackerbau	
106ue	La 3	Ackerbau	
120vo	La 3	Ackerbau	
121gr	La 3	Ackerbau	
123bi	La 3	Ackerbau	Feldgemüsebau
152sc	La 3	Ackerbau	
153su	La 3	Ackerbau	
124ab		Dauergrünland	

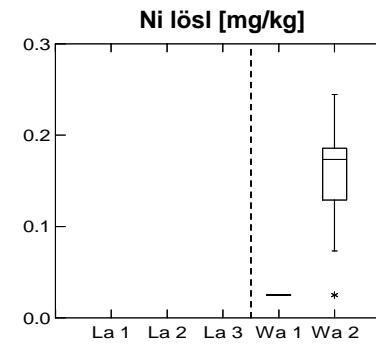
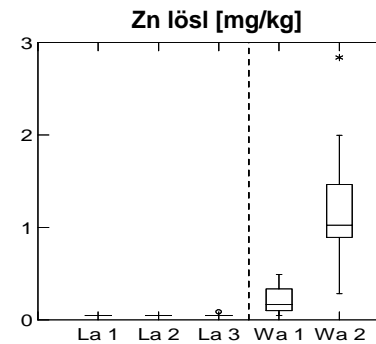
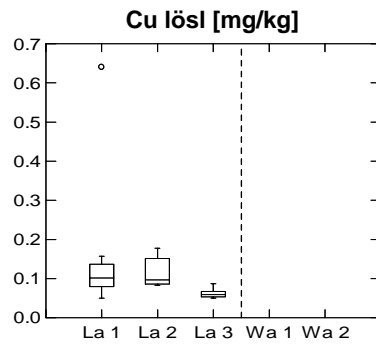
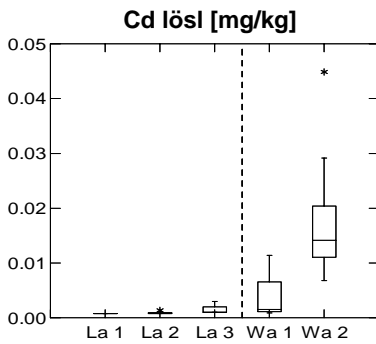
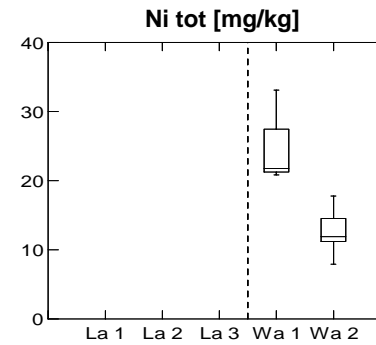
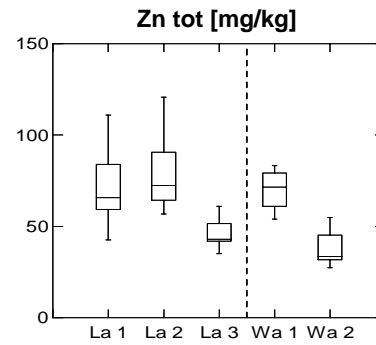
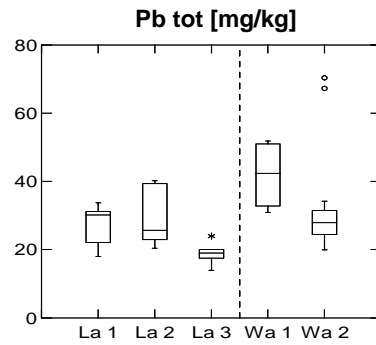
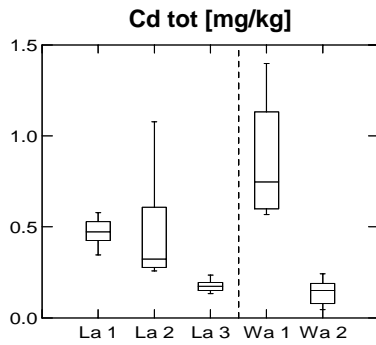
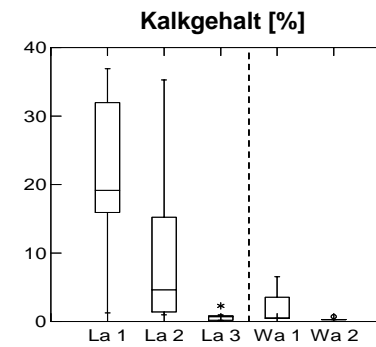
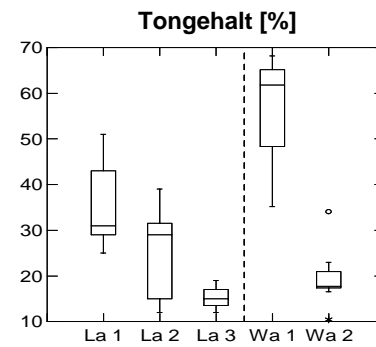
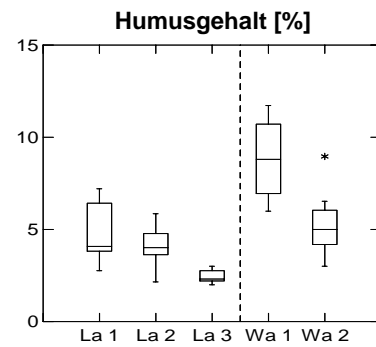
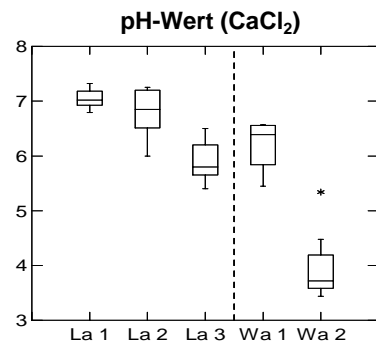
<b>Wald</b>			
Standort	Gruppe	Baumbestand <sup>2)</sup>	Kartierungseinheit <sup>3)</sup>
221wi	Wa 1	Linden und Lärchen	Lungenkraut-Buchenwald mit Hexenkraut
222ob	Wa 1	Buchen und Tannen	Lungenkraut-Buchenwald mit Immenblatt
224el	Wa 1	Buchen und Tannen	Waldmeister-Buchenwald mit Lungenkraut
226vi	Wa 1	Buchen und Tannen	Typischer Waldmeister-Buchenwald
237eg	Wa 2	Fichten	Waldmeister-Buchenwald mit Abgerücktähriger Segge
239ob	Wa 2	Buchen	Waldmeister-Buchenwald mit Rippenfarn
240zo	Wa 2	Buchen	Waldmeister-Buchenwald mit Rippenfarn
255zu	Wa 2	Buchen	Waldmeister-Buchenwald mit Lungenkraut
257ru	Wa 2	Buchen (Fichten , Föhre)	Typischer Waldhainsimsen-Buchenwald
258ge	Wa 2	Fichten, Buchen	Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse
259tull	Wa 2	Buchen, Tannen	Aronstab-Buchenwald
263mo	Wa 2	Tannen, diverse Laubbäume	Waldmeister-Buchenwald mit Lungenkraut
268su	Wa 2	Hagebuchen (Fichten)	Typischer Waldmeister-Buchenwald
269le	Wa 2	Laubbäume (Fichten)	Typischer Waldmeister-Buchenwald
273of	Wa 2	Fichten	Waldmeister-Buchenwald mit Rippenfarn
234mu		Forst-Pflanzgarten	

## Nutzungen/Pflanzenbestände der KABO-Standorte

Legende: <sup>1)</sup> Angaben gemäss Protokollblätter und mündl. Auskunft Chr. Salm, TERRE AG, Egliswil

<sup>2)</sup> Baumbestände in den Beprobungsflächen oder daran angrenzend; Angaben gemäss Einmessblätter der einzelnen Standorte

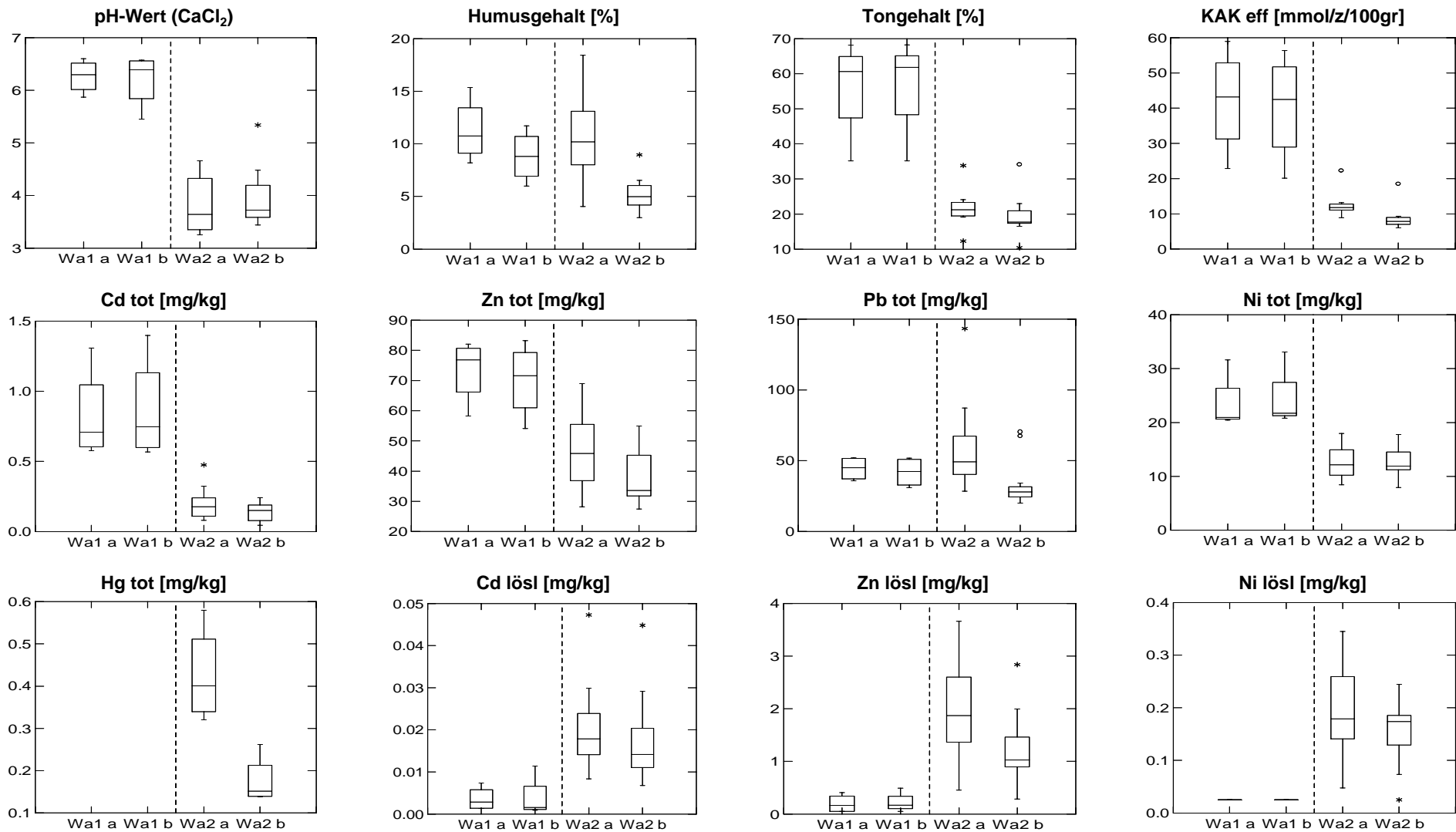
<sup>3)</sup> Kartierungseinheit gemäss vegetationskundlicher Standortskartierung; Angaben gemäss Abteilung Wald des Finanzdepartementes des Kantons Aargau



**Bodenbeobachtungsnetz des Kantons / Anhang D**

**Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte der 5 Standortgruppen**

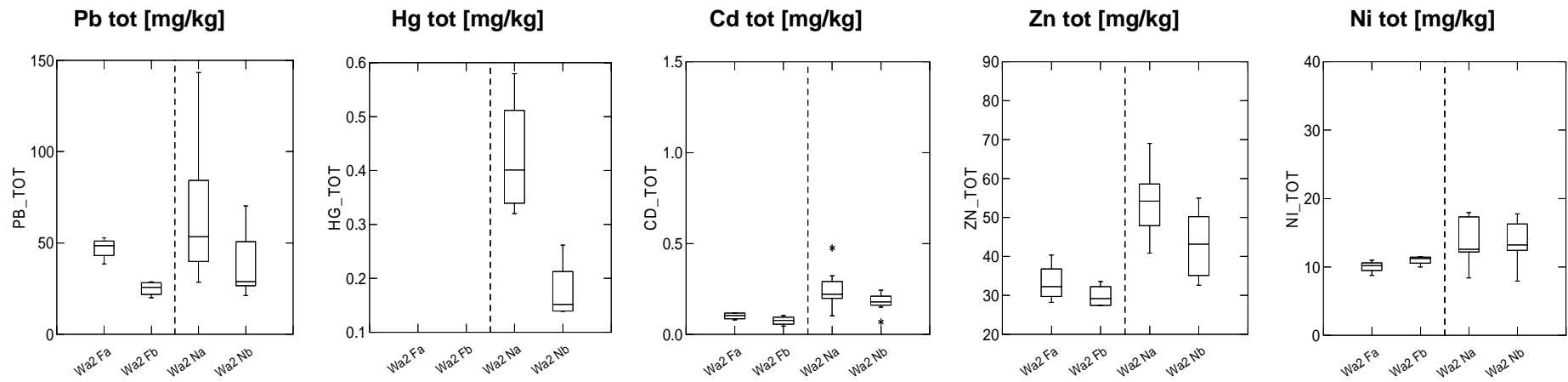
Beprobung 1996/97; La = Landwirtschaftsstandorte, Wa = Waldstandorte; Anzahl Standorte La 1: 7, La 2: 7, La 3: 7, Wa 1: 4, Wa 2: 11



Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang E

### Schadstoffgehalte und Bodenkennwerte in 0-5 cm und 0-20 cm Tiefe der Wald-Standortgruppen

Beprobung 1996/97; Legende: a: 0 - 5 cm, b: 0 - 20 cm, Wa 1: Jura-Standorte, Wa 2: Mittelland-Standorte; Anzahl Standorte: Wa 1: 4; Wa 2: 11



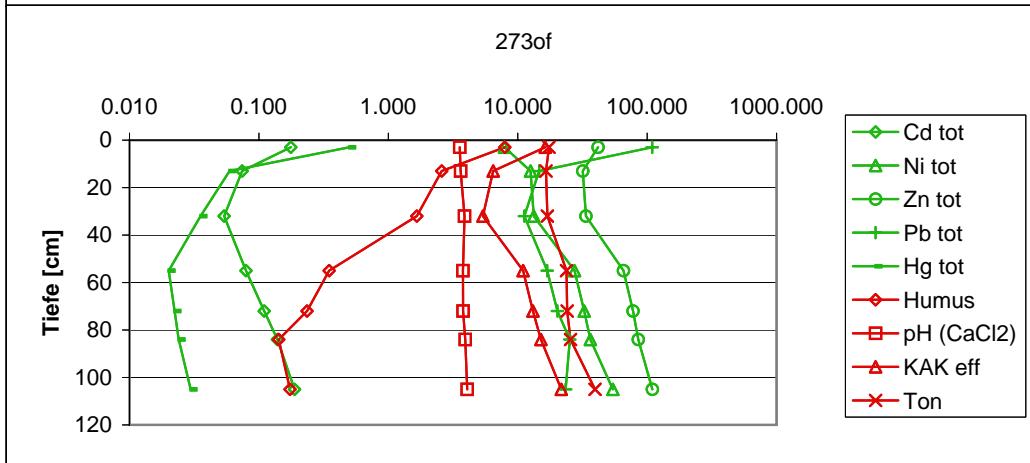
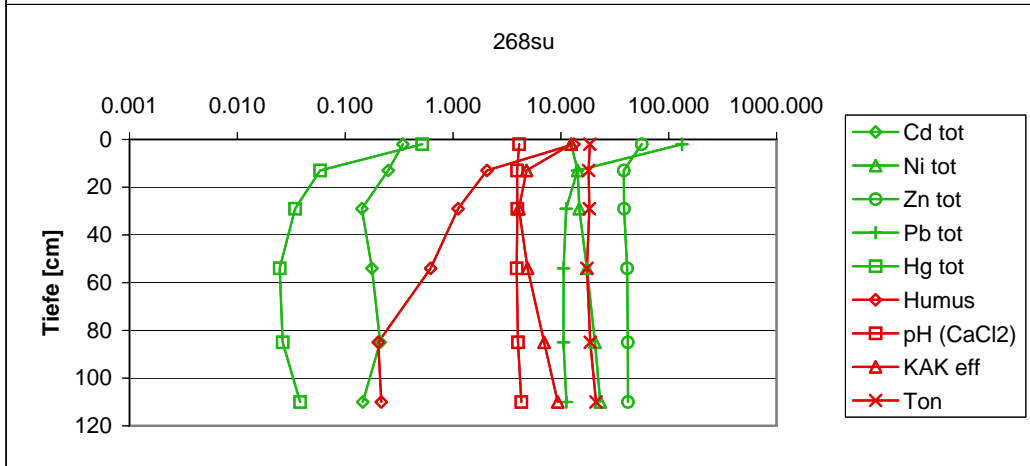
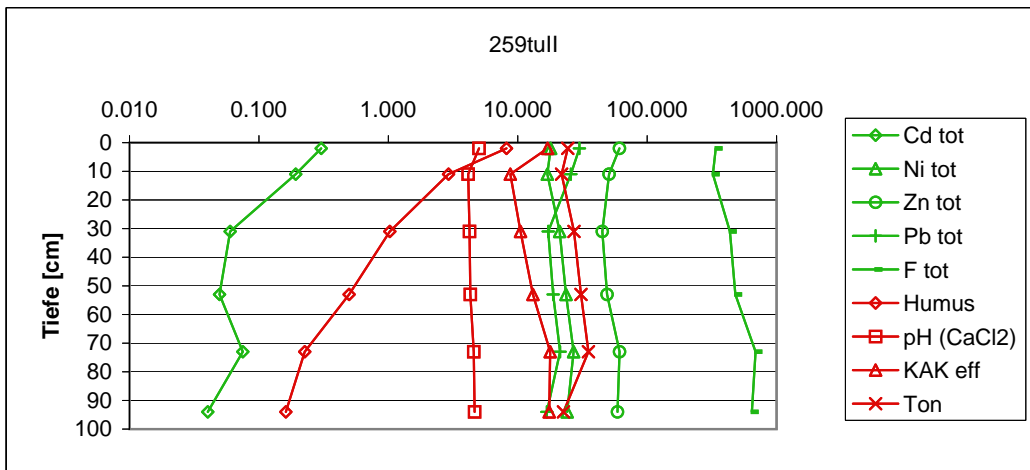
Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang F

### Schadstoffgehalte in der Wald-Standortgruppe Wa 2, differenziert nach Distanz zu Emittenten

Legende: N: Emittentennah, F: Emittentenern a: 0-5 cm, b: 0-20 cm;

Zuordnung der Standorte zu den Gruppen emittentennah und -fern siehe Kapitel 3.2.3

Gehaltsangaben: [mg/kg]



Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang G

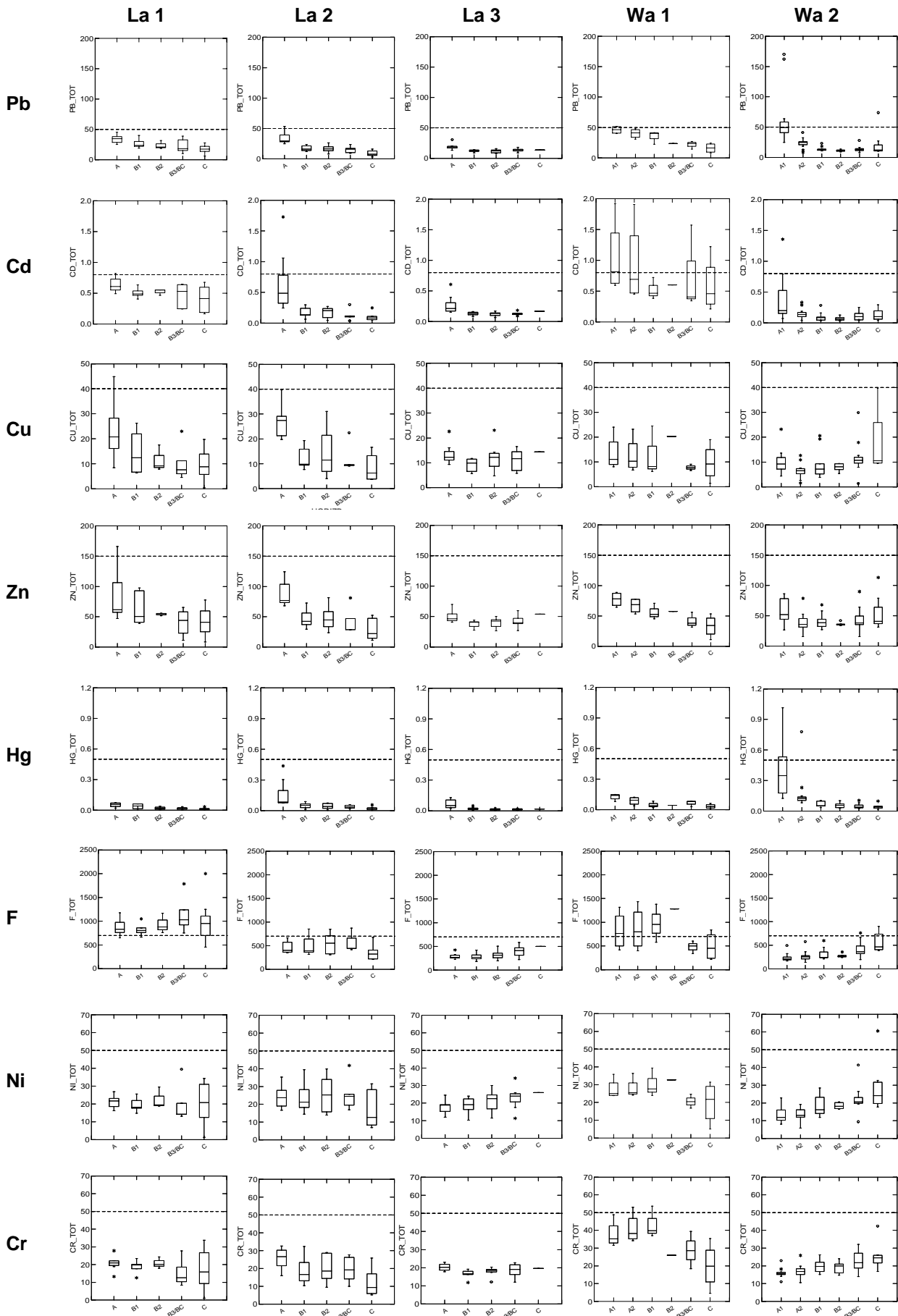
### Tiefenverteilung der Schadstoff-Totalgehalte von drei Waldböden

(Standortgruppe Wa 2); halblogarithmische Darstellung

Legende: rot: Bodenkenngrössen; Einheiten: Humus und Ton: [%], KAK eff: [mmol/z/100g]

grün: Totalgehalte; Einheiten: [mg/kg]

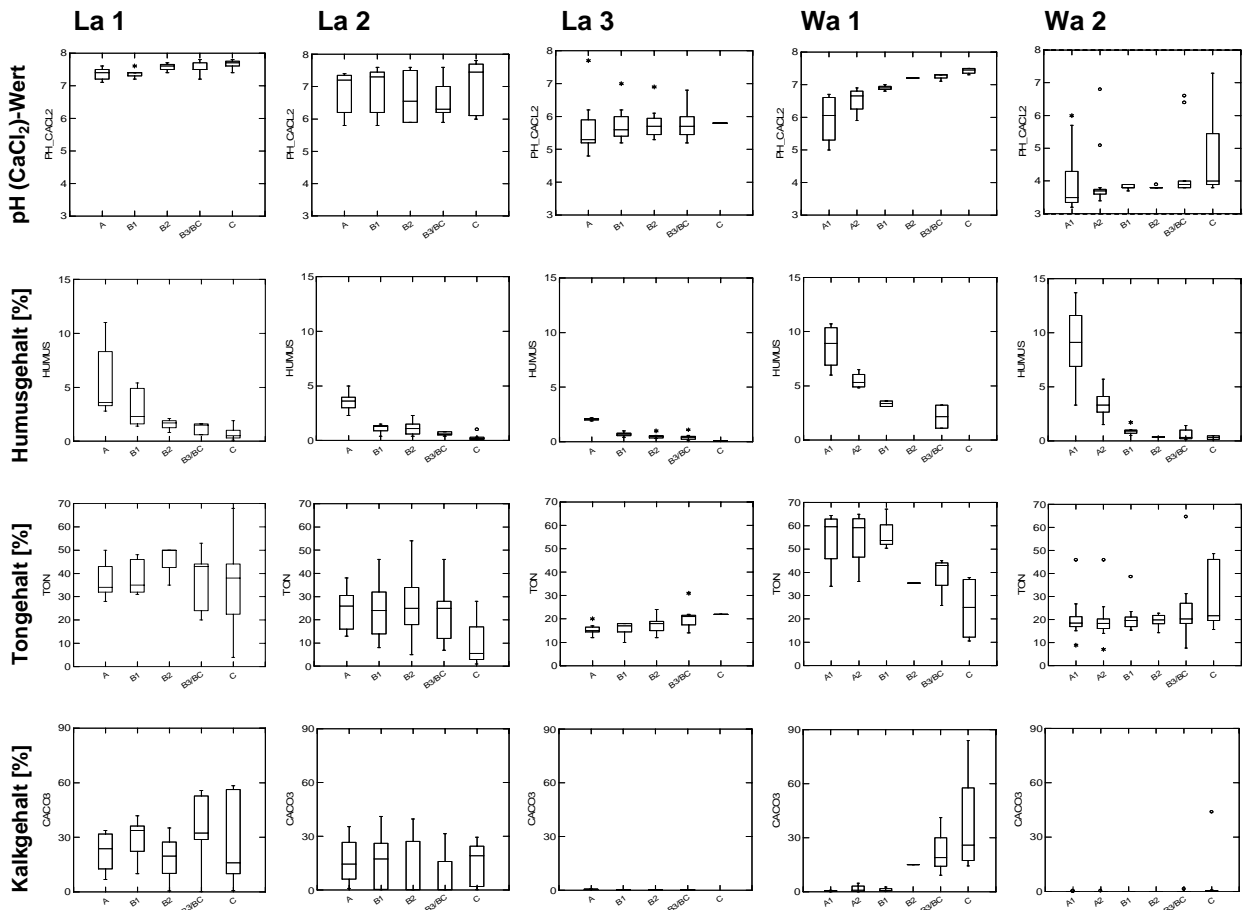




**Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang H1**

**Tiefenprofile der Schadstoff-Totalgehalte der 5 Standortgruppen**

(Legende siehe Anhang H2)



Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang H2

## Tiefenverteilung der Bodenkennwerte der 5 Standortgruppen

Datengrundlagen: KABO AG (1994)

Totalgehalte: Einheit: [mg/kg], gestrichelte Linie: VBBo-Richtwert

Anzahl Proben pro Horizont: siehe nachfolgende Tabelle

Landwirtschaftsstandorte						
Horizonte	A	B1	B2	B3/BC	C	
<b>La 1</b> Anzahl Proben	7	5	3	5	7	
mittlere Tiefe von (cm)	0	16	38	39	42	
mittlere Tiefe bis (cm)	19	33	66	62	89	
<b>La 2</b> Anzahl Proben	7	7	6	5	6	
mittlere Tiefe von (cm)	0	27	44	62	81	
mittlere Tiefe bis (cm)	4	45	64	83	114	
<b>La 3</b> Anzahl Proben	7	7	7	7	1	
mittlere Tiefe von (cm)	0	28	49	74	95	
mittlere Tiefe bis (cm)	28	49	74	102	120	
Waldstandorte						
Horizonte	A1	A2	B1	B2	B3/BC	C
<b>Wa 1</b> Anzahl Proben	4	4	3	1	3	4
mittlere Tiefe von (cm)	0	4	23	(55)	55	81
mittlere Tiefe bis (cm)	4	22	45	(100)	67	113
<b>Wa 2</b> Anzahl Proben	11	11	9	6	11	7
mittlere Tiefe von (cm)	0	7	28	47	59	82
mittlere Tiefe bis (cm)	7	21	52	71	81	101

Tabelle: Anzahl Proben pro Horizont und Tiefenlage der einzelnen Horizonte

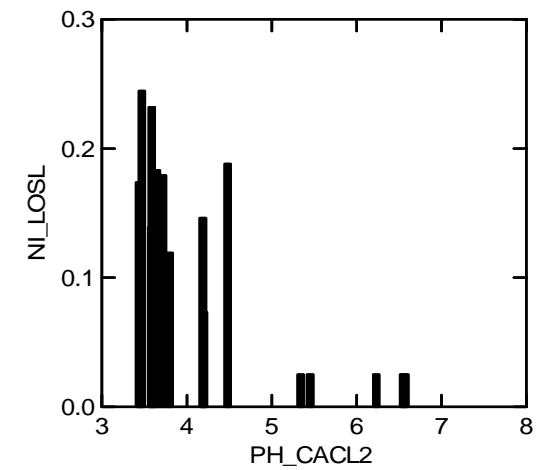
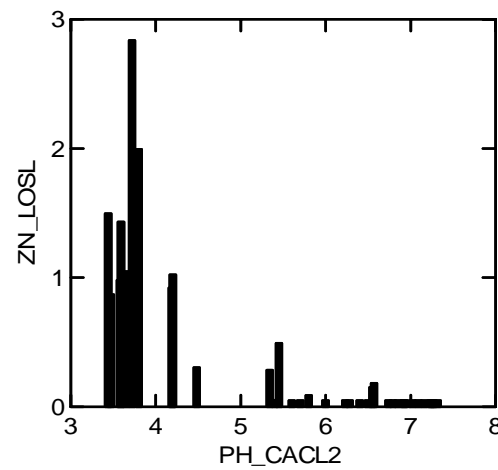
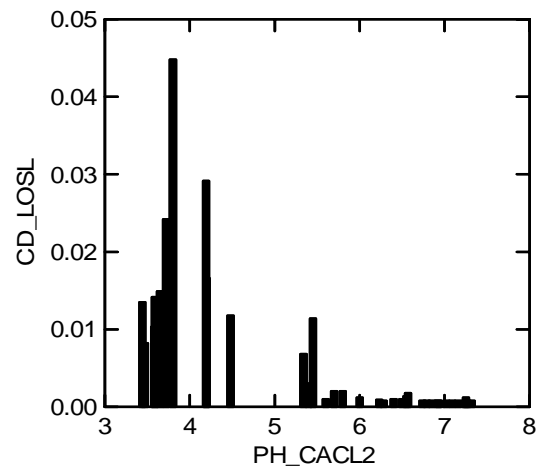
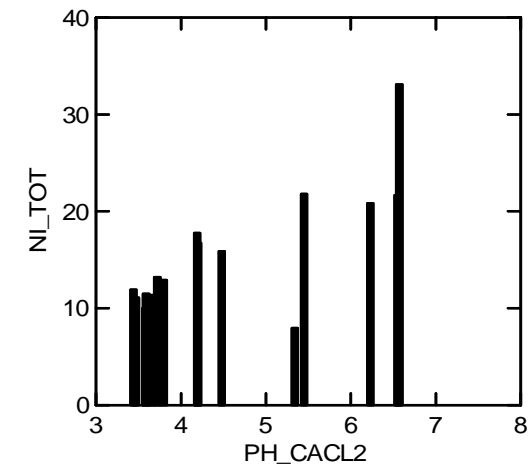
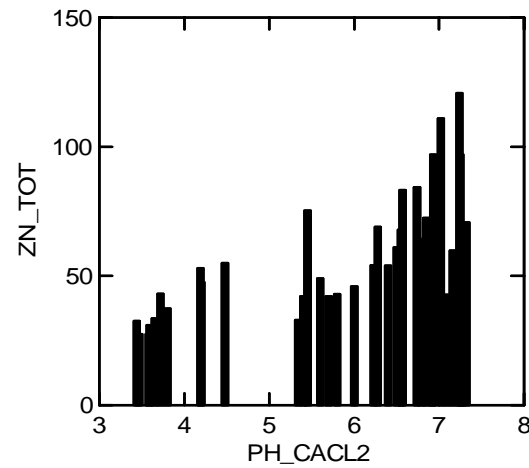
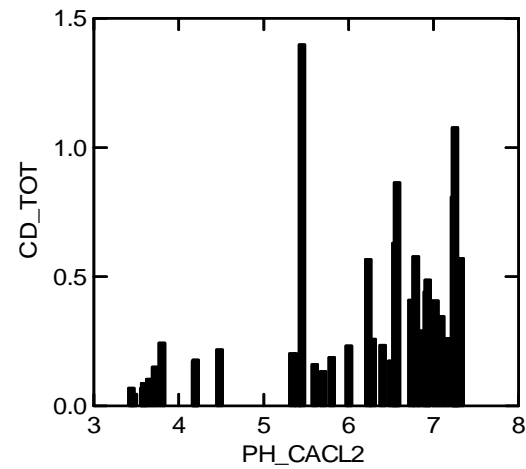
			Pb	Cd	Zn	Cu	Ni
Landwirtschaft	La 1	100ob	5.0	5.0	5.0	5.0	
		101he	5.0	5.0	5.0	5.0	
		122ku	5.0	5.0	5.0	5.0	
		155el	5.0	5.0	5.0	5.0	
		156bo	5.0	5.0	5.0	5.0	
		157sc	5.0	5.0	5.0	5.0	
		158me	5.0	5.0	5.0	5.0	
		Mittelwert La 1	5.0	5.0	5.0	5.0	
	La 2	104me	5.0	5.0	5.0	5.0	
		105me	5.0	5.0	5.0	5.0	
		150sa	5.0	5.0	5.0	5.0	
		151go	5.0	4.5	4.5	5.0	
		154ro	5.0	5.0	5.0	5.0	
		159st	5.0	5.0	5.0	5.0	
		160un	5.0	5.0	5.0	5.0	
		Mittelwert La 2	5.0	4.9	4.9	5.0	
	La 3	103un	5.0	4.0	4.5	5.0	
		106ue	5.0	5.0	5.0	5.0	
		120vo	5.0	4.0	4.5	5.0	
		121gr	5.0	4.0	4.0	5.0	
		123bi	5.0	4.5	4.5	5.0	
152sc		5.0	4.5	4.5	5.0		
153su		5.0	5.0	5.0	5.0		
Mittelwert La 3		5.0	4.4	4.6	5.0		
Wald	Wa 1	221wi	5.0	4.5	5.0		5.0
		222ob	5.0	5.0	5.0		5.0
		224el	5.0	5.0	5.0		5.0
		226vi	5.0	4.0	4.5		4.5
		Mittelwert Wa 1	5.0	4.6	4.9		4.9
	Wa 2	237eg	4.5	1.5	2.0		2.0
		239ob	4.5	1.5	2.0		2.0
		240zo	4.5	1.5	2.0		2.0
		257ru	5.0	1.5	2.0		2.0
		263mo	5.0	2.0	2.5		4.5
		255zu	5.0	2.5	3.5		3.5
		258ge	5.0	4.0	4.0		4.5
		259tull	5.0	2.0	2.5		2.5
		268su	5.0	2.0	2.5		2.5
		269le	5.0	1.5	2.5		2.5
		273of	5.0	1.5	2.0		2.0
		Mittelwert Wa 2	4.9	2.0	2.5		2.7
		234mu	5.0	5.0	5.0		5.0

Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang I

## Relative Bindungsstärken der KABO-Standorte

0-20 cm-Flächenproben, Beprobung 1996/97

Legende: Rel. Bindungsstärke: 1: sehr gering, 2: gering, 3: mittel, 4: stark, 5: sehr stark



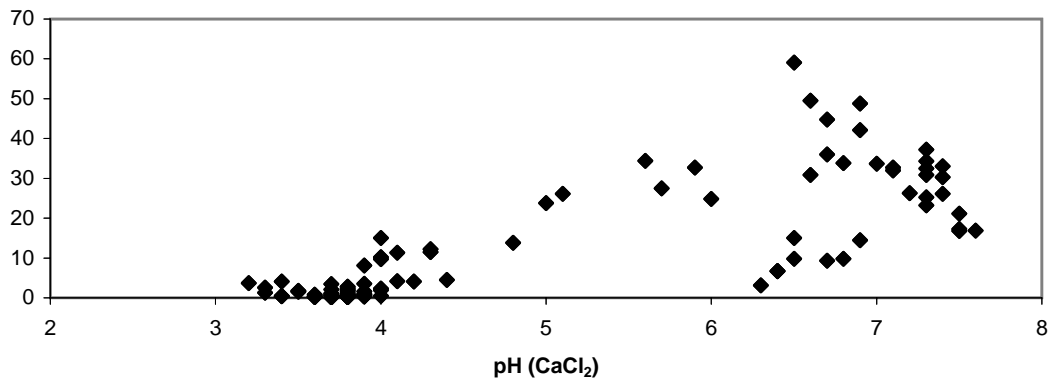
Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang K

### Beziehungen zwischen den löslichen Cadmium-, Zink- sowie Nickelgehalten und dem pH (CaCl<sub>2</sub>)-Wert

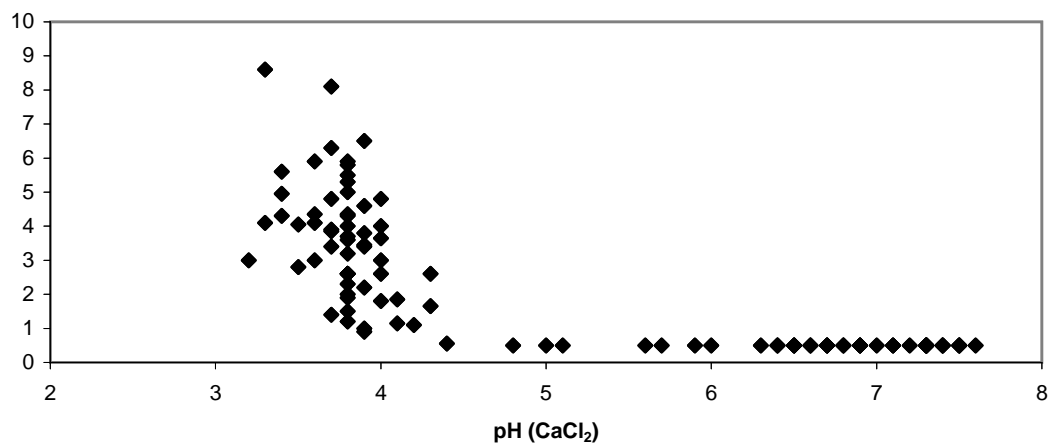
Beprobung 1996/97; Proben 0 - 5 cm und 0 - 20 cm der Waldstandorte, Einheit: [mg/kg]

Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Totalgehalte dargestellt.

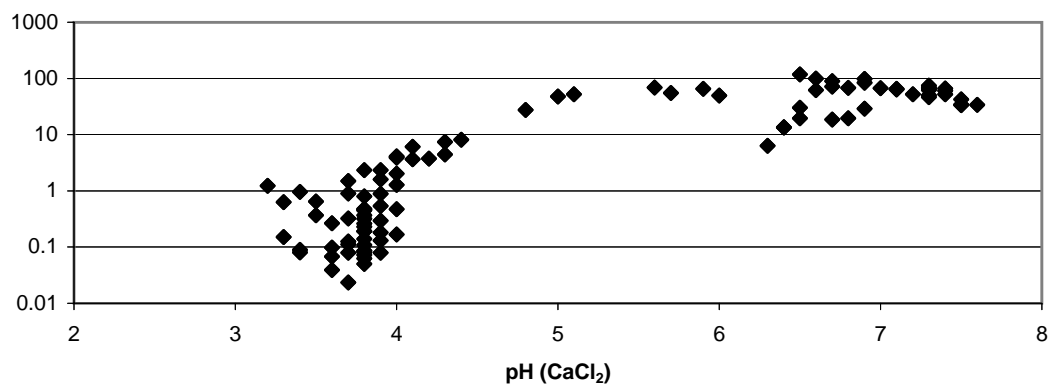
KAK Ca (mmol/z/100g)



KAK Al (mmol/z/100g)



Verhältnis KAK Ca/KAK Al



**Kalzium-Aluminium-Verhältnis (KAK Ca/KAK Al) in den Mittelland-Waldstandorten**  
Daten: Horizontbezogene Profildaten der 16 Waldstandorte aus der ersten Hauptuntersuchung  
Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang L

## Ursachen von Schadstoffveränderungen in 0-20 cm Bodentiefe

Folgende Beschreibung von möglichen Ursachen für Konzentrationsänderungen sind dem Bericht BUWAL (2000) entnommen.

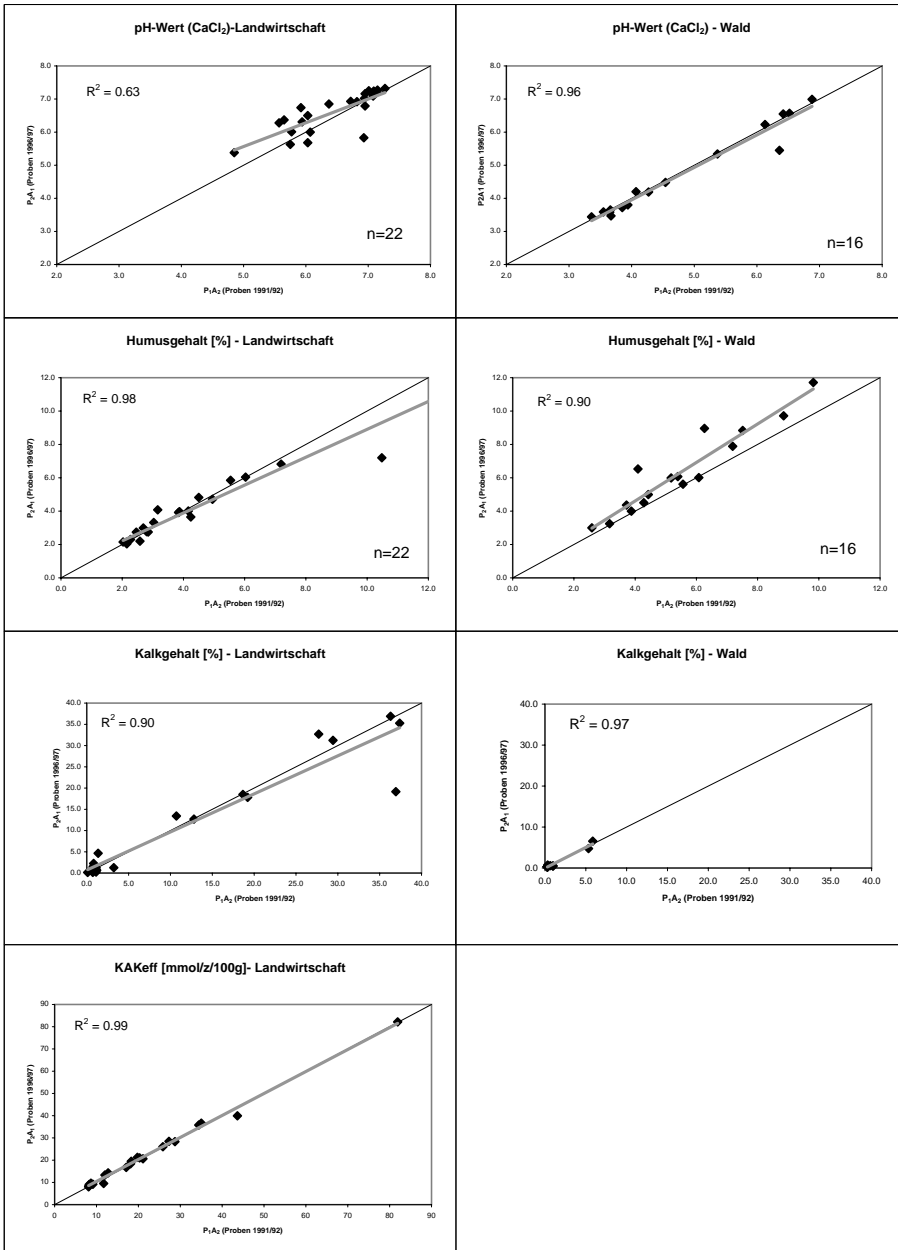
Atmosphärische Einträge	Schadstoffeinträge aus der Luft sind diffus und ubiquitär; entsprechend gibt es keine unbelasteten Böden mehr (BUWAL, 1993). Je nach Emittentennähe und lufthygienischen Verhältnissen sind sie verschieden gross. Bei Waldstandorten tragen zusätzlich Auskämmeffekte zur atmosphärischen Deposition bei.
Direkte stoffliche Einträge	<p>Direkte Einträge erfolgen vorwiegend über landwirtschaftliche Hilfsstoffe. Darunter werden Dünger und Pflanzenbehandlungsmittel zusammengefasst. Hofdünger, Abfalldünger, Mineraldünger und Pflanzenbehandlungsmittel können Schwermetalle als Nährstoffe, Wirkstoffe oder als Verunreinigungen enthalten.</p> <p>Bei den Hofdüngern ist vor allem der Einsatz von Schweinegülle für die Anreicherung der Schwermetalle Kupfer und Zink von Bedeutung.</p> <p>Bei den Mineraldüngern sind die Phosphatdünger für die Schwermetalle Blei und sekundär auch Kupfer, Cadmium und Zink zu beachten.</p> <p>Bei den Pflanzenbehandlungsmitteln tragen vor allem die in Fungiziden als Wirkstoffe eingesetzte Elemente Kupfer und Zink zu Anreicherungen bei.</p> <p>Gemäss NABO (BUWAL, 1993) sind die Einträge für Blei, Nickel und Cobalt aus landwirtschaftlichen Hilfsstoffen vernachlässigbar.</p>
Ernteentzüge	Beim Vergleich von verschiedenen Ackerkulturen, Grasland und der Holzproduktion bezüglich Ernteentzügen von Cadmium, Zink und Kupfer kommt Desaulles (BUWAL, 2000) bei Mais und Zink auf die höchste Konzentrationsabnahme von 2.25 mg/kg in fünf Jahren.
Anthropogene Bodendurchmischung	Durch eine Bodenbearbeitung, die tiefer als 20 cm reicht, werden schadstoffreichere oberflächennahe Schichten mit meistens schadstoffärmeren, tieferliegenden Schichten vermischt. Dadurch wird die Konzentration in 0-20 cm Tiefe vermindert.
Natürliche Bodendurchmischung	Bodenorganismen, insbesondere die Regenwürmer, durchmischen den Boden und können somit ebenfalls zur Gehaltsverminderung von Schadstoffen in den obersten 20 cm beitragen.
Rückstandsanreicherung	Pedogenetische oder biologische Prozesse können durch Auswaschung der Verwitterungsprodukte zur Anreicherung von Schadstoffen in den obersten Bodenschichten führen.

Vertikale Schadstoffverlagerung durch Versauerung

Die Bodenversauerung als natürlicher Bodenprozess wird durch den anthropogenen Eintrag von Säuren und Säurebildnern aus der Luft beschleunigt. Dies kann zu einer Mobilisation der leicht löslichen Schwermetalle führen und deren Verlagerung in tiefere Bodenschichten oder deren Aufnahme durch die Pflanzenwurzeln bewirken.

Landwirtschaftsstandorte:

Waldstandorte:



Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang N1

**Streudiagramme der Bodenkennwerte: P<sub>1</sub>A<sub>2</sub> (Proben 1991/92) und P<sub>2</sub>A<sub>1</sub> (1996/97)**

Punkte über der Diagonalen bedeuten Zunahmen, Punkte darunter Abnahmen

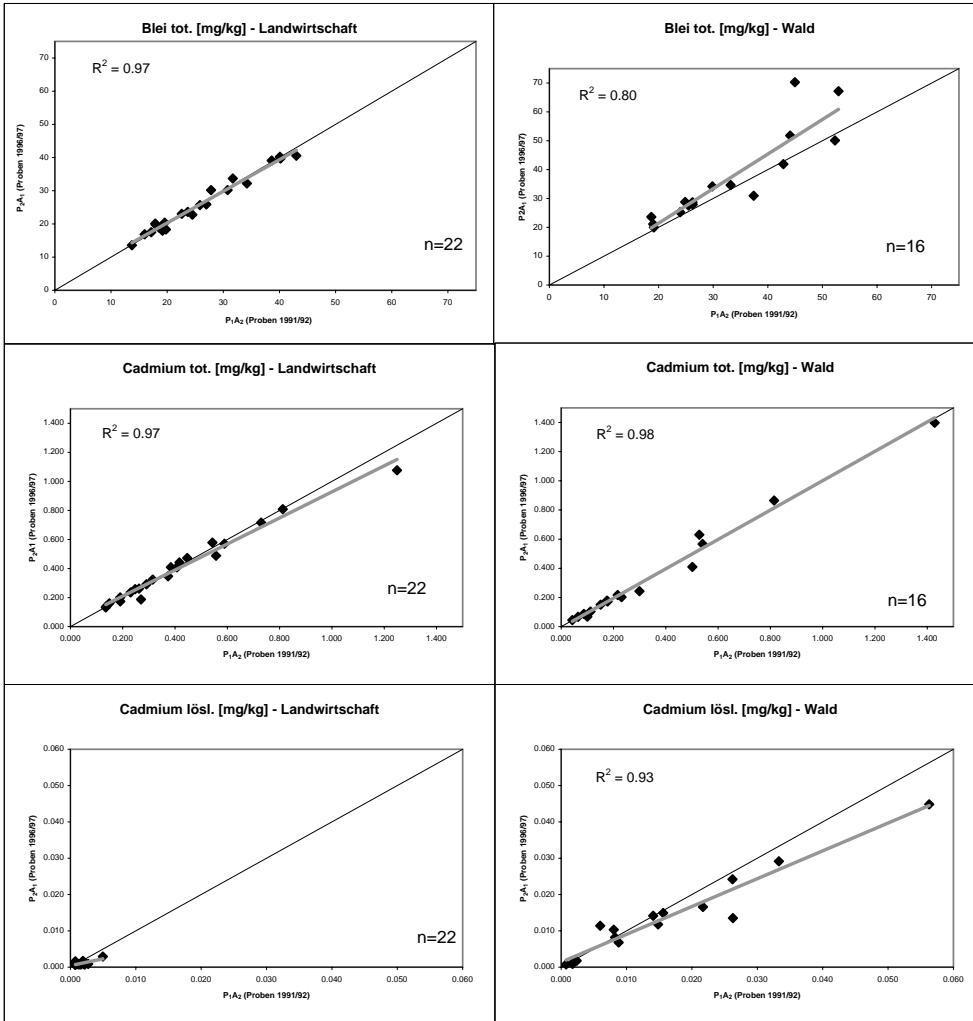
Graue Linie: Trendlinie (lineare Regression) mit Angabe des Bestimmtheitsmasses (R<sup>2</sup>)

Bei Diagramm "Humusgehalt - Landwirtschaft" befindet sich der Standort 124ab (Moorboden) ausserhalb des Rahmens



**Landwirtschaftsstandorte**

**Waldstandorte**



Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang N2

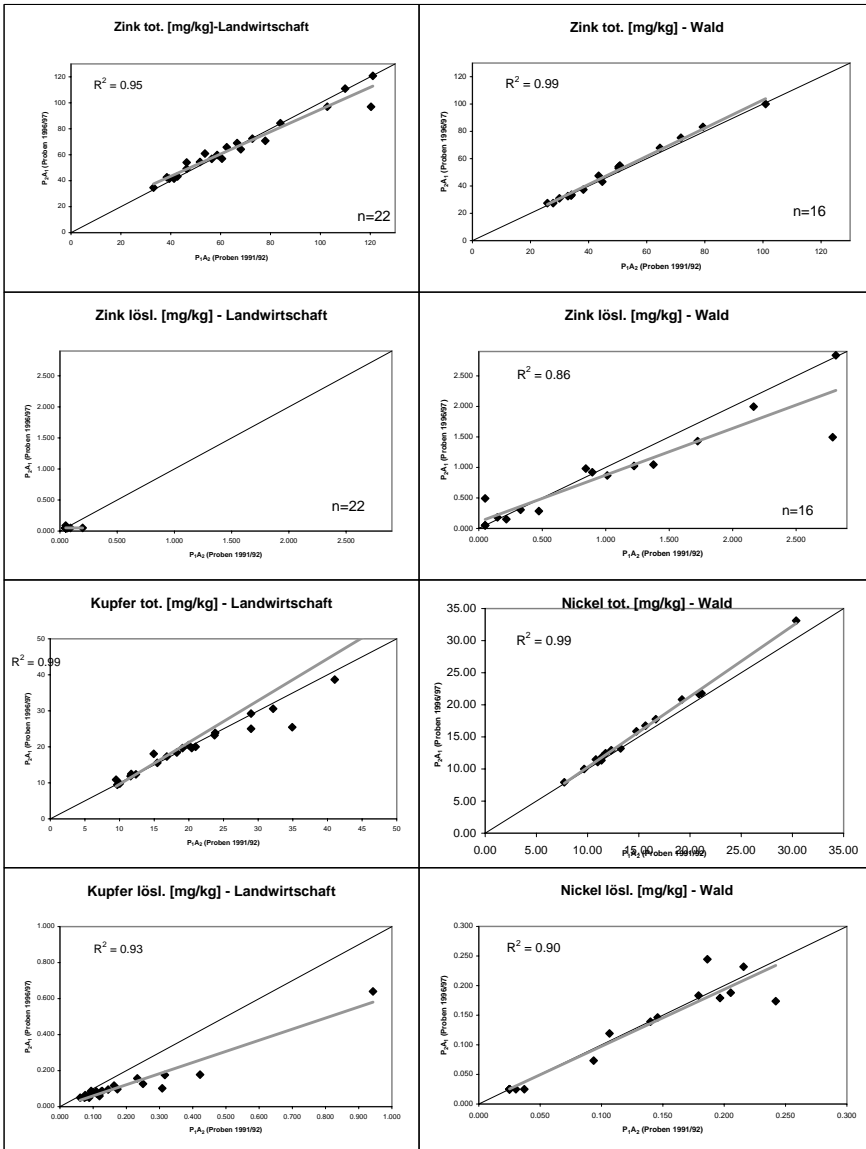
**Streudiagramme der Blei- und Cadmiumgehalte: P<sub>1</sub>A<sub>2</sub> (Proben 1991/92) und P<sub>2</sub>A<sub>1</sub> (1996/97)**

Punkte über der Diagonalen bedeuten Zunahmen, Punkte darunter Abnahmen.

Graue Linie: Trendlinie (lineare Regression) mit Angabe des Bestimmtheitsmasses (R<sup>2</sup>)

Landwirtschaftsstandorte:

Waldstandorte:



Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang N3

**Streuungsdiagramme der Zink-, Nickel- und Kupfergehalte:  $P_1A_2$  (Proben 1991/92) und  $P_2A_1$  (1996/97)**

Punkte über der Diagonalen bedeuten Zunahmen, Punkte darunter Abnahmen.

Graue Linie: Trendlinie (lineare Regression) mit Angabe des Bestimmtheitsmasses ( $R^2$ )

Beim Diagramm "Kupfer tot. - Landwirtschaft" liegt der Standort 157sc (Rebberg) ausserhalb des Rahmens

Stdr	Tiefe	Probe	Probe	Analytik	pH	Humus	Kalk	KAK eff	Pb tot	Cd tot	Cr tot	Cu tot	Ni tot	Zn tot	Hg tot	F tot	Pb lösl	Cu lösl	Cd lösl	Ni lösl	Zn lösl	F lösl	Körnung [%]		
Nr	cm	Bez.	Datum	Datum/Nr.	(CaCl <sub>2</sub> )	%	%	mmol/z/100g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	Ton	Schluff	Sand
100ob	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.1	7.3	3.9	27.7		21	34	0.589		20	78		619		0.145	0.001		0.050	13.9			
100ob	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.2	7.3	4.0	32.7		21	32	0.571		20	71		614		0.095	0.001		0.050	13.7			
101he	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.3	7.2	4.2	36.9		20	28	0.447		35	46			0.025	0.308	0.001		0.050				
101he	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.4	7.3	3.7	19.2		21	30	0.472		25	54			0.025	0.102	0.001		0.050				
103un	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.5	4.9	2.6	0.7		9	16	0.190		12	39				0.088	0.005		0.198	17.1			
103un	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.6	5.4	2.2	0.2		10	17	0.201		12	42				0.050	0.003		0.051	19.2			
104me	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.7	5.9	5.5	1.1		34	26	0.384		24	84		600		0.124	0.002		0.050				
104me	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.8	6.7	5.9	1.3		36	26	0.409		23	84		624		0.083	0.001		0.050				
105me	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.9	6.4	5.0	1.4		27	24	0.291		21	73				0.109	0.001		0.050				
105me	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.10	6.9	4.7	4.7		28	23	0.291		20	72				0.085	0.001		0.050				
106ue	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.11	6.0	2.8	0.8		13	18	0.191		15	54				0.088	0.001		0.050				
106ue	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.12	6.5	2.8	2.3		14	20	0.174		18	61				0.064	0.001		0.050				
120vo	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.13	5.8	2.5	0.8		8	19	0.149		12	46				0.061	0.002		0.052				
120vo	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.14	5.6	2.7	1.0		9	19	0.160		12	49				0.050	0.001		0.050				
121gr	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.15	6.0	2.3	1.0		8	14	0.135		10	41				0.113	0.002		0.050				
121gr	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.16	5.7	2.3	0.7		8	14	0.133		10	42				0.071	0.002		0.050				
122ku	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.17	7.0	7.2	10.7		35	27	0.543		10	68		750		0.076	0.001		0.050	8.0			
122ku	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.18	6.8	6.8	13.4		37	26	0.579		9	64		780		0.064	0.001		0.050	7.7			
123bi	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.19	6.9	2.7	1.2		12	18	0.270		12	43				0.119	0.001		0.050				
123bi	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.20	5.8	3.0	0.7		10	20	0.187		12	43				0.059	0.002		0.088				
124ab	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.21	5.9	34.4	1.1		82	43	0.729		41	61	0.186			0.110	0.001		0.067				
124ab	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.22	6.3	29.6	0.8		82	41	0.716		39	57	0.169			0.074	0.001		0.050				
150sa	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.23	5.6	3.8	0.8		18	39	0.247		20	67				0.094	0.002		0.063				
150sa	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.24	6.3	3.9	1.5		19	39	0.258		20	69				0.087	0.001		0.050				
151go	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.25	6.1	2.0	0.7		9	20	0.315		24	56				0.173	0.002		0.050				
151go	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.26	6.0	2.2	1.0		9	20	0.324		24	57				0.097	0.001		0.050				
152sc	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.27	5.8	2.2	1.1		8	17	0.138		10	33				0.080	0.002		0.050				
152sc	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.28	6.0	2.0	0.2		8	18	0.141		11	35				0.056	0.001		0.050				
153su	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.29	5.7	2.2	0.1		8	24	0.230		18	52				0.127	0.003		0.092				
153su	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.30	6.4	2.2	0.2		9	24	0.235		18	54				0.087	0.001		0.050				
154ro	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.31	7.0	4.2	19.2		17	23	0.262		19	59				0.250	0.001		0.050				
154ro	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.32	7.2	4.0	17.8		17	23	0.262		20	60				0.127	0.001		0.050				
155el	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.33	6.7	10.5	29.4		44	20	0.557		29	120		826		0.233	0.001		0.050	2.7			
155el	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.34	6.9	7.2	31.2		40	18	0.488		25	97		830		0.157	0.001		0.050	4.6			
156bo	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.35	7.1	3.2	36.3		20	19	0.374		15	38				0.163	0.001		0.050				
156bo	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.36	7.1	4.1	36.9		21	18	0.347		16	43				0.117	0.001		0.050				
157sc	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.37	6.9	6.0	18.7		29	32	0.407		241	110				0.943	0.001		0.050				
157sc	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.38	7.0	6.0	18.5		28	34	0.408		241	111				0.640	0.001		0.050				
158me	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.39	6.8	2.9	3.2		18	31	0.417		17	62		684	0.025	0.074	0.001		0.050	13.0			
158me	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.40	6.9	2.8	1.3		18	30	0.442		17	66		686	0.025	0.050	0.001		0.050	14.1			
159st	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.41	7.0	3.0	12.8		12	40	1.249		32	103	0.192			0.316	0.002		0.050				
159st	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.42	7.3	3.3	12.7		13	40	1.077		31	97	0.168			0.176	0.001		0.050				
160un	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	98-0512.43	7.1	4.5	37.4		26	40	0.812		29	121	0.395			0.422	0.001		0.050				
160un	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	98-0512.44	7.2	4.8	35.3		26	40	0.808		29	121	0.377			0.178	0.001		0.050				

Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang O1

**Messwerte Landwirtschaftsstandorte: zweite Hauptuntersuchung; Flächenproben 1991/92 und 1996/97**

Stdr	Tiefe	Probe	Probe	Analytik	pH	Humus	Kalk	KAK eff	Pb tot	Cd tot	Cr tot	Cu tot	Ni tot	Zn tot	Hg tot	F tot	Pb lösl	Cu lösl	Cd lösl	Ni lösl	Zn lösl	F lösl	Körnung [%]		
Nr	cm	Bez.	Datum	Datum/Nr.	(CaCl <sub>2</sub> )	%	%	mmol/z/100g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	Ton	Schluff	Sand	
221wi	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.51	6.1	7.2	0.7		52	0.541	65		19	50		680			0.002	0.025	0.050	4.7			
221wi	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.1	6.2	10.0	1.5	40	52	0.576	66	21	58		664			0.001	0.025	0.050	4.1	62	33	5	
221wi	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.2	6.2	7.9	0.6	38	50	0.567	67	21	54		688			0.001	0.025	0.050	4.6	62	33	5	
222ob	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.52	6.5	8.8	1.0		44	0.814	35	30	79		1312			0.002	0.025	0.147	8.3				
222ob	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.3	6.6	11.5	0.8	47	51	0.785	34	32	82		1272			0.004	0.025	0.050	5.6	60	31	10	
222ob	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.4	6.6	9.7	0.5	47	52	0.865	36	33	83		1300			0.002	0.025	0.182	7.6	61	31	7	
224el	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.53	6.4	9.8	5.8		37	0.528	29	21	65					0.002	0.030	0.217					
224el	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.5	6.4	15.4	7.2	59	36	0.632	27	20	74					0.002	0.025	0.272		68	31	1	
224el	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.6	6.6	11.7	6.6	56	31	0.630	29	22	68					0.001	0.025	0.151		68	30	2	
226vi	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.54	6.4	5.2	1.0		33	1.428	34	21	72					0.006	0.025	0.050					
226vi	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.7	5.9	8.2	1.1	23	39	1.308	32	21	79					0.007	0.025	0.407		35	52	13	
226vi	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.8	5.5	6.0	0.5	20	35	1.398	34	22	75					0.011	0.025	0.492		35	53	11	
234mu	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.55	6.9	7.5	5.3		43	0.502		93	12	101				0.001	0.025	0.050					
234mu	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.9	7.0	8.8	4.7	28	42	0.410		37	12	100				0.001	0.025	0.050		17	28	55	
237eg	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.56	3.7	4.1	0.3		19	0.043			11	28				0.008	0.186	1.012					
237eg	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.10	3.3	18.4	0.3	13	53	0.091			10	31				0.016	0.345	1.870		22	45	33	
237eg	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.11	3.5	6.5	0.3	7	24	0.045			11	27				0.008	0.245	0.868		18	46	36	
239ob	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.57	3.6	4.4	0.3		19	0.087			11	30				0.014	0.216	1.724					
239ob	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.12	3.4	10.2	0.3	12	38	0.119			10	33				0.024	0.342	2.689		19	54	27	
239ob	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.13	3.6	5.0	0.3	7	20	0.087			11	31				0.014	0.232	1.431		18	54	28	
240zo	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.58	3.7	5.6	0.3		25	0.112			11	34				0.016	0.179	1.376					
240zo	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.14	3.4	9.9	0.3	12	48	0.116			11	40				0.018	0.276	2.279		23	51	27	
240zo	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.15	3.7	5.6	0.3	9	28	0.104			11	34				0.015	0.183	1.046		21	52	27	
255zu	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.59	4.5	4.3	0.3		26	0.216			15	51	0.230			0.015	0.205	0.329					
255zu	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.16	4.7	10.7	0.3	22	42	0.258			17	69	0.580			0.008	0.184	0.452		34	41	25	
255zu	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.17	4.5	4.5	0.3	19	28	0.217			16	55	0.262			0.012	0.188	0.305		34	40	26	
257ru	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.60	3.7	5.4	0.3		26	0.065			10	26				0.008	0.140	0.843					
257ru	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.18	3.3	15.1	0.3	12	49	0.080			9	28				0.013	0.176	1.589		20	53	28	
257ru	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.19	3.6	6.1	0.3	7	29	0.068			10	27				0.010	0.139	0.981		18	52	31	
258ge	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.61	5.4	3.2	0.3		19	0.231			8	34	0.136			0.009	0.037	0.473					
258ge	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.20	4.6	7.2	0.3	13	53	0.475			8	60	0.443			0.015	0.048	1.820		12	12	75	
258ge	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.21	5.3	3.2	0.7	8	21	0.203			8	33	0.139			0.007	0.025	0.284		10	11	78	
259tull	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.62	4.3	2.6	0.3		24	0.178			17	50		359		0.033	0.146	0.894	2.8				
259tull	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.22	4.3	4.0	0.3	11	28	0.221			18	57		366		0.030	0.133	1.140	3.3	24	32	44	
259tull	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.23	4.2	3.0	0.3	9	25	0.172			18	53		363		0.029	0.146	0.921	2.9	23	32	45	
263mo	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.63	4.1	3.7	0.3		25	0.175			16	43				0.022	0.094	1.223					
263mo	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.24	4.3	6.2	0.3	9	37	0.218			17	54				0.013	0.052	1.086		21	44	35	
263mo	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.25	4.2	4.4	0.3	7	29	0.178			17	47				0.017	0.073	1.024		20	45	35	
268su	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.64	3.9	3.9	0.3		30	0.299			12	38	0.128			0.056	0.107	2.165					
268su	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.26	3.7	8.8	0.3	10	87	0.323			12	46	0.359			0.047	0.149	2.860		19	35	46	
268su	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.27	3.8	4.0	0.3	6	34	0.243			13	37	0.140			0.045	0.119	1.996		16	35	49	
269le	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.65	3.9	6.3	0.3		45	0.151			13	45				0.026	0.197	2.813					
269le	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.28	3.6	16.2	0.3	13	143	0.177			13	50				0.024	0.179	3.663		24	48	28	
269le	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.29	3.7	9.0	0.3	9	70	0.150			13	43				0.024	0.179	2.838		21	47	32	
273of	0-20	P <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	91/92	96-1109.66	3.4	6.1	0.3		53	0.100			11	33	0.141		0.984	0.026	0.242	2.788					
273of	0-5	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.30	3.3	11.1	0.3	12	81	0.103			12	41	0.320		0.701	0.020	0.242	2.513		20	41	40	
273of	0-20	P <sub>2</sub> A <sub>1</sub>	96/97	96-1109.31	3.4	6.0	0.3	8	67	0.069			12	33	0.164		0.893	0.014	0.174	1.495		17	40	43	

Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang O2

**Messwerte Waldstandorte: zweite Hauptuntersuchung; Flächenproben 1991/92 und 1996/97**

Stdr	Tiefe	Probe	Probe	Analytik	pH	Humus	Kalk	KAK eff	Pb tot	Cd tot	Cr tot	Cu tot	Ni tot	Zn tot	Hg tot	F tot	Pb lösl	Cu lösl	Cd lösl	Ni lösl	Zn lösl	F lösl	Körnung [%]		
Nr	cm	Bez.	Datum	Datum/Nr.	(CaCl <sub>2</sub> )	%	%	mmol/z/100g	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	Ton	Schluff	Sand
259tull	2	P1	96	96-1109.32	5.0	8.2	0.3	17	30	0.303			18	61		339			0.015	0.087	0.539	3.9	24	31	45
259tull	11	P2	96	96-1109.33	4.1	2.9	0.3	9	26	0.192			17	51		322			0.040	0.224	1.136	3.1	22	32	46
259tull	31	P3	96	96-1109.34	4.2	1.0	0.3	11	17	0.060			21	45		436			0.010	0.199	0.098	2.4	27	32	41
259tull	53	P4	96	96-1109.35	4.3	0.5	0.3	13	19	0.050			24	49		480			0.004	0.152	0.050	2.3	31	33	36
259tull	73	P5	96	96-1109.36	4.6	0.2	0.3	18	21	0.075			27	61		688			0.006	0.159	0.050	4.1	35	35	30
259tull	94	P6	96	96-1109.37	4.6	0.2	0.3	18	17	0.040			24	59		644			0.002	0.106	0.050	4.8	23	45	33
268su	2	P1	96	96-1109.38	4.1	13.2	0.3	13	133	0.343			12	56	0.518				0.029	0.118	2.315		19	33	48
268su	13	P2	96	96-1109.39	3.9	2.1	0.3	5	14	0.250			14	38	0.059				0.053	0.122	1.888		18	35	47
268su	29	P3	96	96-1109.40	4.0	1.1	0.3	4	11	0.143			15	39	0.034				0.029	0.069	1.605		18	34	47
268su	54	P4	96	96-1109.41	3.9	0.6	0.3	5	11	0.177			17	41	0.025				0.027	0.087	1.709		17	32	50
268su	85	P5	96	96-1109.42	4.0	0.2	0.3	7	11	0.211			21	42	0.026				0.049	0.203	0.689		19	33	48
268su	110	P6	96	96-1109.43	4.3	0.2	0.3	9	11	0.145			23	42	0.038				0.012	0.119	0.074		21	44	35
273of	3	P1	96	96-1109.44	3.6	7.9	0.3	16	109	0.176			8	42	0.500		0.431		0.021	0.197	2.526		17	31	51
273of	13	P2	96	96-1109.45	3.6	2.6	0.3	6	15	0.074			13	32	0.059		0.324		0.017	0.143	1.123		17	36	47
273of	32	P3	96	96-1109.46	3.9	1.7	0.3	5	11	0.054			13	34	0.035		0.074		0.009	0.105	0.714		17	40	43
273of	55	P4	96	96-1109.47	3.8	0.3	0.3	11	17	0.079			27	66	0.020		0.484		0.006	0.103	0.757		24	46	30
273of	72	P5	96	96-1109.48	3.8	0.2	0.3	13	20	0.110			33	78	0.022		0.421		0.015	0.278	0.803		24	51	25
273of	84	P6	96	96-1109.49	3.9	0.1	0.3	15	25	0.139			36	85	0.024		0.119		0.025	0.555	0.513		26	59	15
273of	105	P7	96	96-1109.50	4.1	0.2	0.3	22	23	0.188			54	110	0.030		0.073		0.007	0.468	0.206		40	45	16

Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau / Anhang O3

Messwerte Waldstandorte: Profilproben 1996; zweite Hauptuntersuchung