

## Langfristiges Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Graubünden

Bericht über die Auswertung der Erstbeprobung 1989-1994  
November 1997

# Langfristiges Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Graubünden

**Auswertung der Erstbeprobung**  
1990 – 1993

**November 1997**

**Herausgeber:**

Amt für Umweltschutz Graubünden

**Auswertungen:**

Amt für Umweltschutz Graubünden  
BABU GmbH, Zürich, Dr. U. Hoins

**Probenahmen / Analytik:**

Amt für Umweltschutz Graubünden  
Sieber, Cassina und Handke AG, Chur  
Sulzer INNOTECH AG, Winterthur

**Italienische Übersetzung (Kurzfassung):**

Amt für Umweltschutz Graubünden

**Romanische Übersetzung (Kurzfassung):**

Standeskanzlei Graubünden

**Gestaltung:**

BABU GmbH, Zürich

**Titelbild:**

Amt für Umweltschutz Graubünden

**Bezugsadresse:**

Amt für Umweltschutz Graubünden  
Gürtelstrasse 89  
7001 Chur

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	ii
Glossar	iii
<b>KURZFASSUNG</b>	<b>V</b>
<b>1. AUSGANGSLAGE</b>	<b>1</b>
<b>2. LANGFRISTIGE BODENBEOBACHTUNG - INSTRUMENT IM BODENSCHUTZ</b>	<b>1</b>
2.1 Ziele und Aufgaben der Bodenbeobachtung im Kanton Graubünden	2
2.2 Vorgehen und Methoden	2
<b>3. LANGFRISTIGES BODENBEOBACHTUNGSNETZ - ERGEBNISSE DER ERSTERHEBUNG</b>	<b>4</b>
3.1 Bodenbelastung nach VSBo	6
3.2 Geogene und anthropogene Schwermetallanteile	7
3.3 Schwermetallgehalte und pH-Werte: Differenzierung nach standörtlichen Kriterien	10
3.4 Die Filterfunktion der Böden – oder Schwermetalle werden mobil	13
3.5 Vom Belastungspotential zum Belastungsrisiko - oder wann Schwermetalle zur Belastung werden	15
3.6 Bodenversauerung	20
<b>4. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b>	<b>22</b>
4.1 Schlussfolgerungen	22
4.2 Ausblick	24
<b>ANHANG</b>	<b>27</b>
Anhang 1: Formen der Bodenschädigung und mögliche verursachende Belastungen	
Anhang 2: Totale und lösliche Schwermetall- und Fluor-Gehalte der DBS; schweizerische Vergleichswerte	
Anhang 3: Anthropogene Schwermetallanteile der R-DBS: Quotienten aus Ober- und Unterbodengehalten	
Anhang 4: Box-Plot-Lesehilfe	
Anhang 5: Relative Bindungsstärken der DBS für Cadmium und relative Cadmium-Löslichkeiten der R-DBS	

**Abbildungsverzeichnis**

<b>Abb. 2.1:</b>	Arbeitsablauf und Messprogramm im LBN-Graubünden	3
<b>Abb. 2.2:</b>	Wahl der Beobachtungsstandorte nach unterschiedlichen standörtlichen Kriterien	3
<b>Abb. 3.1:</b>	Standorte im Langfristigen Bodenbeobachtungsnetz Graubünden	4
<b>Abb. 3.2:</b>	Geländequerschnitt in West-Ost-Richtung durch den Kanton; Bodentypen und Eigenschaften der Dauerbeobachtungsstandorte	5
<b>Abb. 3.3:</b>	Schwermetall-Totalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Nutzung	11
<b>Abb. 3.4:</b>	Schwermetall-Totalgehalte der Grünlandstandorte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Alpweide und Dauergrünland	11
<b>Abb. 3.5:</b>	Lösliche Cadmium-Gehalte der Dauerbeobachtungsstandorte differenziert nach Nutzung	11
<b>Abb. 3.6:</b>	pH-Werte der Dauerbeobachtungsstandorte in Abhängigkeit von der Nutzung	12
<b>Abb. 3.7:</b>	Cadmium-Löslichkeit in Abhängigkeit der relativen Bindungsstärken	14
<b>Abb. 3.8:</b>	Schema für die Risikobewertung von Böden in Bezug auf Schwermetalle	16
<b>Abb. 3.9:</b>	Basensättigung in Abhängigkeit vom pH	20
<b>Abb. 3.10:</b>	Austauschbares Aluminium in Abhängigkeit vom pH-Wert	21

**Tabellenverzeichnis**

<b>Tab. 3.1:</b>	Schwermetall- und Fluor-Totalgehalte (mg/kg Boden) nach VSBo, Anzahl der Standorte mit Richtwertüberschreitungen; alle Dauerbeobachtungsstandorte	6
<b>Tab. 3.2:</b>	Lösliche Schwermetall- und Fluor-Gehalte (mg/kg Boden) nach VSBo	7
<b>Tab. 3.3:</b>	Anthropogene Schwermetall-Anreicherungen, Abschätzung aus Ober- und Unterbodenvergleichen	9
<b>Tab. 3.4:</b>	Filterfunktion der Dauerbeobachtungsstandorte	14

## Glossar

**Glossar**

Aluminiumpuffer	Bei pH-Werten < 4.2 werden Säuren (Protonen) zunehmend zunächst durch Aluminiumhydroxide später auch durch Eisenhydroxide aufgenommen, d.h. gepuffert. Dabei geht Aluminium zunehmend in die Bodenlösung über.
Austauscherpuffer	Im pH-Bereich zwischen ca. 4.2 und 5.0 werden Säuren (Protonen) durch die Verwitterung von Silikaten abgepuffert. Dabei gehen Kationen (Ca, Mg, Na, K) in die Bodenlösung über. Die Reaktion ist irreversibel und bewirkt eine Auflösung der Silikate.
Belastungspotential	Ausgehend vom Schadstoffgehalt eines Bodens die Möglichkeit betreffend auf andere Teile des Systems (z.B. Grundwasser) belastend einzuwirken.
Belastungsrisiko	Allgemein definiert die Möglichkeit in einer Gefahrenlage Schaden zu erleiden.
Bioturbation	Umlagerung von Bodenschichten durch Tiere, z.B. durch die Grabtätigkeit der Regenwürmer.
Boden	An der Erdoberfläche entstandene, mit Luft, Wasser und Lebewesen durchsetzte Verwitterungsschicht aus mineralischen und organischen Substanzen.
Bodenfruchtbarkeit	Definition → VSBo: Der Boden ist fruchtbar, wenn er: a. eine artenreiche und biologisch aktive Tier- und Pflanzenwelt, eine für seinen Standort typische Struktur und eine ungestörte Abbaufähigkeit besitzt; b. das ungestörte Wachstum und die Entwicklung natürlicher und vom Menschen beeinflusster Pflanzen und Pflanzengesellschaften ermöglicht und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt; c. gewährleistet, dass pflanzliche Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und für Menschen und Tiere gesundheitlich verträglich sind.
Bodengenetik	Die Lehre von der Entwicklung der Böden.
Bodenhorizont	Bodenhorizonte sind "Schichten" eines → Bodenprofils, welche sich im Laufe der Zeit unter dem Einfluss des Klimas, der Lebewesen (Vegetation und Tiere / Menschen) und des Reliefs aus dem → Muttergestein durch → Verwitterung gebildet haben. Man unterscheidet vier Haupthorizonte, die mit den Buchstaben A (Oberster Mineralerdehorizont), B (mindestens durch Verwitterung geprägt), C (Muttergestein) und O (organischer Auflagehorizont) abgekürzt werden.
Bodenkenngrößen	Physische, also messbare Größen, welche den Bodenzustand bzw. Bodenfunktionen charakterisieren.
Bodenprofil	Die Abfolge verschiedener → Bodenhorizonte von der Oberfläche bis zum unverwitterten Gestein wird als Bodenprofil bezeichnet.
Bodenversauerung	Prozess der Konzentrationszunahme der freien Wasserstoffionen (Protonen) im Boden; fortwährende Abnahme des → pH-Wertes im Boden.
Eisenpuffer	Bei → pH-Werten < 3.8 werden Säuren (Protonen) zunehmend durch Eisenhydroxide und -oxide aufgenommen, d.h. gepuffert. Dabei geht Eisen zunehmend in die Bodenlösung über.
Humus	Die Gesamtheit der abgestorbenen organischen Bodensubstanz, welche aus mehr oder weniger zersetzten, umgewandelten und neugebildeten Stoffen pflanzlicher und tierischer Herkunft besteht.
Humusbildung	Die Umwandlung abgestorbener Lebewesen pflanzlicher und tierischer Herkunft zu → Humus wird als Humusbildung bezeichnet.
Interception	Rückhalt von Niederschlag durch die Pflanzendecke
Karbonat	Karbonate sind die Salze der Kohlensäure (H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ). Von Bedeutung in Böden sind Calciumkarbonat (Kalk) und Magnesiumkarbonat.
Korngrösse	Größen der Bodenteilchen. Es werden folgende Hauptkorngrößenfraktionen unterschieden: Skelett (> 2 mm), Sand (< 2 mm, > 0.05 mm), Schluff (< 0.05 mm, > 0.002 mm), Ton (< 0.002 mm).

Lösliche Schwermetallgehalte	Gelöste und leicht nachlieferbare Schwermetallanteile eines Bodens, die mit einer Neutralsalzlösung (0.1 molare NaNO <sub>3</sub> -Lösung) erfasst werden.
Muttergestein	Ausgangsgestein der Bodenbildung, z.B. Moräne, Molasse, Kalkstein, Sandstein...
Oberboden	Als O. wird üblicherweise der oberste mineralische → Bodenhorizont bezeichnet, welcher durch Humusanreicherung geprägt ist (ca. 0 - 20 cm).
Ökosphäre	Allgemeine Bezeichnung für den Gesamtlebensraum Erde (Biogeosphäre).
Pflanzennährstoffe	Elemente, welche für das Wachstum und die normale Entwicklung der Pflanze lebensnotwendig (essentiell) sind.
pH-Wert	Ausdruck für die Konzentration (-log Mol) an freien Wasserstoffionen (Protonen) im Boden bzw. im Bodenwasser.
Pufferkapazität	Mass eines Bodens für die Neutralisationsfähigkeit von Säuren (Protonen).
Puffersubstanzen	Mineralische und organische Substanzen des Bodens, welche durch die Aufnahme von anfallenden Protonen den → pH-Wert stabilisieren: Kalk, Silikate, Aluminium- und Eisenoxide, → Humus.
Pufferung	Prozess der Aufnahme von Protonen (Säure) durch → Puffersubstanzen.
Raumgewicht	Dichte der trockenen Bodensubstanz einschliesslich der Hohlräume (Volumengewicht).
Richtwerte	Toleranzgrenze für → Schadstoffe, bei Überschreitung besteht die Gefahr einer Beeinträchtigung der Gesundheit bzw. der → Bodenfruchtbarkeit.
sauer	→ Säuregrade.
Säuredeposition	Ablagerung von Säurebildnern (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , ...) in und auf den Boden.
Säuregrade	Einstufung der → pH-Werte (gemessen in CaCl <sub>2</sub> ) von Böden: alkalisch > 6.7; neutral 6.2 - 6.7; schwach sauer 5.1 - 6.1; sauer 4.3 - 5.0; stark sauer 3.3 - 4.2; sehr stark sauer < 3.3.
Schadstoffe	Natürliche oder künstliche Stoffe, welche die → Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigen können (Schwermetalle, Fluor, organische Schadstoffe, ...).
Schwermetall-Absolutgehalte	Im Ggs. zu den → Schwermetall-Totalgehalten bezeichnen die Absolutgehalte Schwermetallkonzentrationen, welche nach vollständiger Zerstörung bzw. Auflösung der Bodenminerale analytisch bestimmt werden (HClO <sub>4</sub> /HF/HNO <sub>3</sub> -Extrakt).
Schwermetall-Totalgehalte	Bodenextrakt (2 molare Salpetersäure), mit dem je nach Schwermetall und Boden ca. 60 - 70 % der Schwermetalle aus der Bodenprobe extrahiert werden.
Schwermetalle	Metallische Elemente mit einer Dichte > 5.6 g/cm <sup>3</sup> : u.a. Blei, Cadmium, Cobalt, Eisen, Kupfer, Molybdän, Mangan, Nickel, Quecksilber, Zink; in der → VSBo wurden für 10 Schwermetalle → Richtwerte festgelegt.
Schwermetalltiefenprofil	Vertikale Verteilung der → Schwermetalle in einem → Bodenprofil.
stark sauer	→ Säuregrade.
Ton	Mineralische Partikel, die kleiner sind als 0.002 mm; siehe → Korngrösse.
Ubiquitär	Überall verbreitet
Unterboden	Der wenig humose, geringer durchwurzelt und belebte untere Bereich des → Bodens, in dem Mineralverwitterung stattfindet und verlagerte Stoffe angereichert werden.
Versauerung	→ Bodenversauerung
Verwitterung	Vom Klima abhängige physikalische und chemische Kräfte und Prozesse, welche unter Beteiligung von Lebewesen eine Aufbereitung, Veränderung, Zerstörung und Umwandlung von Gesteinen und Mineralen bewirken.
VSBo	Abkz.: Verordnung über Schadstoffe im Boden (SR 814.12).

## Kurzfassung

Aufgrund der Bestimmungen in der Umweltschutzgesetzgebung (USG Art. 33 - 35 und VSBo) sowie des Beschlusses Regierung (Protokoll Nr. 2621 vom 16. Oktober 1989) wurde in den Jahren 1989 bis 1992 das **Langfristige Bodenbeobachtungsnetz GRAubünden**, kurz **LBN-GR**, konzipiert, installiert und ausgewertet. Das LBN-GR ist ein regelmässig betriebenes Netz von **Dauerbeobachtungsstandorten (DBS)**. Es besteht gegenwärtig aus 89 Standorten, welche nach regionalen Gesichtspunkten, unterschiedlichen ökologischen Verhältnissen und Nutzungsformen im gesamten Kantonsgebiet verteilt sind.

Hauptaufgabe des LBN-GR ist die Erfassung der Schadstoffbelastung von Böden - insbesondere die Belastung mit Schwermetallen - und die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit. Durch wiederholte Beprobungen der Testflächen sollen längerfristig Trends in der Belastung des Bodens mit Schadstoffen erkannt werden. Bei der erstmaligen Beprobung wurde jeweils eine Fläche von 100 m<sup>2</sup> und teilweise Bodenprofilgruben beprobt und klassifiziert. Anschliessend wurden die Schadstoffgehalte und Bodenkenngrossen analytisch bestimmt.

Mit dem vorliegenden Fachbericht werden Ergebnisse der Erstbeprobung des LBN-GR präsentiert.

Aufgrund der Auswertungen ist von grossräumigen Schwermetalleinträgen in die Böden des Kantons auszugehen. So sind deutliche anthropogene, d.h. von Menschen verursachte Schwermetallanreicherungen insbesondere für Blei, Cadmium und Zink auf 56 % der Standorte nachweisbar. Einträge der Schwermetalle Cadmium, Kupfer und Zink sind im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung zu sehen. Zunehmende Nutzungsintensitäten (Alpweide < Grünland < Ackerbau) sind offenbar mit steigenden Schwermetalleinträgen verbunden. Deutliche Blei- und Quecksilberanreicherungen sind auch auf Waldstandorten nachweisbar. Sie indizieren grossräumige atmosphärische Einträge (Luftverunreinigungen) von Schwermetallen.

Richtwertüberschreitungen für die Schwermetalltotalgehalte wiesen rund 24 % aller Standorte auf. Zur Hälfte sind diese auf hohe Gehalte an Chrom und Nickel im Muttergestein, d.h. dem Ausgangsgestein der Bodenbildung, zurückzuführen (geogen). Dagegen sind Richtwertüberschreitungen für Cadmium, Kupfer und Quecksilber die Folge menschlicher Aktivitäten (anthropogen).

Ein Belastungsrisiko ist besonders auf Wald- und Alpstandorten nicht auszuschliessen. 50 % der Wald- und 60 % der Alpstandorte zeigen Richtwertüberschreitungen der löslichen Gehalte (hohes wirkungsorientiertes Belastungspotential) vor allem des Zinks, aber auch des Nickels, Cadmiums und Kupfers. Auf diesen Standorten ist die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht mehr gewährleistet.

Die umweltgefährdende Mobilität der Schwermetalle ist ursächlich mit der Versauerung vor allem der Wald- und Alpstandorte verbunden. 45% der Waldstandorte weisen pH-Werte kleiner als 4.2 auf und sind somit stark sauer. 87% der Alpstandorte sind sauer (pH < 5.0).

Die Versauerung stellt ein Problembereich nicht nur bezüglich der Schwermetallbelastung sondern im Hinblick auf den Bodenzustand insgesamt dar. Bodenkennwerte indizieren z.B. ungünstige Veränderungen des Nährstoffhaushaltes mit zunehmender Versauerung und eine degradierte Filterfunktion. So weisen ca. 32 % aller Standorte des LBN-GR geringe bis sehr geringe Bindungsstärken gegenüber dem relativ mobilen Schwermetall Cadmium auf.

Für eine differenzierte Beurteilung von Belastungsrisiken durch Schwermetalle wird ein Bewertungsschema angewendet, welches verschiedene Belastungspotentiale unterscheidet: konzentrationsorientiert (Schwermetalltotalgehalte, anthropogene Schwermetallanteile), wirkungsorientiert (lösliche Schwermetallgehalte), prozessorientiert (Filterfunktion, relative Schwermetalllöslichkeit). Folglich können die DBS bezüglich der Belastungsrisiken in vier Gruppen mit steigendem Belastungsrisiko eingeteilt werden:

- Standorte mit tiefen Schwermetallgehalten und einer überwiegend intakten Filterfunktion weisen geringe prozess- und wirkungsorientierte Belastungspotentiale auf. Somit bestehen auch längerfristig keine aktuellen Belastungsrisiken (ca. 35 % aller Standorte).
- Standorte mit deutlichen Schwermetallanreicherungen im Oberboden und teilweise mit Richtwertüberschreitungen für die Totalgehalte weisen bei hohem Filtervermögen der Böden ebenfalls geringe prozess- und wirkungsorientierte Belastungspotentiale auf, so dass keine aktuellen Belastungsrisiken bestehen (ca. 20 % aller Standorte). Es handelt sich hierbei vornehmlich um Dauergrünland- und Ackerstandorte.
- Vor allem Alp- aber auch Waldstandorte sowie versauerte Dauergrünland- und Ackerstandorte weisen mittlere bis hohe prozess- und wirkungsorientierte Belastungspotentiale und somit hohe aktuelle Belastungsrisiken auf (ca. 25 % aller Standorte).
- Weitere Alp-, Wald- und versauerte Dauergrünland- und Ackerstandorte weisen hohe prozess- und wirkungsorientierte Belastungspotentiale und somit die höchsten aktuellen Belastungsrisiken auf (ca. 20 % aller Standorte), weil im gesamten Bodenprofil die Filterfunktion stark eingeschränkt ist.

## Riassunto

Negli anni 1989 fino 1992 venne concepita e realizzata in base alla legge federale sulla protezione dell'ambiente (LPA art. 33 - 35 e O suolo) nonché al decreto governativo (protocollo no. 2621 del 16 ottobre 1989) "la rete d'osservazione del suolo a lunga scadenza del Cantone dei Grigioni", detta brevemente **LBN-GR**. L'LBN-GR è una rete in continua funzione con dei luoghi di campionamento fissi (**DBS**). Attualmente essa comprende 89 luoghi, i quali sono ripartiti su tutto il territorio cantonale e scelti secondo aspetti regionali, diverse condizioni ecologiche e varie forme di sfruttamento.

Questo progetto è imperniato sulla registrazione del carico inquinante - in particolare i metalli pesanti - e sulla valutazione della fertilità del suolo. Mediante il continuo prelievo di campioni si vuole conoscere a lunga scadenza l'evoluzione del carico nel suolo. In occasione del primo campionamento su una superficie di 100 m<sup>2</sup> rispettivamente in parte negli scavi effettuati sono stati analizzati i tenori delle sostanze nocive e i dati caratteristici del suolo.

Il presente rapporto espone dunque i risultati di questa prima fase di campionamento.

In base alle valutazioni effettuate bisogna considerare ampi spazi del territorio cantonale sottoposti ad una contaminazione da parte di metalli pesanti. In 56% dei luoghi sono state accertate chiare presenze antropiche di metalli pesanti, cioè prodotte da attività umana, in particolare di piombo, cadmio e zinco. L'importo nel suolo dei metalli pesanti cadmio, rame e zinco va contemplata nell'ambito dell'utilizzazione agricola. La maggiore intensità d'utilizzazione (pascoli < prati < colture) è collegata evidentemente all'aumento dei metalli pesanti. Si registrano pure chiare presenze di piombo e di mercurio nei luoghi boschivi. Esse manifestano delle immissioni atmosferiche ad ampio raggio (inquinamento atmosferico).

Circa il 24% di tutti i luoghi evidenziano dei sorpassi per i valori indicativi del tenore totale in merito ai metalli pesanti. Per la metà essi sono attribuibili agli elevati tenori geogeni in cromo e nichel, vale a dire provenienti dalla roccia di base responsabile per la formazione del terreno. Per contro i sorpassi dei valori indicativi del cadmio, rame e mercurio derivano dalle attività umane (antropico).

Non si può dunque escludere in particolare per le zone boschive e d'alpeggio un attuale rischio dovuto ai carichi inquinanti il suolo. Il 50% dei luoghi situati nelle zone boschive e il 60% di quelli d'alpeggio presentano dei sorpassi per i valori indicativi del tenore della frazione solubile nell'acqua (forte potenziale in base all'effetto del carico inquinante) in particolare per il zinco, però anche per il nichel, il cadmio e il rame. In queste zone la fertilità del suolo a lunga scadenza non è più garantita.

La mobilità nociva all'ambiente dei metalli pesanti è dovuta in origine all'acidità particolare dei luoghi situati nelle zone boschive e d'alpeggio. Il valore pH del 45% dei luoghi situati nelle zone boschive è inferiore al 4.2 e di conseguenza considerati molto acidi. L'87% dei luoghi situati delle zone d'alpeggio sono acidi (pH < 5.0). L'inacidimento è problematico non soltanto in

## Riassunto

merito al carico dei metalli pesanti bensì anche in rapporto allo stato del suolo. I valori nominali del suolo indicano p.es. un mutamento negativo dell'economia delle sostanze nutrienti con conseguente aumento dell'acidità e una funzione filtrante in regresso. Circa il 32% di tutti i luoghi dell'LBN-GR presentano in rapporto alla mobilità del metallo pesante cadmio una capacità di legame esigua fino a molto esigua.

Per una valutazione differenziata dei rischi di contaminazione da parte dei metalli pesanti viene utilizzato uno schema di valutazione, il quale tiene conto di diversi potenziali di contaminazione: in base alla concentrazione (tenore totale in metalli pesanti, parte antropica dei metalli pesanti), in base all'effetto (tenore solubile in metalli pesanti), in base al processo (funzione filtrante, solubilità relativa dei metalli pesanti). Di conseguenza per quanto concerne i rischi di contaminazione i DBS possono essere classificati in quattro gruppi con graduale aumento del rischio di contaminazione:

- Le ubicazioni con bassi tenori in metalli pesanti e con generalmente una funzione filtrante intatta presentano esigui potenziali di contaminazione in base al processo e all'effetto. Perciò anche a lunga scadenza non si verificano immediati rischi di contaminazione (ca. 35% di tutti i luoghi).
- Le ubicazioni con netta concentrazione di metalli pesanti nello stato superficiale del suolo e in parte sorpassi dei valori indicativi per i tenori totali presentano ugualmente, la funzione del suolo sottoposta, esigui potenziali di contaminazione in base al processo e all'effetto, così che non si verificano immediati rischi di contaminazione (ca. 20% di tutti i luoghi). Si tratta soprattutto di praterie perenni e di campi.
- Soprattutto nei luoghi d'alpeggio però anche in quelli boschivi come pure nelle praterie perenni e nei campi inaciditi si registrano medi fino ad elevati potenziali di contaminazione in base al processo e all'effetto e di conseguenza alti rischi di contaminazione immediati (ca. 25% di tutti i luoghi).
- Altri luoghi d'alpeggio, boschivi e praterie perenni come pure campi inaciditi presentano forti potenziali di contaminazione in base al processo e all'effetto, dunque i rischi di contaminazione immediati più elevati (ca. 20% di tutti i luoghi), in quanto la funzione filtrante è molto ridotta lungo tutto il profilo del suolo.

## Versiun curta

Ilis onns 1989 fin 1992 è vegnida concipida, installada e validada a basa da la lescha davart la proteziun da l'ambient (LPA art. 33 - 35 e VSBo) sco er a basa dal conclus da la regenza (protocol nr. 2621 dals 16 d'october 1989) la **Rait d'Observaziun dal terren a Lung termin dal Grischun**, ditg curtamain **ROL-GR**. La ROL-GR è ina rait da **Lieus Permanents d'Observaziun (LPO)** manada regularmain. Ella consista actualmain dad 89 lieus ch'èn repartids en l'entir territori dal chantun tenor puntgs da vista regionals, tenor las diversas relaziuns ecologicas e tenor las furmas d'utilisaziun.

Il pensum principal da la ROL-GR esi da registrar las contaminaziuns dal terren tras substanzas nuschaivlas - particularmain la contaminaziun tras metals grevs - e da giuditgar la fritgaivladad dal terren. Tras pliras provas da las surfatschas d'emprova duain vegnir enconuschidas a lung termin las tendenzas concernent la contaminaziun dal terren tras substanzas nuschaivlas. Tar l'emprima prova è mintgamai vegnida examinada e classificada ina surfatscha da 100 m<sup>2</sup> e per part foss da profils da terren. Alur èn las substanzas nuschaivlas e las grondezzas indicativas da la cumposiziun dal terren vegnidas definidas analiticamain.

Cun quest rapport tecnic vegnan preschentads ils resultats da l'emprima prova da la ROL-GR.

A basa da las valitaziuns esi da partir d'infiltraziuns da metals grevs en il terren da gronds spazis dal chantun. Uschia pon vegnir cumprovadas concentraziuns da metals grevs chaschunadas cleramain a moda antropogena, q.v.d. dals umans, particularmain dal plum, cadmium e zinc, e quai en 56 % dals lieus. Las infiltraziuns dals metals grevs cadmium, arom e zinc èn da vesair en connex cun l'utilisaziun agricola. Utilisaziuns pli e pli intensivias (pastiras < pradas verdas < cultivaziun dad ers) èn apparentamain colliadas cun infiltraziuns da metals grevs pli e pli fermas. Concentraziuns evidentas da plum e d'argient viv pon er vegnir cumprovadas en lieus da guaud. Ellas èn indizis per infiltraziuns atmosfericas da metals grevs sur gronds spazis (impestaziuns da l'aria).

Surpassaments da las valurs directivas per ils cuntegns totals da metals grevs èn vegnids constatads en radund 24 % dals lieus. Per la mesadad è quai d'attribuir a l'aut cuntegn geogen, q.v.d. a la crappa sezza, da crom e nichel. Ils surpassaments da las valurs directivas da cadmium, arom ed argient viv èn perencunter d'attribuir a las consequenzas da las activitads dals umans.

Ina ristga actuala da las contaminaziuns na po particularmain betg vegnir esclusa en lieus da guaud e dad alp. 50 % dals lieus da guaud e 60 % dals lieus dad alp mussan surpassaments da las valurs directivas dals cuntegns dissolvabels (aut potenzial da contaminaziuns effectivas) surtut dal zinc, ma er dal nichel, cadmium ed arom. En quests lieus n'è la fritgaivladad dal terren betg pli garantida a lunga vista.

La mobilitad dals metals grevs che periclitescha l'ambient è causalmain colliada cun l'acidaziun surtut dals lieus da guaud e dad alp. 45 % dals lieus da guaud mussan valurs da pH ch'èn pli

pitschnas che 4.2 ed è uschia fitg aschs. 87 % dals lieus dad alp è aschs (pH < 5.0). L'acidaziun dal terren munta in problem na be concernent la contaminaziun tras metals grevs, mabain er a vista dal stadi general dal terren. Las grondezzas indicativas da la cumposiziun dal terren è indizis p. ex. per midadas disfavouravlas dal tegnairchasa da las substanzas nutritivas en connex cun l'acidaziun pli e pli gronda dal terren ed ina funcziun da filter reducida. Uschia possedan ca. 32 % da tut ils lieus da la ROL-GR pitschnas fin fitg pitschnas forzas da liaziun vers il metal grev cadmium, ch'è relativmain movibel.

Per in giudicament differenzià da las ristgas da contaminaziun tras metals grevs vegni proponì in schema da valitaziun che differenziescha potenzials da contaminaziun: tals orientads vers la concentraziun (cuntegns totals da metals grevs, parts antropogenas da metals grevs); potenzials orientads vers l'effect (cuntegns da meals grevs dissolvabels) e tals orientads vers process (funcziun da filter, dissoluziun relativa da metals grevs). Consequentamain pon ils LPO vegnir partids concernent las ristgas da contaminaziun en quatter gruppas cun ristgas da contaminaziun pli e pli grondas:

- Lieus cun pitschens cuntegns da metals grevs e cun ina funcziun da filter per la gronda part intacta han pitschens potenzials da contaminaziun orientads vers process ed effects. Uschia n'existan er a lung termin naginas ristgas actualas da contaminaziun (ca. 35% da tuts lieus).
- Lieus cun cleras concentraziuns da metals grevs en la rasada superiura dal terren e per part cun surpassaments da las valurs directivas per ils cuntegns totals han en cas da gronda capaciad da filtrar dal terren medemamain mo pitschens potenzials da contaminaziun orientads vers process ed effects, uschia che ristgas actualas da contaminaziun n'existan betg (ca. 20 % da tut ils lieus). I sa tracta qua surtut da lieus utilisads permanentamain sco pradas verdas u per la cultivaziun dad ers.
- Surtut lieus dad alp ma er lieus da gaud sco er lieus aschentads da pradas permanentamain verdas e dad ers han potenzials mesauns fin auts orientads vers process ed effects per ristgas actualas da contaminaziun ed uschia autas ristgas actualas da contaminaziun (ca. 25 % da tut ils lieus).
- Ulteriurs lieus dad alp, gaud e da pradas aschentadas e permanentamain verdas sco er dad ers han auts potenzials da contaminaziun orientads vers process ed effects ed uschia las pli autas ristgas actualas da contaminaziun (ca. 20 % da tuts lieus), perquai che la funcziun da filter è reducida fermamain è l'entir profil dal terren.

## 1. Ausgangslage

Seit dem Beginn der Industrialisierung und der damit verbundenen Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen ist es zu einer Entkoppelung von natürlichen und durch Menschen verursachten, d.h. anthropogenen Energie- und Stoffflüssen gekommen. Dadurch wurde im Laufe der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts der heutige Wohlstand praktisch der gesamten Bevölkerung ermöglicht. Seit ca. zwei Jahrzehnten drängt jedoch eine Nebenerscheinung des technischen Fortschritts immer stärker in unser Bewusstsein: Die zunehmende Belastung der Umwelt und die Sorge um die langfristige Erhaltung der ökologischen Existenzgrundlagen unserer Gesellschaft. Der Gesetzgeber hat dieser wachsenden Sorge auch dadurch Rechnung getragen, dass er die Vorschriften über die Umweltbeobachtung auf Stufe Bund und Kantone in den letzten Jahren wesentlich intensiviert.

Für den Umweltbereich Boden sind die Kantone aufgrund der eidgenössischen Verordnung über Schadstoffe im Boden (SR 814.12; VSBo) verpflichtet, für eine "eingehende Beobachtung der Bodenbelastung" zu sorgen, sofern feststeht oder anzunehmen ist, dass "der Schadstoffgehalt des Bodens über dem natürlichen Gehalt liegt oder dass im Boden vorhandene künstliche Schadstoffe die Bodenfruchtbarkeit gefährden können".

Im Bodenschutzkonzept des Kantons Graubünden<sup>1</sup> ist die Einrichtung von Dauerbeobachtungsstandorten als eine Massnahme für die Erfüllung der kantonalen Aufgaben gemäss VSBo konzeptionell umschrieben. Mit Beschluss Nr. 2621 vom 16. Oktober 1989 erteilte die Regierung den Auftrag zur Einrichtung des "Langfristigen Bodenbeobachtungsnetzes des Kantons Graubünden" (LBN-GR). Zwischen 1990 und 1992 wurde eine Erstbeprobung realisiert. Der praktische Teil wurde 1994 mit den Laborarbeiten abgeschlossen. Der vorliegende Bericht präsentiert die wesentlichen Ergebnisse der in den Jahren 1995 und 1996 erfolgten Auswertungen der Erstbeprobung des "Langfristigen Bodenbeobachtungsnetzes Graubünden" in Form eines Fachberichtes.

## 2. Langfristige Bodenbeobachtung - Instrument im Bodenschutz

Böden sind im Vergleich zu den Umweltmedien Wasser und Luft vor allem wesentlich komplexer, vielfältiger und träger. Bodenveränderungen vollziehen sich schleichend, können aber zu plötzlichen Kippeffekten führen, deren Konsequenzen praktisch irreversibel oder nur mit sehr grossem Aufwand rückgängig zu machen sind. Schädliche Entwicklungen<sup>2</sup> sollten daher im Sinne des vorsorglichen Umweltschutzes frühzeitig erkannt und durch Gegenmassnahmen nach Möglichkeit bereits im Ansatz korrigiert werden. Bodenbeobachtungsnetze liefern die hierfür notwendigen Datengrundlagen. Sie erfüllen die Funktion eines Frühwarnsystems, dessen Standorte als Referenzflächen dienen.

---

<sup>1</sup> Konzept zum qualitativen Bodenschutz im Kanton Graubünden, November 1989

<sup>2</sup> Anhang 1 enthält eine Übersicht zu Formen von Bodenschädigungen und möglichen verursachenden Belastungen

## 2.1 Ziele und Aufgaben der Bodenbeobachtung im Kanton Graubünden

Allgemeine Zielsetzung der Bodenbeobachtung ist die Überwachung der langfristigen Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit an verschiedenen Standorten im Kanton. Insbesondere folgende Einzelzielsetzungen sind von Interesse<sup>3</sup>:

- Beobachtung der Schadstoffbelastung - insbesondere bezüglich der Schwermetalle - und der Bodenfruchtbarkeit mit der Zeit (Zeitreihe), d.h. Erfassen von Veränderungen.
- Abschätzung geogener (gesteinsbürtiger) und anthropogener (Folge menschlicher Aktivitäten) Schadstoffgehalte in Böden.
- Bereitstellung von Grundlagen zur Erkennung von Gefahrenpotentialen und Risiken sowie für das Ergreifen von Massnahmen.
- Bereitstellung von Vergleichswerten für die Überwachung künftiger grossräumiger Ereignisse.

## 2.2 Vorgehen und Methoden

Obengenannte Zielsetzungen werden mit der Beprobung von Dauerbeobachtungsstandorten (**DBS**) erreicht. Gegenwärtig umfasst das LBN-GR 89 im gesamten Kantonsgebiet verteilte Standorte. Davon sind 45 DBS in den 15 Kantonalen Raumplanungsregionen (3 pro Region) verteilt. Diese sogenannten Regionalen-Dauerbeobachtungsstandorte (**R-DBS**) repräsentieren Tal-, Wald- und Alpstandorte. Die Talstandorte werden als Naturwiese und die Alpstandorte als Weiden genutzt. Weitere 5 DBS dienen der Überwachung von Belastungsgebieten. Sie werden als Immissions-Dauerbeobachtungsstandorte (**I-DBS**) bezeichnet und wie die R-DBS umfassend bodenkundlich erhoben. Schliesslich sollen 39 Variations-Dauerbeobachtungsstandorte (**V-DBS**) die Variabilität von Böden, Nutzungen und klimatischen Einflüssen in den Regionen Rheintal, Davos, Mittelbünden und Mesolcina abdecken.

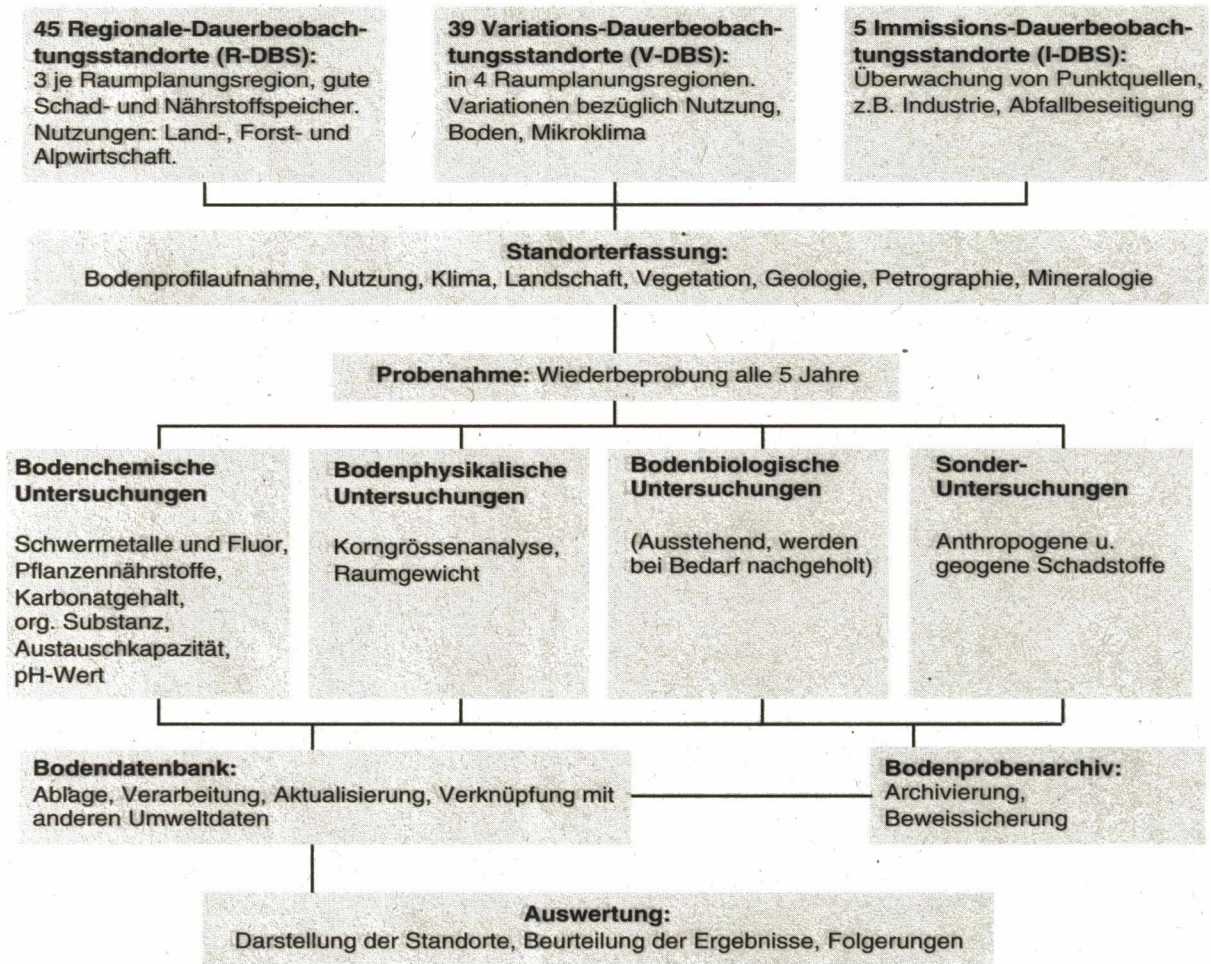
Auf jedem Standort wurde eine Beobachtungsfläche (10 mal 10 Meter) eingemessen; auf den R- und I-DBS zusätzlich je eine Bodenprofilgrube geöffnet. Von den DBS wurden Oberboden-Mischproben (0 - 20 cm) entnommen. Die Profilgruben dienen der feldbodenkundlichen Aufnahme der Bodenprofile sowie der bodenhorizontbezogenen Entnahme von Mischproben. Eine Übersicht der analytisch bestimmten Schadstoffgehalte und Bodenkenngrössen ist Abbildung 2.1 zu entnehmen.

Die Bestimmung der Schwermetallgehalte erfolgte nach den Vorschriften der VSBo, so dass die gesetzlich festgelegten Richtwerte zur Beurteilung der gemessenen Schwermetallgehalte herangezogen werden können. Bodenkenngrössen beschreiben den allgemeinen Bodenzustand und erlauben Rückschlüsse auf Einwirkungen und Bodenfunktionen. Im besonderen dienen sie der Interpretation gemessener Schadstoffgehalte. Es ist beabsichtigt, die Standorte in Abständen von 5 Jahren wiederzubeprobieren.

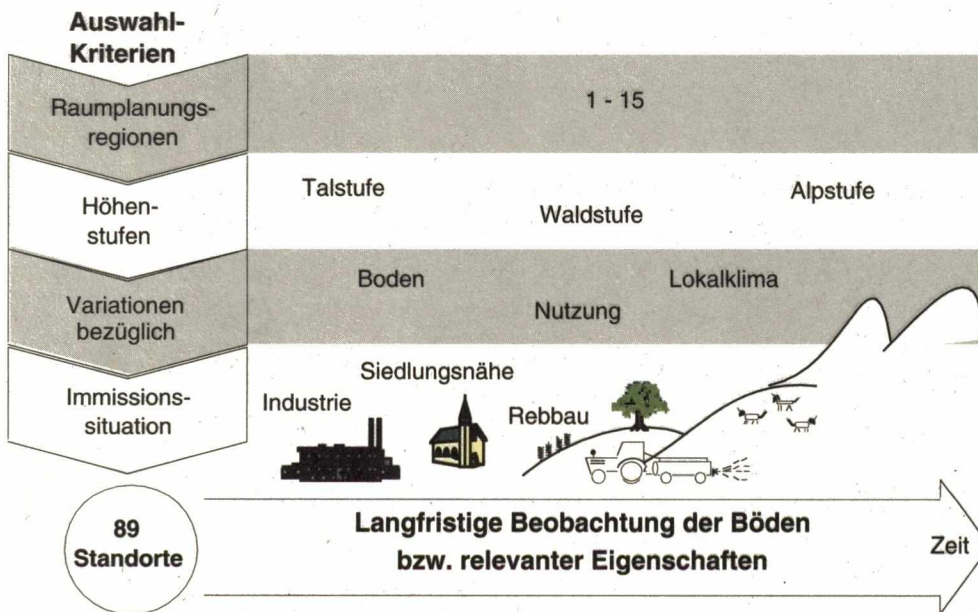
---

<sup>3</sup> Jubiläumsbericht des Amtes für Umweltschutz 1969-1994, 1994

**Auswahl der Dauerbeobachtungsstandorte**



**Abb. 2.1:** Arbeitsablauf und Messprogramm im LBN-Graubünden



**Abb. 2.2:** Wahl der DBS nach unterschiedlichen standörtlichen Kriterien

### 3. Langfristiges Bodenbeobachtungsnetz - Ergebnisse der Ersterhebung

Im Vordergrund stand die Beurteilung gemessener Schwermetallgehalte in den Böden der DBS sowie die Bodenversauerung und daraus resultierende Veränderungen.

Die Ergebnisse der Ersterhebung werden in folgenden Kapiteln vorgestellt:

- Bodenbelastung nach VSBo.
- Geogene und anthropogene Schwermetallanteile.
- Schwermetallgehalte und pH-Werte: Differenzierung nach standörtlichen Variablen.
- Die Filterfunktion der Böden - oder Schwermetalle werden mobil.
- Vom Belastungspotential zum Belastungsrisiko - oder wann Schwermetalle zur Belastung werden.
- Bodenversauerung.

Die Lage der LBN-Standorte ist der nachfolgenden Karte (Abb. 3.1) zu entnehmen. Abbildung 3.2 auf der folgenden Seite zeigt einen in West-Ost-Richtung verlaufenden Querschnitt durch den Kanton mit Untersuchungsstandorten.

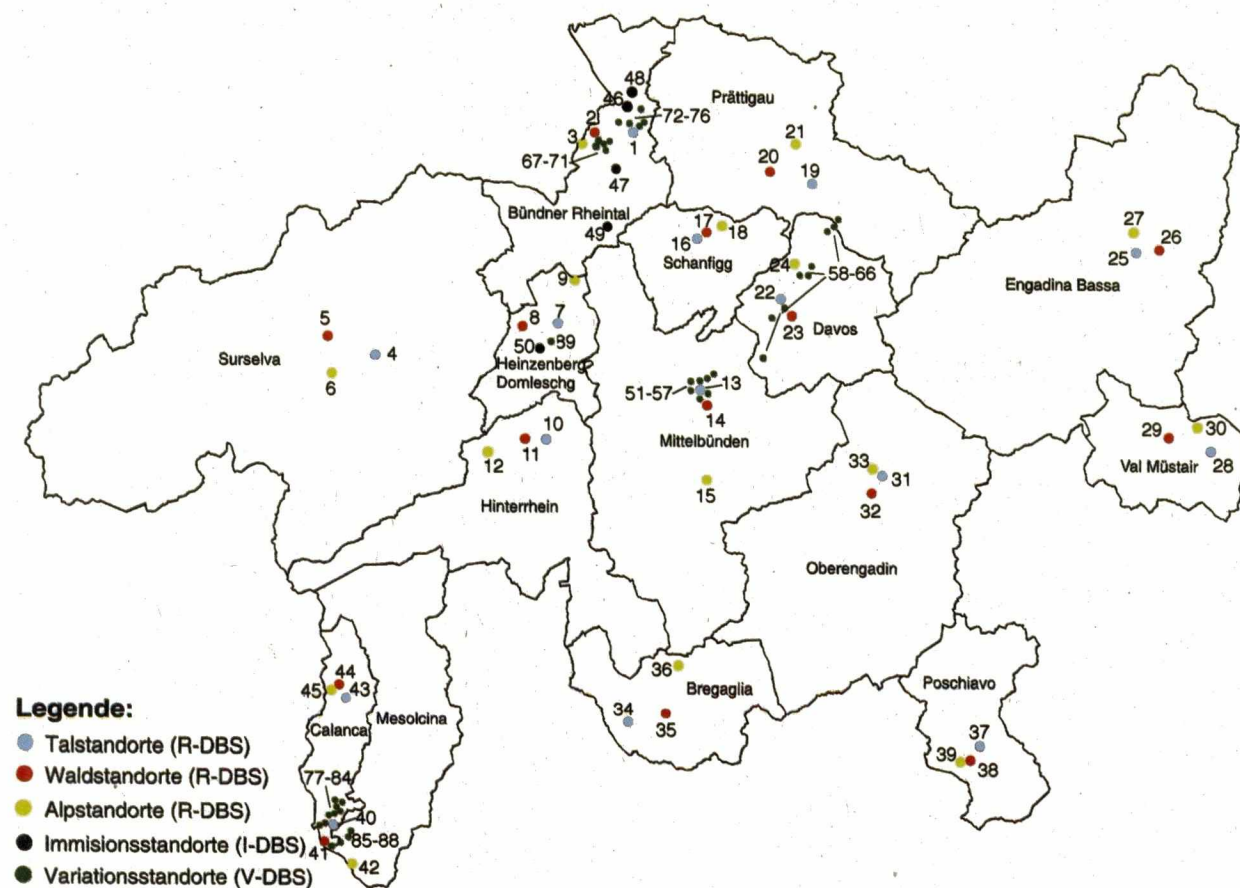


Abb. 3.1: Standorte im Langfristigen Bodenbeobachtungsnetz Graubünden

Ergebnisse der Erstbeprobung

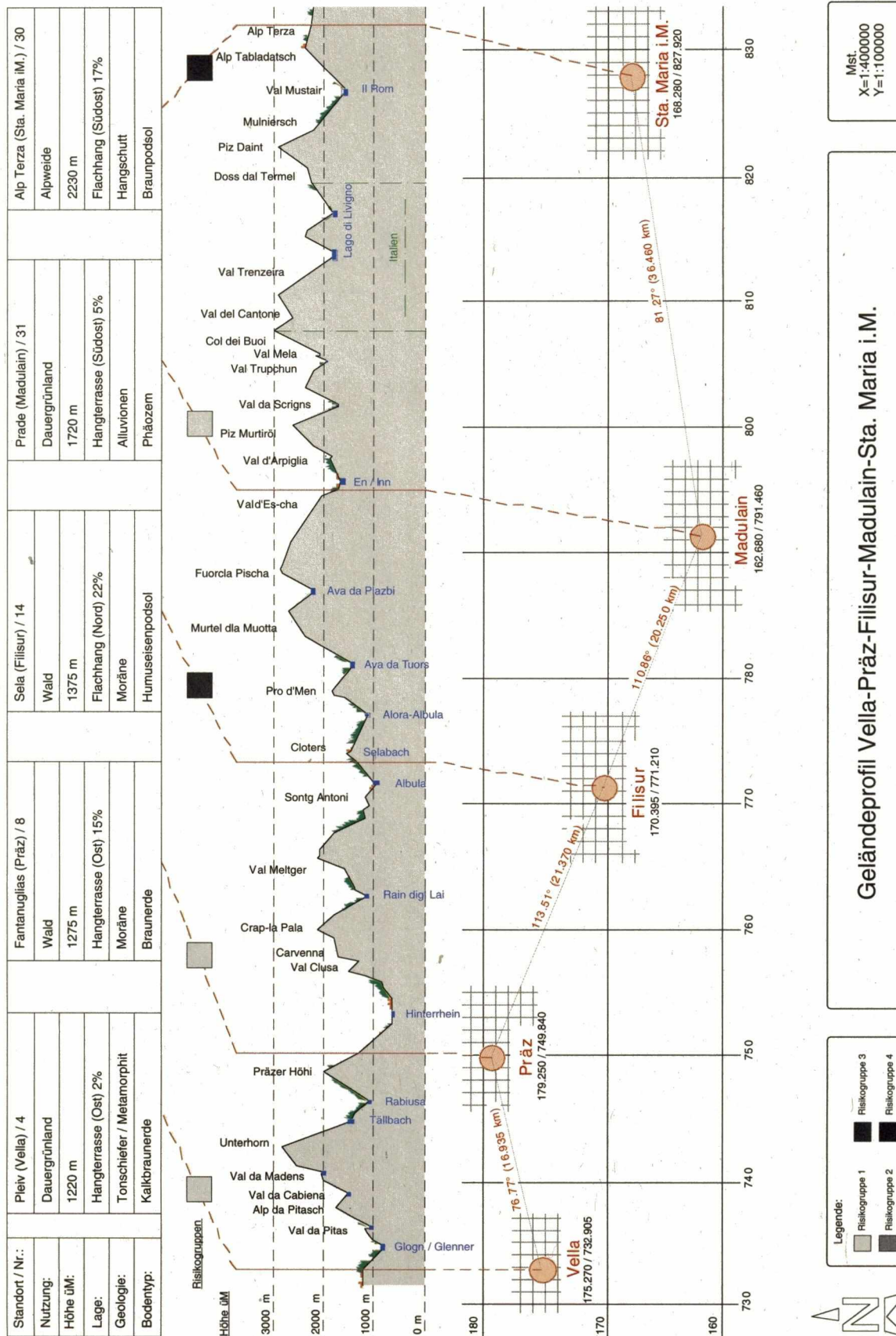


Abb. 3.2: Kantonsquerschnitt in West-Ost-Richtung; Bodentypen und Eigenschaften der DBS

### 3.1 Bodenbelastung nach VSBo

Für die Vollzugsorgane im Bodenschutz sind die in der VSBo festgelegten Richtwerte für die totalen und löslichen Schwermetall- und Fluorgehalte massgebend. Danach gelten Böden mit Richtwertüberschreitungen als belastet. Die Tabellen 3.1 (Totalgehalte) und 3.2 (lösliche Gehalte) enthalten summarische Übersichten für die einzelnen Schwermetalle und Fluor. Die entsprechenden einzelstandörtlichen Ergebnisse sowie schweizerische Vergleichswerte sind im Anhang 2 aufgeführt.

Bezüglich der Totalgehalte liessen sich Richtwertüberschreitungen für mindestens 1 Schwermetall an 21 Standorten feststellen (24 %). Davon weisen 11 Standorte (12 %) Richtwertüberschreitungen für Chrom und/oder Nickel und in einem Fall für Kobalt auf, was ursächlich mit hohen geologischen Grundgehalten zusammenhängen dürfte und z.B. im Falle des Chroms auch in der räumlichen Verteilung zum Ausdruck kommt (hohe Chromgehalte im Prättigau, Schanfigg, Engiadina Bassa, Mesolcina, Calanca). Demgegenüber sind Richtwertüberschreitungen für Blei (5 Standorte), Kupfer (3 Standorte) und Cadmium (1 Standort) typischerweise Indiz für anthropogene Einträge.

Im schweizerischen Vergleich liegen die gemessenen Totalgehalte mit Ausnahme des Zinks (ca. 1/3 höher) im Bereich häufig gemessener Werte.

**Tab. 3.1:** Schwermetall- und Fluor-Totalgehalte (mg/kg Boden) nach VSBo, Anzahl Standorte mit Richtwertüberschreitungen; alle Dauerbeobachtungsstandorte (N = 89)

Elemente	RW <sup>1)</sup>	Häufiger Bereich (Perzentile)		Median	Max.	Min.	Standorte mit RW <sup>1)</sup> -Überschreitungen	
		25tes	75tes				Anzahl	Standort-Nr.
Pb	50	20.7	34.0	25.8	173.0	9.8	5	49, 55, 56, 58, 59
Cr	75	13.3	37.1	21.8	1430.0	5.9	7	19, 20, 27, 36, 59, 60, 61
Co	25	5.8	10.7	8.7	93.8	2.1	2	15, 60
Cu	50	10.9	29.3	17.5	651.0	3.2	4	48, 49, 50, 80
Zn	200	44.7	88.1	61.3	155.0	20.7	0	
Ni	50	12.7	34.8	22.3	656.0	3.3	13	15, 16, 19, 20, 25, 27, 36, 49, 59, 60, 61, 84, 87
Cd	0.8	0.17	0.35	0.22	1.20	0.05	2	55, 70
Hg	0.8	0.05	0.09	0.06	1.07	0.01	1	48
Mo	5	0.25	0.64	0.36	3.20	0.11	0	
TI	1	0.08	0.17	0.12	0.58	0.02	0	
F	400	470	759	600	1400	53	74	siehe Anhang 2

<sup>1)</sup> RW = Richtwerte für Schadstoffgehalte des Bodens nach VSBo

Da die Schwermetall-Totalgehalte im allgemeinen keine direkte Beurteilung biologischer Wirkungen erlauben, ist in der VSBo die Bestimmung löslicher Gehalte (NaNO<sub>3</sub>-Extrakte) zur Abschätzung mobiler bzw. pflanzenverfügbarer Schwermetallanteile festgeschrieben. Richtwertüberschreitungen für die löslichen Gehalte wurden an 37 Standorten (42 %) offenbar, welche somit im Sinne der VSBo als belastet einzustufen sind. Hier sind schädliche Wirkungen auf Organismen nicht auszuschliessen.

## Ergebnisse der Erstbeprobung

Richtwertüberschreitungen für die Fluortotalgehalte (74 Standorte oder 83 %) sind nicht als eindeutiger Hinweis auf anthropogene, d.h. durch Menschen verursachte Belastungen zu werten, sondern sind eher im Zusammenhang mit hohen natürlichen (geogenen) Gehalten zu sehen. Die auf den LBN-Standorten ermittelten Gehalte liegen durchschnittlich ca. um 1/5 über dem Spektrum häufig gemessener Werte in der Schweiz. Die Fluorlöslichkeit ist generell sehr gering. Schädliche Auswirkungen sind daher nicht zu befürchten.

**Tab. 3.2:** Lösliche Schwermetall- und Fluor-Gehalte (mg/kg Boden) nach VSBo, Standorte mit Richtwertüberschreitungen; alle Dauerbeobachtungsstandorte (N = 89)

Elemente	RW <sup>1)</sup>	Häufiger Bereich (Perzentile)		Median	Max.	Min. <sup>2)</sup>	Standorte mit RW <sup>1)</sup> -Überschreitungen	
		25tes	75tes				Anzahl	Standort-Nr.
<b>Pb</b>	1.00	0.001	0.010	0.002	0.507	0.001	0	
<b>Cu</b>	0.70	0.013	0.057	0.032	0.812	0.004	2	48, 80
<b>Zn</b>	0.50	0.020	0.670	0.120	14.980	0.001	29	5, 6, 15, 18, 23, 30, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 58, 59, 62, 63, 66, 78, 79, 81, 82, 85, 86, 88
<b>Ni</b>	0.20	0.035	0.107	0.068	2.450	0.001	9	15, 20, 27, 36, 45, 58, 59, 60, 61
<b>Cd</b>	0.03	0.001	0.011	0.003	0.051	0.001	2	41, 58
<b>F</b>	25.0	470	759	2.9	12.1	0.6	0	

<sup>1)</sup> RW = Richtwerte für Schadstoffgehalte des Bodens nach VSBo

<sup>2)</sup> Werte entsprechen der Nachweisgrenze

### 3.2 Geogene und anthropogene Schwermetallanteile

Fast alle Elemente kommen natürlicherweise in Gesteinen und folglich auch in Böden vor (geogene Anteile), so auch die Schwermetalle. Andererseits werden Schwermetalle vor allem über Luftverunreinigungen und direkt über landwirtschaftliche Hilfsstoffe und Dünger in die Böden eingetragen - sogenannte anthropogene Anteile. Richtwerte, wie sie in der VSBo zur Beurteilung der Schwermetallbelastung festgelegt wurden, berücksichtigen weder Variationen der geologischen Gehalte im Muttergestein noch bodengenetische oder biologische Prozesse, die zu Anreicherungen ("Ionenpumpe") bzw. Residualanreicherungen (durch Auswaschung von Verwitterungsprodukten) oder Verdünnungen (Bioturbation, Humusbildung usw.) führen können. Sie sind daher nicht geeignet, die effektive Verschmutzung aufgrund anthropogener Tätigkeiten zu beschreiben. Richtwerte dienen vielmehr als Handlungskriterium.

Zur Beurteilung der anthropogenen Schwermetallanteile in den Böden der LBN-Standorte wurden daher die gewichtsbezogenen Oberbodentotalgehalte mit denjenigen der Unterböden verglichen und so die Schwermetallanreicherung abgeschätzt. D.h., sind die Quotienten (Totalgehalt im Oberboden zu Totalgehalt im Unterboden) grösser als 1, so wurden im Oberboden höhere Gehalte gemessen als im Unterboden. Bei der Interpretation dieser Werte wurde den oben erwähnten Schwierigkeiten insofern Rechnung getragen, als dass Standorte erst dann als deutlich anthropogen belastet bezeichnet wurden, wenn die Quotienten Werte grösser als 2 annahmen und wenn diese Anreicherung in den Schwermetall-

Tiefenprofilen insgesamt deutlich zum Ausdruck kam. Weiterhin ist bei der Beurteilung dieser Verhältniszahlen die Mobilität der Schwermetalle zu berücksichtigen. Kleine Quotienten sind nicht unbedingt identisch mit geringer anthropogener Schwermetallbelastung. Das ist dann der Fall, wenn Oberböden z.B. aufgrund starker Versauerung keine Senke mehr für Schwermetalle darstellen (siehe Kapitel 3.4).

Folgende Ergebnisse sind aufgrund dieser Auswertung für die R-DBS festzuhalten (vgl. Tab. 3.3 und Anhang 3 mit einzelstandörtlichen Angaben zu den Anreicherungsfaktoren):

- Für 24 % der Standorte sind keine deutlichen anthropogenen Schwermetallanteile nachweisbar.
- 56 % der Standorte weisen deutliche anthropogene Schwermetallanteile für mindestens ein Schwermetall auf.
- Insbesondere das weitgehend immobile und als atmogen (über die Atmosphäre eingetragen) geltende Blei zeigt auf gut der Hälfte der Standorte deutlich anthropogene Anreicherungen. Am Standort 34 (Dauergrünland, Gemeinde Bondo) sind die Bleigehalte im Oberboden 11 mal höher als im Unterboden. Dieser Standort weist den höchsten Anreicherungsquotienten im Vergleich aller Schwermetalle und Standorte auf.
- Ebenfalls sind für das toxikologisch problematische Cadmium deutliche anthropogene Anreicherungen auf einem Drittel und für Zink auf 22 % der Standorte auszumachen.
- Die Werte für Nickel und Chrom weisen auf vergleichsweise geringe anthropogene Anteile hin und unterstützen damit die Annahme, dass die beobachteten Richtwertüberschreitungen für diese Elemente geogenen und damit natürlichen Ursprungs sind.
- Für Cadmium, Zink und Nickel sind die Oberbodentotalgehalte von 51 % (Cd), 49 % (Zn) resp. 38 % (Ni) der Standorte offenbar nicht mehr geeignet, das kumulative Ausmass der Schwermetallbelastung anzuzeigen. Diese Standorte sind bezüglich der Anreicherungsfaktoren indifferent. Gründe hierfür sind im eingeschränkten Rückhaltevermögen der Standorte gegenüber diesen Schwermetallen zu suchen und zeigen sich u.a. in entsprechend hohen Schwermetalllöslichkeiten und in den Schwermetall-Tiefenprofilen der Standorte. Hier ist also von Schwermetallverlagerungen vom Ober- in den Unterboden auszugehen. Betroffen sind in erster Linie saure bis stark saure Wald- und Alpstandorte.

Derartige Abschätzungen sind Annäherungen zur Beurteilung anthropogener Schwermetallgehalte in Böden. Die Plausibilität wird vor allem durch die hohen Quotienten des sehr immobilen und vorwiegend über die Atmosphäre und daher ubiquitär eingetragenen Bleis und der als geogen geltenden Schwermetalle Chrom und Nickel mit entsprechend tiefen Quotienten gestützt. Eine analoge Abschätzung anthropogener Schwermetallanteile unter Verwendung der Schwermetall-Absolutgehalte zeigte im wesentlichen die gleichen Resultate.

## Ergebnisse der Erstbeprobung

**Tab. 3.3:** Anthropogene Schwermetall-Anreicherungen, Abschätzung aus Ober- und Unterboden-Vergleichen<sup>3)</sup>

Anthropogene Schwermetall-Anteile				
	Quotienten <sup>1)</sup>	< 2	≥ 2	< 2 oder ≥ 2 <sup>2)</sup>
Schwermetalle	Regionale-DBS (45 Standorte), Standort-Nr. <sup>3)</sup>			
<b>Blei (Pb)</b>	15 (1.9), 18, 25, 9, 45, 21, 39, 16, 37, 1, 14, 6, 10, 33, 3, 7, 27, 13, 31, 4, 23, 8, 5 (0.7)	34 (11.2), 40, 44, 41, 30, 35, 43, 28, 26, 19, 12, 29, 38, 32, 24, 20, 11, 42, 17, 2, 36, 22 (2.0)		
% R-DBS	<b>51%</b>	<b>49%</b>		-
<b>Chrom (Cr)</b>	45 (1.7), 14, 37, 15, 1, 40, 11, 4, 26, 2, 7, 9, 36, 19, 8, 35, 27, 10, 3, 33, 16, 22, 32, 43, 39, 25, 24, 44, 17, 34, 42, 6, 12, 30, 13, 5, 31, 41, 18, 38, 21, 23, 20 (0.13)	28 (2.9), 29 (2.1)		
% R-DBS	<b>96%</b>	<b>4%</b>		-
<b>Kobalt (Co)</b>	28 (1.7), 29, 37, 19, 16, 26, 40, 25, 2, 43, 7, 33, 1, 36, 13, 22, 8, 38, 27, 17, 3, 10, 32, 34, 4, 31, 24, 42, 44, 9, 30, 11, 18, 41, 12, 21, 39, 35, 5, 23, 6, 20 (0.1)	45 (1.1)		15 (1.0), 14 (0.7)
% R-DBS	<b>93%</b>	<b>2%</b>		<b>5%</b>
<b>Kupfer (Cu)</b>	31 (1.8), 28, 37, 19, 1, 2, 29, 40, 7, 25, 45, 10, 4, 33, 17, 26, 22, 24, 44, 21, 3, 8, 32, 6, 36, 15, 41, 18, 30, 27, 11, 9, 12, 13 (0.2)	34 (2.7), 16, <b>35</b> (2.1)		35 (2.1), 43, 14, 38, 39, 42, 23, 5, 20 (0.3)
% R-DBS	<b>76%</b>	<b>7%</b>		<b>20%</b>
<b>Nickel (Ni)</b>	37 (1.6), 28, 2, 1, 16, 19, 26, 40, 7, 25, 4, 33, 10, 22, 8, 34, 17, 31, 32, 3, 13, 24, 12, 9, 30, 18, 21 (0.2)	29 (2.0)		45 (1.0), 43, 35, 42, 44, 14, 36, 15, 11, 41, 39, 6, 27, 5, 38, 23, 20 (0.1)
% R-DBS	<b>60%</b>	<b>2%</b>		<b>38%</b>
<b>Zink (Zn)</b>	22 (1.9), 1, 37, 25, 2, 4, 10, 27, 7, 8, 31, 3, 17, 32, 13 (0.4)	28 (3.5), 26, 19, 33, 12, <b>34</b> , 29, <b>40</b> , 24, 16 (2.0)		34 (2.3), 40, 14, 15, 43, 36, 6, 30, 45, 41, 44, 9, 42, 23, 11, 21, 38, 39, 18, 20, 5, 35 (0.4)
% R-DBS	<b>33%</b>	<b>22%</b>		<b>49%</b>
<b>Cadmium (Cd)</b>	1 (1.8), 10, 16, 25, 7, 2, 27, 32, 31, 24, 17, 8, 4, 3, 26, 13 (0.2)	<b>35</b> (7.6), 28, <b>44</b> , <b>34</b> , 12, 33, <b>40</b> , <b>41</b> , 22, <b>43</b> , 37, 19, 29, <b>6</b> , <b>42</b> (2.0)		35 (7.6), 44, 34, 40, 41, 43, 6, 42, 21, 36, 11, 9, 30, 14, 45, 15, 20, 38, 26, 39, 5, 18, 23 (0.2)
% R-DBS	<b>36%</b>	<b>33%</b>		<b>51%</b>
<b>Alle Schwermetalle</b>	25, 21, 37, 1, 10, 3, 7, 13, 31, 4, 8 Standorte ohne deutliche Schwermetall-Anreicherungen	2, <b>6</b> , 11, 12, 16, 17, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 29, 30, 32, 33, <b>34</b> , <b>35</b> , 36, 38, <b>40</b> , <b>41</b> , <b>42</b> , <b>43</b> , <b>44</b> , 45 deutliche Anreicherungen für mindestens ein Schwermetall		5, 6, 9, 11, 14, 15, 18, 20, 23, 26, 27, 30, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 Rückhaltevermögen für mindestens ein Schwermetall deutlich eingeschränkt
% R-DBS	<b>24%</b>	<b>56%</b>		<b>51%</b>

<sup>1)</sup> Quotienten der Totalgehalte der obersten zu den untersten beprobten mineralischen Horizonten.

<sup>2)</sup> Oberbodengehalte sind aufgrund der Schwermetallprofile bzw. der löslichen Gehalte und Anteile sowie aufgrund geringer relativer Bindungsstärken der Böden für Schwermetalle kaum geeignet, das kumulative Ausmass der anthropogenen Schwermetallbelastung anzuzeigen. Auf diesen Standorten wurde beispielsweise Cadmium bereits teilweise in tiefere Bodenschichten verlagert. Die Quotienten sind also in Bezug auf die Schwermetallanreicherung nicht mehr aussagekräftig bzw. unbestimmt (indifferent).

<sup>3)</sup> Standorte sind in der Reihenfolge abnehmender Quotienten aufgeführt. Die höchsten und tiefsten Quotienten jeder Gruppe sind jeweils in Klammern gesetzt. Kursiv und fett gedruckte Zahlen zeigen deutliche anthropogene Anteile, sind jedoch wegen hoher Schwermetalllöslichkeiten indifferent und sind daher in beiden Gruppen aufgeführt.

### 3.3 Schwermetallgehalte und pH-Werte: Differenzierung nach standörtlichen Kriterien

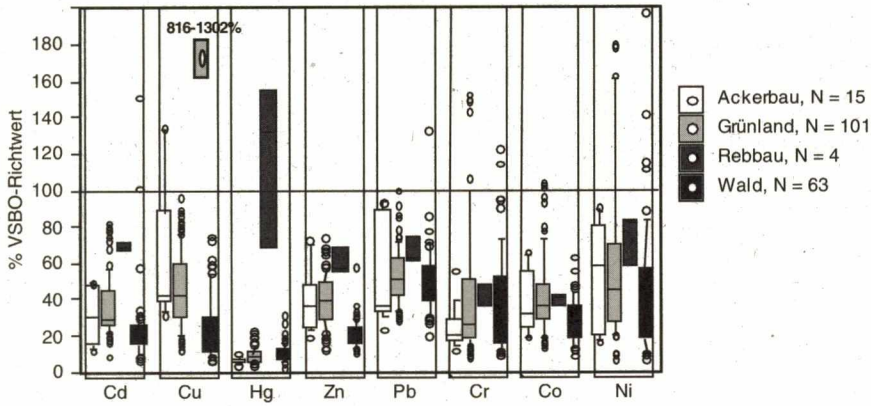
Aufgrund der zugrundegelegten Kriterien (Standortvariablen) bei der Wahl der Dauerbeobachtungsstandorte sind u.a. unterschiedliche stoffliche Einwirkungen auf die Böden zu erwarten. Ziel der folgenden Auswertung war es, Zusammenhänge zwischen Stoffgehalten in Böden, insbesondere den Schwermetallgehalten, und standörtlichen Variablen zu überprüfen. Denn nur wenn sich stofflich problematische Einträge oder schädliche Bodenentwicklungen nach ihrer Herkunft bzw. Ursache erfassen und quantifizieren lassen, sind gezielte Massnahmen zur Eindämmung unerwünschter Entwicklungen möglich. Böden stellen zwar in dieser Beziehung das komplizierteste Medium dar, dennoch lassen sich deutliche Hinweise auf die Herkunft von in Böden angereicherten (Schad-) Stoffen ableiten und Ursachen für unterschiedliche Bodenzustände erkennen.

Eine entsprechende Analyse der Daten wurde mit Boxplots vorgenommen (vgl. Lesehilfe zu den Boxplots in Anhang 4) und ist in den Abbildungen 3.3 bis 3.6 dargestellt.

#### *Schwermetall-Totalgehalte differenziert nach Nutzung*

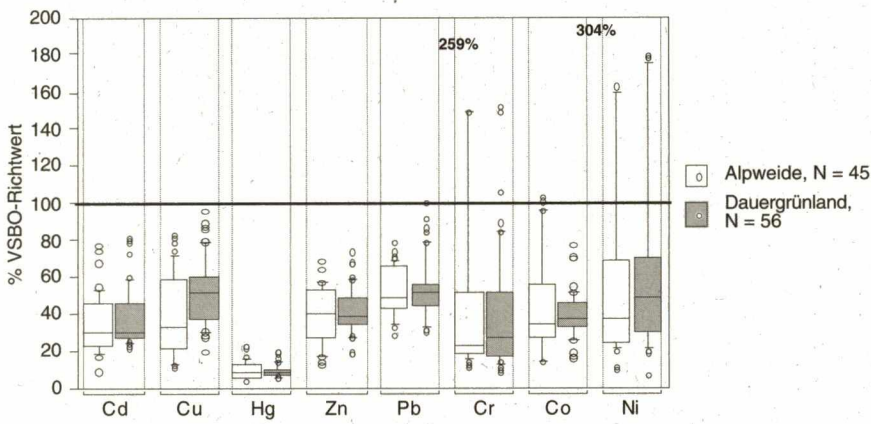
Die Verteilungen der Schwermetall-Totalgehalte zwischen den Nutzungsformen Ackerbau, Grünland, Rebbau und Wald weisen deutliche Unterschiede auf:

- Für die Rebbaustandorte sind die mittleren 50 % der Cd-, Cu-, Hg- und Zn-Werte deutlich von denjenigen anderer Nutzungsformen verschieden. Die Cu- und Hg-Gehalte der Rebbaustandorte sind die höchsten aller Standorte. Deutlich erhöhte Cu- aber auch Cd-Gehalte in Rebbergböden stehen im Zusammenhang mit spezifischen Anwendungen im Rebbau und sind als typisch nutzungsbedingt zu bezeichnen. Für Hg und Zn dagegen trifft dies nicht zu, so dass andere Einflüsse anzunehmen sind (vgl. Abb. 3.3).
- Die Cd-, Cu- und Zn-Gehalte der Ackerbau- und Grünlandstandorte weisen im Vergleich zu den Waldstandorten deutlich höhere Medianwerte auf. Für Cu und Zn und bei den Grünlandstandorten für Cd sind ferner die mittleren 50 % der Werte verschieden, so dass von deutlichen Nutzungseinflüssen ausgegangen werden kann. Für die Schwermetalle Pb, Cr, Co und Ni ist keine deutliche Differenzierung ersichtlich. Der höchste Bleiwert wurde auf einem Waldstandort gemessen. Die beobachteten Schwermetallverteilungen sind aufgrund eines erhöhten Eintrags von Cd, Cu und Zn über landwirtschaftliche Hilfsstoffe plausibel. Höhere Cu-Gehalte der Ackerbaustandorte (höherer Median und Maxima) im Vergleich zu den Grünlandstandorten sind als Ausdruck intensiverer Bewirtschaftung deutbar. Für Pb und Hg, als typische atmogene, d.h. über die Atmosphäre eingetragene Schwermetalle, sind erhöhte Werte auch auf Waldstandorten charakteristisch (vgl. Abb. 3.3).
- Die Differenzierung zwischen Alpweiden und Dauergrünland (Abb. 3.4) lässt tendenziell eine intensivere Bewirtschaftung des Dauergrünlands erkennen. Indiz hierfür ist der deutlich höhere Median für Cu sowie höhere Extremwerte für Cd und Zn.



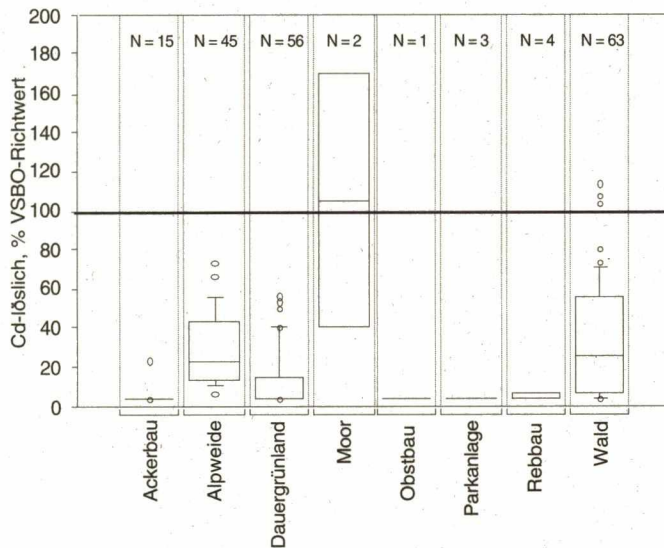
**Abb. 3.3:** Schwermetall-Totalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Nutzung

89 Standorte, Oberboden-Mischproben (0 - 20 cm)



**Abb.3.4:** Schwermetall-Totalgehalte der Grünlandstandorte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Alpweide und Dauergrünland

89 Standorte, Oberboden-Mischproben (0 - 20 cm)



**Abb. 3.5:** Lösliche Cadmium-Gehalte der Dauerbeobachtungsstandorte differenziert nach Nutzung

89 Standorte, Oberboden-Mischproben (0 - 20 cm)

**Lösliche Schwermetallgehalte differenziert nach Nutzung**

Abbildung 3.5 zeigt beispielhaft für Cd die Verteilung der löslichen Gehalte in Abhängigkeit von der Nutzung. Der Moorstandort ist ein Spezialfall und wird in der Analyse ausgeklammert.

- Es ist ersichtlich, dass sowohl die Mediane als auch die Maxima der Waldstandorte im Vergleich zu den anderen Nutzungsformen höher liegen. Gegenüber den Nutzungsfor-

men Ackerbau, Obstbau, Rebbau und Parkanlage sind ebenfalls die mittleren 50 % der löslichen Cd-Gehalte höher.

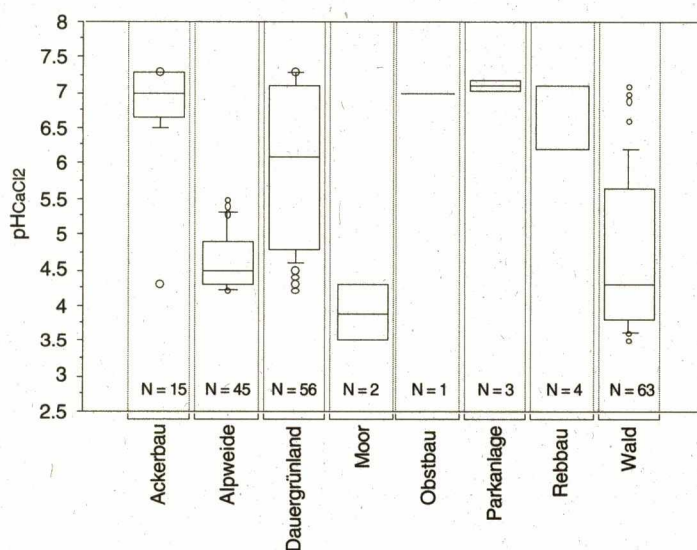
- Alpweiden weisen deutlich die höchste Löslichkeit unter den landwirtschaftlich genutzten Standorten auf, gefolgt von den Dauergrünland-Standorten. Beide Nutzungsformen unterscheiden sich durch die Maxima, Medianwerte und durch die mittleren 50 % der löslichen Cd-Gehalte von den anderen landwirtschaftlichen Nutzungsformen.
- Die löslichen Gehalte nehmen in folgender Reihenfolge ab und sind ursächlich mit der örtlichen Pflanzengesellschaft, der Nutzungsform bzw. der Intensität der Bewirtschaftung erklärbar: Waldstandorte >> Alpweiden >> Dauergrünland >> Ackerbau, Obstbau, Rebbau, Parkanlage. Generell ist also besonders auf Waldstandorten und Alpweiden sowie teilweise auf Dauergrünland-Standorten von markant höheren Schwermetallmobilitäten insbesondere von Cd aber auch von Ni und Zn auszugehen.

*pH-Werte der Standorte differenziert nach Nutzung*

Die pH-Werte weisen eine deutliche Nutzungsabhängigkeit auf (Abb. 3.6):

- Während die Ackerbau-, Obstbau- und Rebbau Standorte im allgemeinen als gut gepuffert bezeichnet werden können, sind die Oberböden der Wald- und Alpstandorte überwiegend sauer bis stark sauer.
- Für die Dauergrünlandstandorte ist das pH-Spektrum grösser und reicht von neutral bis stark sauer und ist als Indiz unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensitäten zu werten.

Im Vergleich zu Waldstandorten werden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen höhere pH-Werte erwartet, da die Säuredeposition in Wäldern wegen der Interzeption um einiges höher ist. Um ein optimales Wachstum der Kulturpflanzen zu fördern, wird zudem der Versauerungsprozess auf landwirtschaftlich genutzten Böden in der Regel durch die Zufuhr von Düngern und Kalk sowie durch die Bodenbearbeitung gezielt verhindert.



**Abb. 3.6:** Die pH-Werte der Dauerbeobachtungsstandorte in Abhängigkeit von der Nutzung

89 Standorte, Oberbodenmischproben (0 - 20 cm)

### 3.4 Die Filterfunktion der Böden – oder Schwermetalle werden mobil

Böden bilden im Stoffhaushalt der Ökosphäre ein natürliches Reinigungssystem. Immittierte Schadstoffe werden gebunden und - je nach Art der Stoffe und Eigenschaften der Böden - in mehr oder weniger hohem Masse dem Stoffkreislauf entzogen. Diese Eigenschaft von Böden wird als Filterfunktion bezeichnet. Ist diese Funktion gestört, so sind insbesondere leicht lösliche Schwermetalle (Cd, Zn, Ni) mit der Wasserbewegung im Boden mobil. Es besteht folglich die Gefahr einer Schadstoffaufnahme durch Organismen bzw. einer Migration in die Nahrungskette entweder direkt via Pflanzen oder über eine Belastung des Grundwassers. Die Filtereigenschaften von Böden gegenüber Schwermetallen werden massgeblich durch den pH-Wert sowie durch die Humus- und Tongehalte bestimmt. Bei Kenntnis dieser Eigenschaften ist eine Diagnose der Immobilisierung möglich<sup>4</sup>.

In Tabelle 3.4 ist die Filterfunktion - ausgedrückt als relative Bindungsstärke gegenüber Cadmium - für die DBS zusammenfassend aufgeführt (siehe auch Anhang 5). Demnach sind die relativen Bindungsstärken auf 55 % der Standorte stark bis sehr stark. Die Filterfunktion dieser Standorte ist intakt, d.h. Cadmium wird durch die Bindung an mineralische und organische Bestandteile des Bodens der Bodenlösung entzogen. Die Löslichkeit ist also sehr gering. Dieser Zusammenhang wird aus der mit Tab. 3.4 korrespondierenden Abbildung 3.7 deutlich (grüner Bereich).

Im Bereich mittlerer Bindungsstärken (ca. 22 % der Standorte) ist eine zunehmende Mobilisierung des Cadmium zu beobachten. Ca. 1/3 der Standorte mit Richtwertüberschreitungen für die löslichen Gehalte (vor allem an Zink) liegen in diesem Bereich.

Sinken die Bindungsstärken der Böden weiter - vor allem infolge einer zunehmenden Bodenversauerung -, so nimmt die umweltgefährdende Mobilität von Cadmium zu. 23 % aller Standorte und 59 % der Waldstandorte weisen geringe bis sehr geringe Bindungsstärken auf. Die Cd-Löslichkeit ist auf diesen Standorten entsprechend hoch (roter Bereich in Abb. 3.7) was auch in der Häufigkeit der Richtwertüberschreitungen für die löslichen Gehalte (ca. 2/3 der Standorte mit Richtwertüberschreitungen) zum Ausdruck kommt. Diese Standorte weisen ein deutlich eingeschränktes Filtervermögen auf, so dass Verlagerungen vor allem der relativ mobilen Schwermetalle Cd, Zn und Ni aus den Oberböden dieser Standorte in tiefere Schichten angenommen werden müssen. Die Mobilität von Schwermetallen in Böden nimmt im allgemeinen in folgender Reihenfolge ab: Cd >> Zn >> TI > Ni > Cu > As = Cr >> Pb >> Hg.

---

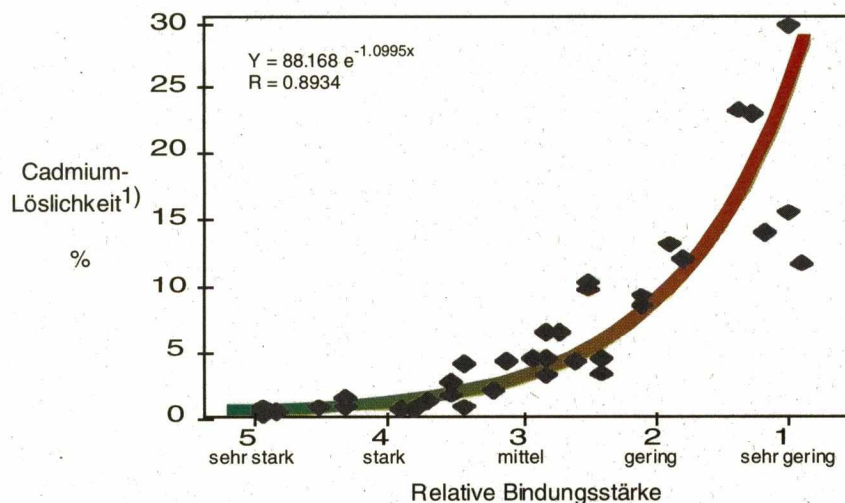
<sup>4</sup> DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 1988

**Tab. 3.4:** Filterfunktion der DBS: Relative Bindungsstärken der Böden für Cadmium

Filterfunktion gegnüber Schwermetallen (FSM)							
	Cadmium-FSM <sup>1)</sup>						
	5 - 4	4 - 3.5	3.5 - 3	3 - 2.5	2.5 - 2	2 - 1.5	1.5 - 1
	Standorte (Nr.) <sup>2)</sup>						
<b>R-DBS</b> (45 Standorte) <b>Oberböden</b>	12, 29, 25, 19, 13, 10, 7, 4, 2, 1, 31, 17, 37, 32	28, 16, 33, 24, 8, 27, 22	11, 3, 34, 6	21, 18, 40, 9, 26, 36, 20, 45	15, 30, 43, 42	44, 39	38, 41, 23, 35, 5, 14
% R-DBS	31%	16%	9%	18%	9%	4%	13%
<b>Unterböden</b>	1, 2, 4, 7, 10, 13, 14, 19, 25, 26, 29, 31, 11, 17, 20, 8, 9, 16, 32, 15, 24, 27, 36	28, 33, 34, 37	40, 3, 23	45, 12, 22	41, 18, 30, 35, 38, 39, 43, 44, 6, 5, 21, 42		
% R-DBS	51%	9%	7%	7%	26%		
<b>I-DBS 5 Standorte</b> <b>Oberböden</b>	47, 49, 48, 46, 50						
% I-DBS	100%	-	-	-	-	-	-
<b>Unterböden</b>	46, 47, 48, 49, 50,						
% I-DBS	100%						
<b>V-DBS</b> (39 Standorte)	55, 70, 67, 75, 74, 57, 68, 52, 53, 69, 61, 51, 72, 73, 64, 71, 76, 89, 56, 84	80, 65, 77	59, 78, 86, 60	87, 54, 85, 88	58, 82, 79, 83, 66	81, 62	63
% V-DBS	51%	8%	10%	10%	13%	5%	3%
<b>% DBS Oberböden</b> (Total 89 Standorte)	44%	11%	9%	13%	10%	5%	8%

1) Relative Bindungsstärken: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = stark, 5 = sehr stark

2) Standorte sind in den Rubriken nach abnehmenden Bindungsstärken sortiert



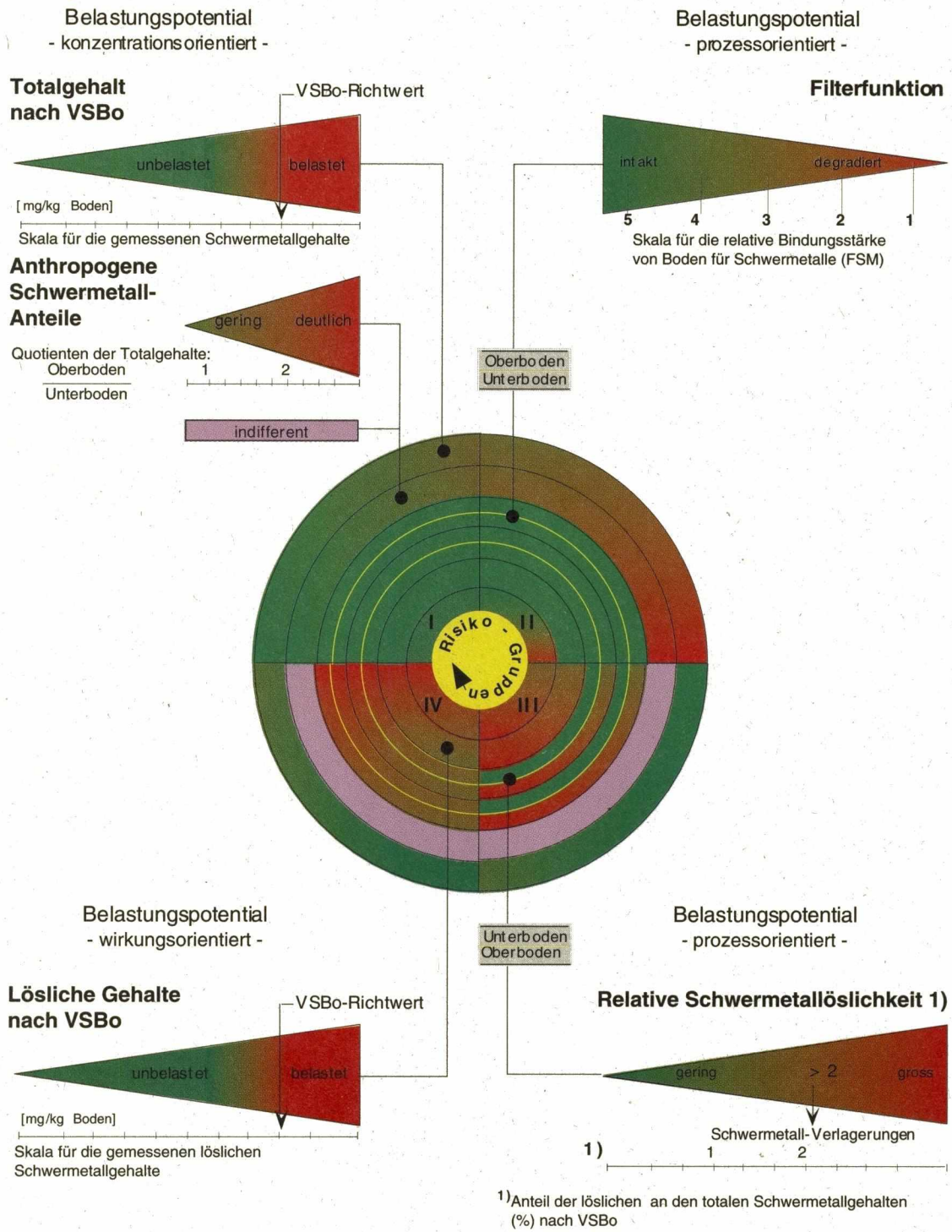
**Abb. 3.7:** Cadmium-Löslichkeit in Abhängigkeit der relativen Bindungsstärken (R-DBS)

1) Quotient aus den löslichen zu den Totalgehalten in %

### 3.5 Vom Belastungspotential zum Belastungsrisiko - oder wann Schwermetalle zur Belastung werden

Unter Belastungspotential von Böden wird die Möglichkeit einer Umweltbelastung, z.B. mit Schwermetallen, verstanden. Es ist zum einen abhängig von Art, Bindungsform und Konzentration eines Schwermetalls im Boden und wird zum anderen massgebend von Bodeneigenschaften, welche die Verfügbarkeit bzw. die Bindung oder Mobilität von Schwermetallen in Böden und damit deren Schicksal beeinflussen, mitbestimmt. Sowohl Schwermetallgehalte als auch in diesem Zusammenhang relevante Bodenkennwerte wurden im LBN-GR erhoben bzw. waren ableitbar (Kapitel 3.1 - 3.4). Damit lassen sich verschiedene Potentiale charakterisieren und für die Beurteilung **aktueller** und **zukünftiger Belastungsrisiken** interpretieren. Ein Belastungsrisiko von Schadstoffen ist allgemein dann gegeben, wenn Schadstoffe in biologisch relevanten Konzentrationen verfügbar sind. Die Datengrundlage im LBN-GR erlaubt die Beurteilung der DBS mit Hilfe folgender Belastungspotentiale (siehe hierzu auch die zusammenfassende schematische Darstellung in Abb. 3.8):

- **Belastungspotential, konzentrationsorientiert:** Hierunter werden die gemessenen Schwermetall-Totalgehalte nach VSBo verstanden. Sie stellen das *Schwermetallpotential* eines Standortes dar, welches (maximal) wirksam sein bzw. werden kann. Bei Richtwertüberschreitungen ist ein Standort gemäss VSBo belastet (siehe Kapitel 3.1). Weiterhin bilden die Totalgehalte eine Grundlage für die Abschätzung anthropogener Schwermetallanteile (Potential) an einem Standort (Kap. 3.2).
- **Belastungspotential, wirkungsorientiert:** Gemeint sind die löslichen Schwermetallgehalte nach VSBo. Diese erlauben per Definition eine direkte Beurteilung biologischer Wirkungen, die von den gemessenen Schwermetallkonzentrationen ausgehen können. Bei Richtwertüberschreitungen sind schädliche Wirkungen auf Organismen nicht mehr auszuschliessen. Die löslichen Gehalte dienen also der Beurteilung des *aktuellen Belastungsrisikos*. Eine Bestandsaufnahme hierzu erfolgte in Kapitel 3.1. Eine Bewertung des effektiven Belastungsrisikos hat schliesslich unter Einbezug der Belastungspfade (Nahrung, Grundwasser) zu erfolgen.
- **Belastungspotentiale, prozessorientiert:** Die Charakterisierung der Belastungspotentiale als prozessorientiert bezieht sich auf die *Filterfunktion* des Bodens und auf die *relative Schwermetalllöslichkeit*. Diese beiden Kenngrössen vermögen zum einen aktuell gemessene Schwermetallgehalte und deren Verläufe in einem Boden zu erklären (Hergang). Zum anderen ist bei Kenntnis der Filterfunktion eine Diagnose des zukünftigen Verhaltens der Schwermetalle möglich (Entwicklung). Eine *Prognose des zukünftigen Belastungsrisikos* muss also eine prozessorientierte Beurteilung des Belastungspotentials miteinbeziehen. Ein Belastungspotential ist in diesem Zusammenhang allgemein dann gegeben, wenn Böden keine Senke mehr für Schwermetalle darstellen (relative Bindungsstärke  $< 3$ ), und diese so über pflanzliche und tierische Nahrung bzw. über das Grundwasser in die Nahrungskette gelangen können. Die relativen Löslichkeiten weisen dann Werte  $> 2\%$  auf (vgl. Abb. 3.7). Die Filterfunktion bzw. die relativen Löslichkeiten der DBS wurden in Kap. 3.4 dargestellt.



**Abb. 3.8:** Schema für die Risikobewertung von Böden in Bezug auf Schwermetalle

Die in die Risikobewertung eingehenden Belastungspotentiale bzw. die zugrundeliegenden Bodenkenneiwerte sind in Form von Wirkungskreisen dargestellt; von Aussen nach Innen: Totalgehalte nach VSBo, anthropogene Schwermetall-Anteile, Filterfunktion (Ober- und Unterboden), relative Schwermetalllöslichkeit (Ober- und Unterboden) sowie lösliche Schwermetallgehalte. Die Bewertung der Belastungspotentiale ist definiert (totale und lösliche Gehalte nach VSBo), empirisch abgeleitet (Filterfunktion, relative Schwermetalllöslichkeit) bzw. geschätzt (anthropogene Schwermetallanteile) und im Wirkungskreismodell farblich gekennzeichnet (grün: geringes Belastungspotential; rot: hohes Belastungspotential). Die Ausprägung der einzelnen Belastungspotentiale ermöglicht eine Einteilung der Standorte in die Risikogruppen I - IV, welche somit jeweils charakteristische Belastungspotentiale aufweisen.

Auf der Grundlage der beschriebenen Belastungspotentiale lassen sich die Dauerbeobachtungsstandorte charakterisieren und bezüglich des Belastungsrisikos nach dem Schema in Abb. 3.8 in vier Gruppen gliedern, wobei das Belastungsrisiko von Gruppe I zu Gruppe IV zunimmt. Generell ist feststellbar, dass die Risikogruppen III und IV vor allem Wald- und Alpstandorte beinhalten und die Standorte der Risikogruppe IV überwiegend auf der Alpensüdseite liegen.

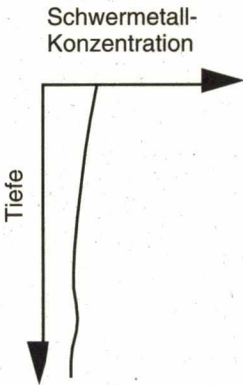
Beispielhaft wird die Einteilung für die Risikogruppe I ausführlich erläutert.

### Risikogruppe I

Die Standorte dieser Gruppe weisen Schwermetall-Totalgehalte auf, welche unter den entsprechenden Richtwerten liegen und somit eine *geringes konzentrationsorientiertes Belastungspotential* aufweisen (äusserer Ring in Abb. 3.8, grün). Anthropogene Schwermetallanteile sind gering (Anreicherungsfaktoren < 2, zweitäusserster Ring in Abb. 3.8, grün). Kennzeichnend hierfür sind leicht höhere Totalkonzentrationen in den Oberböden im Vergleich zu den Unterböden.

Die Schwermetallprofile der Totalgehalte zeigen einen entsprechenden, mit der Tiefe leicht abnehmenden Verlauf. Die pH-Werte liegen im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich, so dass die Schwermetalle in den Oberböden dieser Standorte immobilisiert werden. Die Bindungsstärken gegenüber Schwermetallen sind sowohl in den Ober- als auch in den Unterböden entsprechend hoch (Filterfunktion intakt, FSM > 4, drittäusserster Ring in Abb. 3.8., grün) und die relativen Löslichkeiten tief (viertäusserster Ring in Abb. 3.8, grün), so dass ein *geringes prozessorientiertes Belastungspotential* vorliegt.

Standorte dieser Gruppe sind insgesamt als schwach belastet zu bezeichnen. Ein Belastungsrisiko ist aufgrund geringer löslicher Schwermetallgehalte (keine Richtwertüberschreitungen, innerer Ring in Abb. 3.8, grün) - *geringes wirkungsorientiertes Belastungspotential* - und hoher Bindungsstärken gegenüber Schwermetallen auch längerfristig unwahrscheinlich.

<p><u>Risikogruppe I - Belastungspotentiale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• konzentrationsorientiert: gering Anreicherungsfaktoren: &lt; 2</li><li>• prozessorientiert: gering</li><li>• wirkungsorientiert: gering</li></ul> <p><u>Risikobewertung:</u> Belastung auch längerfristig unwahrscheinlich</p>		<p><b>Standorte<sup>1</sup>:</b> 1<sub>T</sub>, 2<sub>A</sub>, 3<sub>W</sub>, 4<sub>T</sub>, 7<sub>T</sub>, 8<sub>W</sub>, 10<sub>T</sub>, 17<sub>W</sub>, 24<sub>A</sub>, 25<sub>T</sub>, 26<sub>W</sub>, 27<sub>A</sub>, 31<sub>T</sub>, 32<sub>W</sub>, 46<sub>I</sub>, 47<sub>I</sub>, 50<sub>I</sub></p> <p>Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Schwache Schwermetallanreicherungen im Oberboden.</li><li>- Immobilisierung aufgrund hoher Bindungsstärken</li></ul>
---	---	---

<sup>1</sup>Die hier aufgeführten Standorte sind das Ergebnis der Charakterisierung der Standorte nach Belastungspotentialen (nach Schema in Abb. 3.8). Indices kennzeichnen Standorttyp: T = Talstandort (Grünland bzw. Acker); A = Alpstandort; W = Wald; I = Immissionsstandort

### Risikogruppe II

Eine unmittelbare Gefährdung von Organismen ist aufgrund der Immobilisierung der Schwermetalle und trotz deutlich erhöhter Totalgehalte derzeit nicht anzunehmen. Längerfristig und insbesondere bei Nutzungsänderungen (Versauerung) kann das Risiko von Belastungen zunehmen.

<p><u>Risikogruppe II - Belastungspotentiale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• konzentrationsorientiert: mittel bis hoch Anreicherungsfaktoren: &gt; 2</li> <li>• prozessorientiert: gering</li> <li>• wirkungsorientiert: gering</li> </ul> <p><u>Risikobewertung:</u> kein aktuelles Risiko</p>		<p><b>Standorte<sup>1</sup>:</b> 16<sub>T</sub>, 19<sub>T</sub>, 22<sub>T</sub>, 28<sub>T</sub>, 29<sub>W</sub>, 33<sub>A</sub>, 37<sub>T</sub>, 48<sub>I</sub>, 49<sub>I</sub></p> <p>Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deutliche Schwermetallanreicherungen im Oberboden.</li> <li>- Immobilisierung aufgrund hoher Bindungsstärken.</li> </ul>
---	--	--

<sup>1</sup> Die hier aufgeführten Standorte sind das Ergebnis der Charakterisierung der Standorte nach Belastungspotentialen (nach Schema in Abb. 3.8). Indices kennzeichnen Standorttyp: T = Talstandort (Grünland bzw. Acker); A = Alpstandort; W = Wald; I = Immissionsstandort

### Risikogruppe III

Bei meist unauffälligen Totalgehalten werden teilweise die Richtwerte für die löslichen Gehalte überschritten. Den hohen Schwermetall-Löslichkeiten entsprechen Bindungsfähigkeiten, welche mit einer fortgeschrittenen Bodenversauerung erklärt werden können. In diesen Böden kann eine erhöhte Mobilität insbesondere für die Schwermetalle Cd, Zn und Ni angenommen werden. Die Filterfunktion dieser Standorte ist im Oberboden als degradiert und im Unterboden als intakt zu bezeichnen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Interpretation der löslichen Gehalte dadurch erschwert wird, dass die gemessenen Gehalte einer Momentaufnahme entsprechen, die mit der Zeit variieren kann.

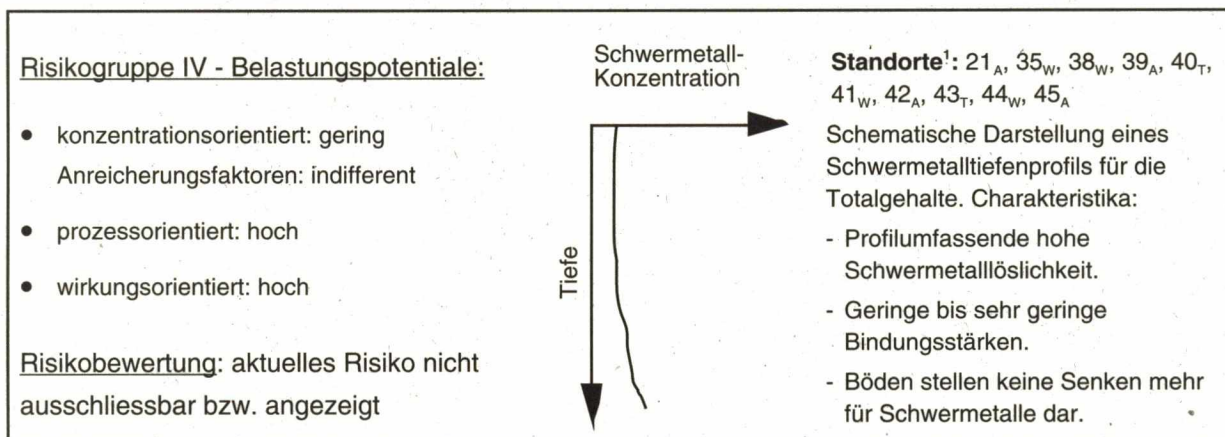
<p><u>Risikogruppe III - Belastungspotentiale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• konzentrationsorientiert: gering Anreicherungsfaktoren: indifferent</li> <li>• prozessorientiert: mittel bis hoch</li> <li>• wirkungsorientiert: mittel bis hoch</li> </ul> <p><u>Risikobewertung:</u> aktuelles Risiko nicht ausschliessbar bzw. angezeigt</p>		<p><b>Standorte<sup>1</sup>:</b> 5<sub>W</sub>, 6<sub>A</sub>, 9<sub>A</sub>, 11<sub>W</sub>, 14<sub>W</sub>, 15<sub>A</sub>, 18<sub>A</sub>, 20<sub>W</sub>, 23<sub>W</sub>, 30<sub>A</sub>, 34<sub>T</sub>, 36<sub>A</sub></p> <p>Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Schwermetallmobilität im Oberboden.</li> <li>- Vertikale Schwermetallverlagerungen.</li> <li>- Immobilisierung und Anreicherung der Schwermetalle im Unterboden.</li> </ul>
---	--	---

<sup>1</sup> Die hier aufgeführten Standorte sind das Ergebnis der Charakterisierung der Standorte nach Belastungspotentialen (nach Schema in Abb. 3.8). Indices kennzeichnen Standorttyp: T = Talstandort (Grünland bzw. Acker); A = Alpstandort; W = Wald; I = Immissionsstandort

Die Wirkung von Schwermetallen auf Organismen ist besonders auf sauren Standorten immer auch im Zusammenhang mit dem Nährstoffhaushalt zu sehen, d.h. die Empfindlichkeit von Organismen gegenüber Schwermetallen variiert mit der Nährstoffversorgung. Auf diesen Standorten kann ein aktuelles Belastungsrisiko nicht mehr ausgeschlossen werden bzw. ist bei Richtwertüberschreitungen der löslichen Gehalte angezeigt.

### Risikogruppe IV

Die Standorte dieser Gruppe sind bezüglich der Schwermetallmobilität im Oberboden mit denen der Gruppe 3 vergleichbar. Eine Verschärfung der Belastungssituation entsteht dadurch, dass die Böden dieser Gruppe profulumfassend ein eingeschränktes Rückhaltevermögen gegenüber Schwermetallen aufweisen. Schwermetallanreicherungen im Unterboden sind somit nicht unbedingt (mehr) erkennbar. Eine Migration der Schwermetalle ins Grundwasser ist nicht mehr auszuschliessen.



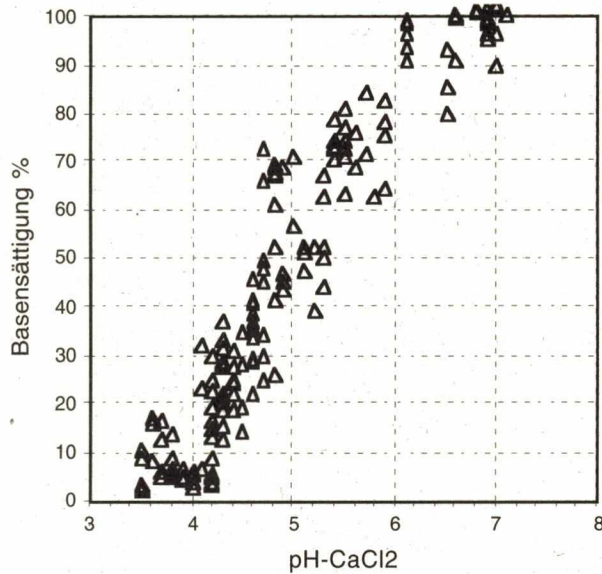
<sup>1</sup>Die hier aufgeführten Standorte sind das Ergebnis der Charakterisierung der Standorte nach Belastungspotentialen (nach Schema in Abb. 3.8). Indices kennzeichnen Standorttyp: T = Talstandort (Grünland bzw. Acker); A = Alpstandort; W = Wald; I = Immissionsstandort

### 3.6 Bodenversauerung

Der pH-Wert von Böden steht mit vielen Eigenschaften, Prozessen und Reaktionen in enger Beziehung und ist somit eine wichtige Kenngrösse für den allgemeinen Bodenzustand, Nährstoffhaushalt, Filter- und Puffereigenschaften und der Schadstoffbelastung. Säuren werden in Abhängigkeit von der Art und Menge der Bodenbestandteile (mineralisch und organisch) gepuffert, so dass sich charakteristische pH-Werte einstellen. Die Versauerung von Böden ist somit von der Pufferkapazität der in Böden vorkommenden Puffersubstanzen und der Menge zu puffernder Säuren abhängig. Böden im Austausch- (pH 5 - 4.2), Aluminium- (pH 4.2 - 2.8) und Eisenpufferbereich (pH 3.8 - 2.4) verwittern mehr oder weniger stark unter der Einwirkung vor allem starker anthropogener Säuren ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $NH_4$ , ...) aus sauren Niederschlägen und Düngern. Eine Folge der Säurepufferung ist die ständige Abnahme der Pufferkapazität und somit eine allmähliche Erschöpfung der natürlichen Pufferfunktion.

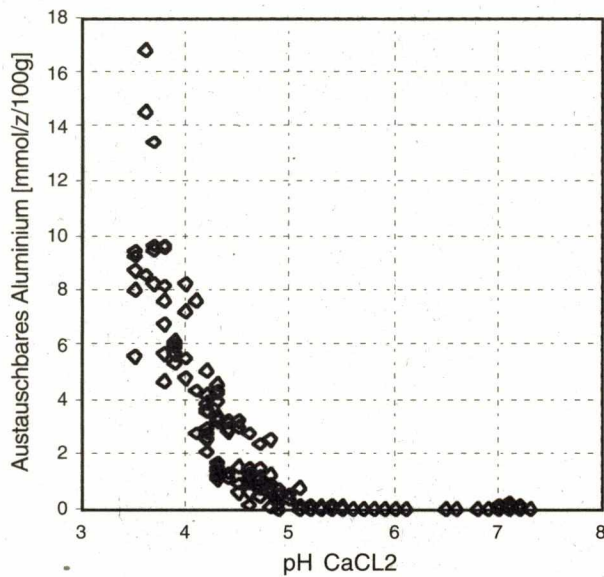
Auf sauren (pH < 5) und stark sauren (pH < 4.2) Standorten - im LBN-GR sind 21% der Waldstandorte sowie 87% der Alpstandorte sauer und 45% der Waldstandorte stark sauer - hat die Pufferung der Säuren eine fortgeschrittene Auflösung (Verwitterung) der Tonminerale und Silikate bewirkt und zu Auswaschungen von Nährstoffen geführt (Abb. 3.9). In der Bodenlösung treten verstärkt Aluminium-Ionen auf (Abb. 3.10). In diesem Zusammenhang sind die relativ hohen löslichen Schwermetallgehalte zu sehen. Mit fortschreitenden Einträgen starker Säuren wird sich die Bodenversauerung weiter in die Tiefe fortsetzen und die stoffliche Zusammensetzung der Böden verändern und so insbesondere die Filter- und Pufferfunktion erschöpfen.

Auswirkungen der Bodenversauerung auf den Bodenzustand sind anhand verschiedener Bodenkennwerte nachweisbar. Die Höhe der effektiven Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{eff}$ , entspricht der Summe austauschbarer Kationen in Böden), die Zusammensetzung des Kationenbelages und die Basensättigung (Anteil von Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium an der Kationenaustauschkapazität) stehen in enger Beziehung zum Gehalt und zur Zusammensetzung der Böden an mineralischen und organischen Bestandteilen (Ton und Humus) und zum pH-Wert. Nach den Gesetzen des Kationentausches ist die Zusammensetzung der Bodenlösung mit der Zusammensetzung des Kationenbelags von Tonmineralen und organischer Substanz verknüpft. Die Nährstoffverfügbarkeit nimmt daher mit abnehmender  $KAK_{eff}$  und/oder abnehmender Basensättigung ab. Die  $KAK_{eff}$  verändert sich durch die Prozesse der Bodenbildung (Verwitterung, Verlagerung, Humusbildung). Insbesondere die Mineralverwitterung durch die Reaktion mit Säuren "verbraucht" diese Austauschkapazität mit der Zeit. Böden im Aluminium und Eisenpufferbereich weisen in der Regel deutlich tiefere Kationenaustauschkapazitäten auf, als weniger stark versauerte Böden. In Abb. 3.9 ist die Abhängigkeit der Basensättigung vom pH dargestellt. Mit abnehmender Basensättigung ist eine Abnahme der Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen verknüpft. Gleichzeitig nimmt die Konzentration von Aluminium an den Tauscheroberflächen zu, was gleichbedeutend ist mit einer Zunahme der Aluminiumkonzentration in der Bodenlösung (Abb. 3.10).



**Abb. 3.9:** Basensättigung in Abhängigkeit vom pH-Wert

Eine abnehmende Basensättigung mit sinkenden pH-Werten wird aufgrund funktionaler Zusammenhänge erwartet und ist daher plausibel. Einige Werte wiesen allerdings Sättigungsgrade > 100% auf, was nicht plausibel ist (in der Grafik nicht dargestellt).



**Abb. 3.10:** Austauschbares Aluminium in Abhängigkeit vom pH-Wert

Mit sinkendem pH (zunehmende Versauerung) nimmt der Anteil von Al-Ionen am Kationenbelag zu. Diese Beobachtung korrespondiert theoretisch mit einer Zunahme potentiell toxisch wirkender Al-Ionen in der Bodenlösung.

## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

### 4.1 Schlussfolgerungen

#### Schadstoffbelastung und Bodenfruchtbarkeit

- Richtwertüberschreitungen der Totalgehalte wurden für einzelne Schwermetalle auf ca. 25 % der 89 Dauerbeobachtungsstandorte festgestellt und sind daher keine Einzelfälle. Ursachen für diese Überschreitungen der VSBo-Richtwerte sind ca. zur Hälfte (11 DBS) in den hohen, geogen bedingten (gesteinsbürtigen) Schadstoffgehalten vor allem an Chrom und Nickel zu suchen und sind dementsprechend von der Geologie bzw. der Region abhängig. Zur anderen Hälfte (10 DBS) sind Richtwertüberschreitungen (Totalgehalte) für Blei (5 DBS) , Cadmium (2 DBS) Kupfer (4 DBS) und Quecksilber (1 DBS) auf anthropogene (von Menschen verursachte) Einträge zurückzuführen.
- Vor allem Einträge der Schwermetalle Cadmium, Kupfer und Zink sind im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung zu sehen. Zunehmende Nutzungsintensitäten (Ackerbau > Grünland > Alpweide) sind offenbar mit steigenden Schwermetalleinträgen verbunden. Generell ist auf Landwirtschaftsstandorten auch zukünftig und je nach Art der Bewirtschaftung in unterschiedlichem Masse mit Einträgen zu rechnen, so dass ein stetes "Auffüllen" der Böden und damit ansteigende Gehalte und Zunahmen von Richtwertüberschreitungen zu erwarten sind.
- Für Blei und Quecksilber waren Anreicherungen sowohl auf landwirtschaftlich genutzten Standorten als auch auf Waldstandorten ohne nutzungsbedingte Einträge feststellbar, so dass neben nutzungsbedingten Einträgen (vgl. oben) grossräumige atmosphärische Frachten als Ursache für Schwermetallanreicherungen verantwortlich sind.
- Richtwertüberschreitungen für die löslichen Schwermetallgehalte (42 % der DBS) wurden überwiegend auf Wald- und Alpstandorten beobachtet. Betroffen hiervon sind vor allem die als relativ mobil (und daher leicht auswaschbar) geltenden Schwermetalle Cadmium, Zink und Nickel. Gelöste und deshalb mobile Schwermetalle können auf Waldstandorten (32 Standorte oder 50 %) in erster Linie ins Grundwasser eingewaschen werden, auf den betroffenen Alpstandorten (8 Standorte oder 60 % mit Richtwertüberschreitungen) ist unter Umständen der Belastungspfad übers Futter (Beweidung) relevant.
- Überschreitungen der VSBo-Richtwerte für die löslichen Schadstoffgehalte sind eine Folge des sauren bis stark sauren Bodenmilieus der betroffenen Standorte. Als Säurequellen kommen natürliche Prozesse wie die Bodenatmung und die Freisetzung organischer Säuren aus dem Abbau organischer Substanzen im Boden sowie anthropogene Einträge ("saurer Regen", sauer wirkende Dünger) in Frage. Auf Waldstandorten ist der Einfluss der Pflanzengesellschaft von besonderer Bedeutung: Fichten führen im Vergleich etwa zu Buchen, Eichen oder Kiefern zu einer beschleunigten Versauerung. Insofern ist

der Grad der Bodenversauerung auch Ausdruck der örtlichen Pflanzengesellschaft bzw. der Nutzung. Bekanntlich werden Wälder und Alpweiden im Gegensatz zu Ackerbau und Grünland in der Regel nicht gekalkt bzw. gedüngt. Folglich werden weniger Basen zugeführt und damit weniger Säuren neutralisiert.

- Wird zur Beurteilung des allgemeinen Bodenzustands bzw. der Bodenfruchtbarkeit der pH-Wert herangezogen, so ist die Bodenfruchtbarkeit auf gut der Hälfte der Alp- und Waldstandorte und teilweise auf Grünlandstandorten aufgrund des sauren bis stark sauren Bodenmilieus eingeschränkt. Die Degradierung (Verschlechterung) dieser Böden ist eine Folge der natürlichen und anthropogenen Bodenversauerung. Ausdruck hierfür sind Richtwertüberschreitungen für die löslichen Schwermetallgehalte, eine degradierte Filterfunktion der betroffenen Böden sowie irreversible Veränderungen der Böden an sich: Ca. 32 % aller Standorte weisen geringe bis sehr geringe relative Bindungsstärken für Schwermetalle auf, so dass die Böden ihre Funktion als Schad- aber auch Nährstoffspeicher nicht mehr erfüllen können; das saure Bodenmilieu bewirkt eine stetige Veränderung und teilweise Auflösung der Bodenminerale unter Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen und könnte eine Freisetzung von Aluminiumionen (Pflanzengift) bewirken. Entsprechende Zusammenhänge sind aus den Bodenkennwerten des LBN-GR ersichtlich. Grundsätzlich drohen Säurebelastungen die Stabilität der Waldökosysteme zu verschlechtern. Nach dem Konzept der kritischen Belastungsgrenzen ("critical loads") ist die kritische Säurebelastung für rund 60 % der Waldflächen in der Schweiz überschritten. Der Zustand der Waldstandorte im LBN-GR (45% der Standorte sind bereits stark sauer) bestätigt diese Aussage. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung der Versauerung, insbesondere die Intensität der fortschreitenden Versauerung auch des Unterbodens, als vordringlicher Problembereich für Waldstandorte zu betrachten.

### **Geogene und anthropogene Schwermetallanteile in Böden**

- Abschätzungen anthropogener Schwermetallanteile in den Oberböden der DBS indizieren mehr oder weniger flächendeckende Schwermetalleinträge: 56 % der DBS weisen deutliche anthropogene Anteile auf. Insbesondere gilt dies für Blei, Cadmium und Zink.
- 40 - 50 % der Standorte sind wegen hoher Schwermetalllöslichkeiten bzw. aufgrund eines eingeschränkten Rückhaltevermögens für Schadstoffe nicht mehr geeignet, die relativ mobilen Schwermetalle Cadmium, Zink und Nickel vollumfänglich im "Bodenfilter" zurückzuhalten. Die Filterfunktion dieser Standorte muss als degradiert bezeichnet werden.
- Für die relativ immobilen Schwermetalle Blei und Quecksilber sind Anreicherungen im Gegensatz zu den relativ mobilen Schwermetallen Cadmium, Zink und Nickel auch auf Waldstandorten offenbar. Dies ist ein deutliches Indiz für grossräumige atmosphärische Einträge von Schadstoffen.
- Bezüglich Chrom und Nickel waren keine deutlichen Anreicherungen abschätzbar. Diese Elemente gelten folglich primär als geogen.

## Beurteilung des Belastungsrisikos auf der Grundlage von Belastungspotentialen

- Die im Rahmen der Erstbeprobung erfassten Bodenkenngrössen bilden eine differenzierte Grundlage zur Charakterisierung von Belastungspotentialen. D.h., sind die Schadstoffgehalte gemäss VSBo bekannt, so ist in Verbindung mit relevanten Bodenkenngrössen eine Beurteilung des aktuellen sowie eine Prognose des künftigen Belastungsrisikos durchführbar. Im vorliegenden Bericht wurde dazu ein Bewertungsschema angewendet, welches konzentrationsorientierte, prozessorientierte und wirkungsorientierte Belastungspotentiale unterscheidet. Damit wurden die DBS in vier Gruppen mit zunehmendem Belastungsrisiko gegliedert. Für die Prognose steht insbesondere die Beurteilung der Filterfunktion (abgeleitet aus den relativen Bindungsstärken für Schwermetalle) der Böden im Vordergrund.
- Es gilt festzuhalten, dass das *höchste* aktuelle Belastungsrisiko der DBS vor allem bei Alp- aber auch bei Waldstandorten sowie bei versauerten Dauergrünland- und Ackerstandorten besteht. Ein *hohes* Belastungspotential weisen demgegenüber Standorte mit deutlichen anthropogenen Schwermetallanteilen bzw. Standorte mit Richtwertüberschreitungen für die Totalgehalte auf. Trotzdem darf angenommen werden, dass in der Regel von den Böden Graubündens keine Belastungen ausgehen. Jedenfalls solange nicht, wie die Filterfunktion der Böden nicht zu sehr eingeschränkt ist. Bei hohen Totalgehalten, nur noch mittleren Bindungsstärken im Zusammenhang mit zunehmend sauren Bodenverhältnissen sind Belastungsrisiken mittelfristig (Jahre bis Jahrzehnte) aber nicht auszuschliessen.

## Boden-Dauerbeobachtungsstandorte als Referenzflächen

- Mit der Erstbeprobung des LBN-GR wurden 89 regional verteilte Boden-Dauerbeobachtungsstandorte unterschiedlicher Eigenschaften und Nutzungsformen als Referenzflächen erfasst. Insbesondere für die Überwachung grossräumiger Ereignisse liegt nun ein ausreichendes Netz von Standorten vor mit Kennwerten zur allgemeinen Bodenbeschaffenheit und zu den Schwermetallgehalten dieser Böden unter Berücksichtigung regionaler Unterschiede.

### 4.2 Ausblick

Aus der Auswertung der Erstbeprobung des Langfristigen Bodenbeobachtungsnetzes des Kantons Graubünden können folgende Erkenntnisse für weitere Untersuchungen der DBS abgeleitet werden:

#### *Überprüfung des Auswahlkonzepts für die DBS*

Das Auswahlkonzept für die DBS kann mit Blick auf die Zielsetzungen des LBN-GR und mit Blick auf einen optimalen Mitteleinsatz überprüft werden: Die Anzahl Netzstandorte mit im wesentlichen gleichen Eigenschaften kann reduziert werden. Bisher eher unterrepräsentierte Standorte sind neu ins Netz aufzunehmen. Insbesondere muss darauf geachtet werden,

dass die Folgen bedeutender Änderungen - wie beispielsweise die Ökologisierung der Landwirtschaft und die Emissionsbegrenzungen - langfristig massnahmengerecht beurteilt werden können. Die Anzahl DBS muss dabei nicht erhöht werden.

#### *Problemflächen und Beprobungsintensität*

Standorte mit einem hohen Schadstoff-Belastungspotential, stark versauerte bzw. durch Versauerung bedrohte Standorte sowie Standorte auf denen verstärkt Schadstoffanreicherungen zu erwarten sind, stellen Problemflächen dar. Im Sinne eines optimalen Mitteleinsatzes kann geprüft werden, ob die DBS in Zukunft je nach Belastungsgrad bzw. Empfindlichkeit gegenüber Einwirkungen in unterschiedlichem Umfang beprobt werden können. Die Bestimmung löslicher Schwermetallgehalte in Böden mit einem intakten Filtervermögen wird z.B. kaum zusätzliche Informationen liefern. Hingegen wäre es sinnvoll, die Versauerungsdynamik auf empfindlichen Standorten mit geeigneten Methoden zu erfassen.

#### *Erkennung von Risikopotentialen*

Um die zeitliche Entwicklung in Bezug auf Schadstoffbelastungen sowie bezüglich der Bodenversauerung besser abschätzen zu können, werden Messungen bzw. Abschätzungen der Schadstoffeinträge an ausgewählten Standorten durchgeführt. Im Sinne einer integrierten Umweltbeobachtung sind nach Möglichkeit Daten aus anderen Umweltkompartimenten (Luft, Wasser) miteinzubeziehen. Je besser die Stoffkreisläufe erfasst werden können, desto eher sind Risiken bzw. schädliche Entwicklungen erkennbar. Zu nennen sind hier die Integration der Stoffflussbilanzierungen, welche ein Instrument darstellen, um Anreicherungen und Abnahmen frühzeitig zu erkennen und um deren Ursachen zu ermitteln. Sie dienen gleichsam der Interpretation der erhobenen Bodendaten. Auf Landwirtschaftsstandorten wird dem Prinzip von ausgeglichenen Nährstoffkreisläufen (ohne Verluste) verstärkt Bedeutung zukommen.

#### *Prüfung und Einbezug weiterer Kenngrössen*

Das kantonale Messprogramm muss neuen Entwicklungen und Erkenntnissen gegenüber offen bleiben. Insbesondere ist aufgrund der Revision des Umweltschutzgesetzes vom 21.12.1995 die Aufnahme von Bodenkennwerten zur Erfassung physikalischer Einwirkungen im Hinblick auf Erosion und Schadverdichtungen zu prüfen. Desgleichen gilt für die Aufnahme aussagekräftiger Bioindikatoren.

Zukünftig dürfte das Messprogramm insbesondere auch um organische Schadstoffe zu erweitern (z.B. PCB, PAK) sein. Es ist zu erwarten, dass die Relevanz organischer Schadstoffe im Vergleich zu den Schwermetallen zunimmt.



## **Anhang**

- Anhang 1:** Formen der Bodenschädigung und mögliche verursachende Belastungen
- Anhang 2:** Totale und lösliche Schwermetall- und Fluorgehalte der DBS; schweizerische Vergleichswerte
- Anhang 3:** Anthropogene Schwermetallanteile der R-DBS: Quotienten aus Ober- und Unterbodengehalten
- Anhang 4:** Box-Plot-Lesehilfe
- Anhang 5:** Relative Bindungsstärken der DBS für Cadmium und relative Cadmium-löslichkeiten der R-DBS

**Anhang 1: Formen der Bodenschädigung und mögliche verursachende Belastungen** (nach Schulin, 1994: Bodenschutz - Grundzüge. Unterlagen zur Vorlesung, Institut für Terrestrische Ökologie, ETH-Zürich).

<b>Formen der Bodenschädigung</b>	<b>Mögliche verursachende Belastungen</b>
<b>Versauerung</b>	Eintrag von Säuren und Säurebildnern aus der Luft
<b>Vergiftung</b>	Schwermetalle und toxische organische Verbindungen
<b>Verschmutzung</b>	Abfälle, Abwässer, Deposition von Aerosolen
<b>Verseuchung</b>	unhygienisierte Klärschlämme, Fäkalien
<b>Verstrahlung</b>	radioaktiv belastete Abwässer, Fallouts
<b>Abtrag und Überschüttung</b>	Erosion, Überschwemmung
<b>Zerstörung</b>	Bergbau, Kiesabbau
<b>Bodenschwund</b>	Mineralisierung von organischen Böden (Moore)
<b>Verdichtung</b>	mechanische Bodenbearbeitung
<b>Versiegelung</b>	Betritt, Überbauung, Verschlammung
<b>Überdüngung</b>	Phosphat, Nitrat
<b>Erschöpfung</b>	Nährstoffentzug durch Übernutzung, Auswaschung
<b>Versalzung</b>	Bewässerungskulturen
<b>Vernässung</b>	Grundwasserspiegelanhebungen, Verdichtung
<b>Trockenlegung</b>	Grundwasserspiegelabsenkungen, Klimaänderung

Böden stellen ein natürliches Gut dar, welches in seiner Ressource begrenzt ist.

Unterschiedliche Nutzungsansprüche sowie Beanspruchungen von Bodenfunktionen führen zwangsläufig zu Konflikten. Der zivilisatorische "Druck" auf den Boden wächst in vielfältiger Weise. Neben bedeutenden Bodenverlusten durch Überbauungen aller Art und Erosion auf Ackerflächen werden Böden durch Bewirtschaftung und Immissionen von verschiedensten Stoffen beansprucht. Durch Überbeanspruchung können Böden in ihrer Funktionsfähigkeit dermassen beeinträchtigt werden, dass sie zur Gefahrenquelle für Mensch und Umwelt werden.

Anhang 2

**Anhang 2: Totale und lösliche Schwermetall- und Fluorgehalte der DBS; schweizerische Vergleichswerte**

**Schwermetall- / Fluor-Totalgehalte [mg/kg Boden] der R-DBS**

Nach VSBo (0-20 cm), Medianwerte aus 3 Feinerdemischproben, sortiert nach abnehmenden Gehalten.

Stao = Standort

Stao	Pb	Cr	Co	Cu	Zn	N	Cd	Hg	Mo	Tl	F
13	46.5	190.5	25.6	44.4	141	27	0.638	0.174	3.2	0.41	1400
37	42.3	114	23.9	40.5	134	19	0.59	0.153	2	0.39	1220
43	37	111	19.3	39.6	128	25	0.474	0.145	37	1.17	1060
39	36.4	84.9	17.5	37.7	116	36	0.419	0.122	24	1.11	1035
41	34.8	69.7	14	35.5	114	15	0.39	0.116	45	1.04	1010
29	34.5	62.1	12.8	35.5	108	20	0.389	0.115	29	0.94	1000
42	34.1	57.4	12.5	33.8	108	16	0.373	0.114	33	0.93	990
3	34	46.9	12	29.2	106	7	0.363	0.1	22	0.83	960
15	33.2	41	11.7	29.2	98.9	17	0.358	0.099	40	0.82	925
12	31.3	40	11.7	28.4	97.3	42	0.353	0.096	15	0.75	874
14	31.1	43.5	11.4	27.6	94.7	4	0.339	0.094	31	0.74	860
21	28.2	39.1	11.3	26.8	93.1	1	0.293	0.085	42	0.72	839
11	27.3	30.5	10.9	26	91.9	41	0.269	0.081	43	0.74	820
7	27.1	30.2	10.7	25.2	89	10	0.268	0.081	26	0.68	790
8	26.4	30.1	10.4	24.4	83.3	3	0.238	0.077	39	0.67	780
34	26.3	24.1	10.1	22.1	78.7	26	0.234	0.076	19	0.64	740
10	25.8	23.1	9.2	21.7	76.6	11	0.233	0.072	32	0.59	720
1	25.6	22.7	9.1	19.4	75.5	40	0.229	0.068	44	0.59	680
38	25.4	22.1	9	17.8	74.5	8	0.227	0.064	13	0.52	629
4	25.3	21.8	8.9	17.5	72.5	22	0.224	0.064	11	0.45	620
28	24.9	19.8	8.8	16.9	71	45	0.223	0.062	16	0.45	610
36	24.4	19.6	8.8	16.6	68.9	12	0.216	0.062	34	0.39	610
6	23.9	18.9	8.7	16.2	58.8	33	0.21	0.059	6	0.38	610
30	23.8	18.3	8.7	15.9	58.5	9	0.207	0.058	30	0.37	600
19	23.6	17.2	8.4	15.5	56.6	14	0.201	0.057	36	0.36	600
40	23.5	17	8.4	15	55	43	0.2	0.057	10	0.35	592
23	22.9	14.8	8.2	13.7	52.9	37	0.199	0.056	21	0.33	590
45	22.6	14.5	7.3	13.6	48.5	30	0.198	0.056	23	0.32	582
9	22.2	14.2	7.3	12.7	44.7	31	0.186	0.056	38	0.31	570
16	22.2	13.7	7.2	11.8	41.4	2	0.184	0.056	4	0.3	570
17	21.3	13.3	7.1	11.5	35	41	0.182	0.055	14	0.3	550
27	20.9	13.2	6.5	10.8	40.4	6	0.18	0.052	35	0.28	550
2	20.7	13.2	6.3	9.6	39.5	32	0.177	0.052	9	0.27	537
26	19.4	13.1	6.2	8.6	36.7	28	0.168	0.05	32	0.26	530
44	19.2	12.9	5.7	8.4	36.3	39	0.153	0.049	21	0.26	490
18	18.3	12.6	5.5	7.2	36.2	21	0.141	0.049	17	0.25	480
5	18.1	12.4	5.8	7.1	32	24	0.14	0.048	20	0.25	477
31	18	11.3	4.7	6.3	33.9	34	0.139	0.045	41	0.25	470
24	16.7	11.3	4.7	6.2	33.8	38	0.13	0.043	18	0.24	460
35	16.7	10.9	4.6	5.8	31	13	0.126	0.04	8	0.22	433
20	15.8	10.6	3.6	5.8	28.7	44	0.121	0.04	25	0.22	430
22	15.6	8.7	3.5	5.3	28.5	5	0.103	0.038	5	0.21	430
25	15.4	8.6	3.3	5.1	25.9	35	0.089	0.038	7	0.19	410
32	14.1	7.3	2.9	4.4	25.8	29	0.068	0.034	6	0.17	330
33	14.1	6.9	3.2	3.2	25.5	18	0.06	0.031	2	0.17	300
Median Tal	25.3	19.6	9.2	26	89	24	0.233	0.057	0.52	0.09	620
Median Wald	21.3	18.9	6.3	7.2	36.2	13.5	0.141	0.064	0.3	0.12	582
Median Alp	23.9	17.2	8.8	15.9	76.6	19	0.224	0.057	0.38	0.1	610
<b>Meyer, 1990</b>											
Landwirtschaft	22.6	30	8.7	23.6	62.1	29.8	0.31	0.081			420
Wald	21.3	27	9.4	12.1	47.5	27.8	0.21	0.13			365
<b>Vogel, 1989</b>											
Landwirtschaft	21.4			23.6	56.5	24.4	0.24				
Grünland	22.3			22.3	60.9	22.9	0.25				
Wald	26.1			11.6	45.6	19.8	0.17				
<b>KABO StG</b>											
Wiese	27.1	11.5	5.7	17.4	60.1	19.8	0.44	0.09			365
Wald	27	7	6.3	7.4	36.6	10.1	0.16	0.105			373
<b>NABO, 1993</b>											
Grasw. intens.	24	32.4	6.4	21.4	70.1	25.5	0.29	0.11			522
Grasw. extens.	22.7	26.2	5.5	16.4	52.1	18.7	0.16	0.1			672
Kunstwiese	25.6	25.1	8.3	17.9	56	24.6	0.3	0.09			435
Nadelwald	29.8	22.2	4.6	10.6	43.1	16.8	0.15	0.14			355
Laubwald	23.4	21.6	5.3	10.7	49.8	17.3	0.29	0.11			380
<b>NABO, GR</b>											
75 Nationalpark	79.5	455	33.3	50.1	94.2	72	291	0.4	47	0.24	1442
90 Wald	62.8	40.1	13.3	47	94.1	77	43.8	0.38	90	0.24	907
72 Alp/Waffenpl.	44.3	33.8	10.2	37.5	70	83.7	47	0.32	73	0.2	71
73 Wald	40.3	25.3	7.8	28.4	78	77	35.8	0.32	72	0.17	741
47 Wald	38	24.8	6.7	17.6	76	78	31.8	0.3	76	0.17	698
70 Dauersp.	35.8	24.2	6.5	17.5	90	66.2	16	0.3	71	0.16	516
77 Bio-Ackerbau	29.9	20	7.1	13.1	47	59	14.6	0.29	70	0.12	508
71 Alp	27.8	13.5	3.3	7.6	89	56.6	10.4	0.25	75	0.1	391
78 Ackerbau	25.5	9	2.6	7.5	71	52.5	8.9	0.24	78	0.09	314
76 Wald	22	5.5	2.2	5.2	76	47	5	0.21	89	0.09	188
89 Uebg.Moor	21.6	5.5	0.5	4.7	73	39.1	5	0.17	77	0.08	16
Median total	35.8	24.2	6.5	17.5	66.2	16	0.3	0.16			516
Median Wald	39.15	22.65	4.55	12.45	53	23.1	0.28	0.22			415
Median Alp	44.3	13.5	5	17.5	76	16	0.3	0.16			746
VSBo-RW	50	75	25	50	200	50	0.8	0.8	5	1	400

1 fett Richtwertüberschreitung 2/3 des entsprechenden Richtwertes überschritten

**Lösliche Schwermetall- und Fluor-Gehalte [mg/kg Boden] der R-DBS**

Nach VSBo (0-20 cm), Medianwerte aus 3 Feinerdemischproben, sortiert nach abnehmenden Gehalten.

Stao = Standort

Stao	Pb	Stao	Cu	Stao	Zn	Stao	Ni	Stao	Cd	Stao	F
35	0.056	7	0.172	43	<b>2.703</b>	36	<b>0.632</b>	41	<b>0.032</b>	13	10.9
41	0.05	1	0.154	45	<b>2.632</b>	20	<b>0.63</b>	35	0.022	16	10.08
5	0.046	10	0.15	41	<b>2.443</b>	15	<b>0.419</b>	45	0.022	7	7.6
42	0.027	4	0.1	30	<b>2.2</b>	45	<b>0.292</b>	44	0.02	1	7.15
38	0.026	19	0.08	39	<b>1.379</b>	27	<b>0.255</b>	23	0.017	19	6.43
23	0.025	25	0.074	35	<b>1.24</b>	11	0.175	38	0.017	10	6.39
43	0.018	37	0.069	23	<b>1.063</b>	41	0.169	30	0.016	3	6.34
44	0.017	45	0.058	44	<b>1.057</b>	6	0.155	42	0.016	40	6.1
6	0.012	36	0.055	6	<b>0.965</b>	23	0.144	43	0.015	37	5.4
11.	0.01	8	0.05	38	<b>0.95</b>	17	0.143	18	0.013	28	5.11
18	0.01	43	0.047	34	<b>0.9</b>	5	0.134	21	0.013	34	4.88
20	0.01	16	0.045	18	<b>0.783</b>	38	0.12	40	0.012	4	4.59
2	0.008	3	0.039	42	<b>0.674</b>	44	0.108	5	0.011	29	4.48
40	0.008	31	0.039	40	<b>0.611</b>	18	0.09	20	0.01	14	3.74
17	0.007	33	0.036	5	<b>0.582</b>	16	0.086	15	0.009	11	3.64
27	0.005	40	0.036	15	<b>0.564</b>	8	0.083	17	0.009	26	3.55
39	0.005	11	0.034	36	<b>0.532</b>	40	0.081	39	0.009	22	3.07
21	0.004	22	0.034	20	0.46	43	0.08	24	0.007	31	2.93
45	0.004	28	0.033	21	0.381	21	0.072	37	0.006	43	2.93
24	0.003	15	0.032	33	0.38	35	0.072	2	0.005	8	2.88
26	0.003	34	0.032	9	0.378	39	0.072	3	0.005	27	2.7
29	0.003	9	0.03	22	0.256	34	0.071	11	0.005	30	2.62
32	0.003	39	0.026	24	0.234	42	0.07	22	0.005	25	2.44
34	0.003	13	0.025	37	0.205	30	0.068	27	0.005	2	2.42
36	0.003	27	0.021	12	0.184	22	0.048	36	0.005	9	2.41
8	0.002	41	0.021	11	0.181	25	0.046	6	0.004	32	2.39
15	0.002	5	0.02	17	0.129	9	0.039	33	0.004	5	2.34
19	0.002	6	0.019	16	0.115	12	0.036	34	0.004	6	2.31
30	0.002	12	0.016	3	0.099	33	0.035	9	0.003	21	2.22
33	0.002	29	0.016	27	0.089	19	0.034	16	0.003	20	2
37	0.002	38	0.015	2	0.08	24	0.034	32	0.003	23	1.98
1	0.001	23	0.014	31	0.068	26	0.03	8	0.002	24	1.97
3	0.001	42	0.014	28	0.067	28	0.029	12	0.002	38	1.97
4	0.001	44	0.014	8	0.045	2	0.027	14	0.002	35	1.95
7	0.001	30	0.013	19	0.04	3	0.026	26	0.002	17	1.85
9	0.001	18	0.012	13	0.039	37	0.024	1	0.001	36	1.84
10	0.001	24	0.012	10	0.036	10	0.023	4	0.001	39	1.81
12	0.001	21	0.01	32	0.033	4	0.021	7	0.001	12	1.74
13	0.001	20	0.009	14	0.031	32	0.016	10	0.001	33	1.6
14	0.001	26	0.009	26	0.026	1	0.015	13	0.001	15	1.59
16	0.001	17	0.008	29	0.02	14	0.013	19	0.001	45	1.47
22	0.001	35	0.008	7	0.017	29	0.013	25	0.001	18	1.22
25	0.001	14	0.007	25	0.017	7	0.012	28	0.001	44	1.02
28	0.001	32	0.007	4	0.012	13	0.006	29	0.001	41	0.97
31	0.001	2	0.006	1	0.01	31	0.004	31	0.001	42	0.6
Median Tal	0.001		0.047		0.067		0.029		0.001		5.4
Median Wald	0.01		0.014		0.181		0.108		0.009		2.34
Median Alp	0.003		0.021		<b>0.532</b>		0.072		0.007		1.84
<b>Meyer, 1990</b>											
Landwirtschaft	0.065		0.09		0.099		0.02		0.004		1
Wald	0.069		0.07		0.191		0.045		0.003		1.1
VSBo-RW	1		0.7		0.5		0.2		0.03		25

**I Fett** Richtwertüberschreitung  
 2/3 des entsprechenden Richtwertes überschritten

## Anhang 2

**Schwermetall- und Fluortotalgehalte [mg/kg Boden] der I-DBS**

Nach VSBo (0-20 cm), Medianwerte aus 3 Feinerdemischproben, sortiert nach abnehmenden Gehalten.

Stao = Standort

Stao	Pb	Stao	Cr	Stao	Co	Stao	Cu	Stao	Zn	Stao	Ni	Stao	Cd	Stao	Hg	Stao	Mo	Stao	Tl	Stao	F
49	107	49	59.6	50	15.7	48	422	48	111	49	77.2	48	0.554	48	1.07	50	0.55	47	0.21	48	801
48	30.8	48	27.6	49	11.6	50	66.2	49	102	50	42.9	49	0.313	49	0.441	47	0.37	49	0.07	50	722
47	20	46	21.1	48	10.3	49	54.5	47	57.7	48	40.6	46	0.24	50	0.052	49	0.35	48	0.06	46	638
50	17.7	50	14.7	47	8.1	47	29.9	50	50.4	46	28.7	47	0.239	46	0.049	48	0.27	46	0.04	49	631
46	16.6	47	14.6	46	7.8	46	20.8	46	48.4	47	24.8	50	0.11	47	0.045	46	0.14	50	0.02	47	525
Median	20		21.1		10.3		54.5		57.7		40.6		0.24		0.052		0.35		0.06		638

I Fett Richtwertüberschreitung

2/3 des entsprechenden Richtwertes überschritten

**Lösliche Schwermetall- und Fluorgehalte [mg/kg Boden] der I-DBS**

Nach VSBo (0-20 cm), Medianwerte aus 3 Feinerdemischproben, sortiert nach abnehmenden Gehalten.

Stao = Standort

Stao	Pb	Stao	Cu	Stao	Zn	Stao	Ni	Stao	Cd	Stao	F
47	0.002	48	0.812	49	0.036	49	0.061	46	0.001	46	9.27
49	0.002	49	0.296	47	0.03	47	0.023	47	0.001	47	8.59
46	0.001	47	0.145	48	0.022	46	0.02	48	0.001	49	6.07
48	0.001	46	0.097	46	0.017	48	0.012	49	0.001	48	4.32
50	0.001	50	0.017	50	0.004	50	0.001	50	0.001	50	2.05
Median	0.001		0.145		0.022		0.02		0.001		6.07

I Fett Richtwertüberschreitung

**Schwermetall- und Fluortotalgehalte [mg/kg Boden] der V-DBS**

Nach VSBo, eine Mischprobe, 0-20 cm. Standorte sortiert nach Region und Koordinaten.

Stao = Standort

Stao	Pb	Stao	Cr	Stao	Co	Stao	Cu	Stao	Zn	Stao	Ni	Stao	Cd	Stao	Hg	Stao	Mo	Stao	Tl	Stao	F	Höhe
Mesolcina																						ü. Meer
077	27.5	077	26.9	077	6.5	077	17.5	077	69.2	077	15.8	077	0.249	077	0.081	077	0.34	077	0.22	077	261	1040
078	33.1	078	23.5	078	6.4	078	17.1	078	76.2	078	13.6	078	0.222	078	0.075	078	0.62	078	0.23	078	274	955
079	27.7	079	24.7	079	5.6	079	12.6	079	49.5	079	13.8	079	0.161	079	0.071	079	0.64	079	0.18	079	262	920
082	23.4	082	26.5	082	5.5	082	15.7	082	49.4	082	13.9	082	0.146	082	0.065	082	0.5	082	0.15	082	245	700
081	25.1	081	20.4	081	5.2	081	15.4	081	46.7	081	12.3	081	0.156	081	0.049	081	0.38	081	0.19	081	258	475
080	42.8	080	43.2	080	7.8	080	<b>651</b>	080	155	080	17.6	080	0.518	080	0.057	080	0.47	080	0.29	080	391	300
40	23.5	40	45.1	40	11.7	40	26.8	40	98.9	40	24	40	0.216	40	0.038	40	0.82	40	0.39	40	<b>430</b>	270
083	15.2	083	41.6	083	10.1	083	20	083	75.7	083	22	083	0.125	083	0.031	083	0.43	083	0.33	083	<b>529</b>	262
084	9.8	084	70.9	084	10.1	084	37.1	084	50.5	084	<b>70.3</b>	084	0.086	084	0.014	084	0.11	084	0.22	084	374	258
085	29.4	085	32	085	6.7	085	15.1	085	58.4	085	23.5	085	0.2	085	0.101	085	0.35	085	0.16	085	270	493
086	38.6	086	50.4	086	13.8	086	30.8	086	114	086	44.3	086	0.27	086	0.126	086	0.18	086	0.3	086	<b>468</b>	787
087	24.7	087	70.2	087	15.8	087	36	087	72.9	087	<b>97.9</b>	087	0.22	087	0.082	087	0.14	087	0.28	087	<b>732</b>	1125
41	34.8	41	45.9	41	7.3	41	24.4	41	56.6	41	29.5	41	0.168	41	0.145	41	0.25	41	0.17	41	300	1370
088	38.8	088	67.1	088	12.7	088	29.5	088	91.9	088	49.9	088	0.225	088	0.093	088	0.36	088	0.26	088	359	1350
42	34.1	42	69.7	42	12.8	42	29.2	42	91.9	42	34.8	42	0.21	42	0.1	42	0.72	42	0.17	42	<b>430</b>	1750
Davos und Mittelbünden																						
24	16.7	24	13.7	24	5.5	24	8.6	24	41.4	24	10.1	24	0.224	24	0.174	24	1.11	24	0.41	24	<b>860</b>	2018
059	<b>77.7</b>	059	<b>130</b>	059	12.2	059	17.6	059	53.8	059	<b>165</b>	059	0.76	059	0.295	059	0.7	059	0.13	059	80	1525
058	<b>173</b>	058	37.1	058	2.1	058	44.6	058	135	058	49.6	058	0.577	058	0.165	058	0.79	058	0.05	058	53	1525
060	29.8	060	<b>1430</b>	060	<b>93.8</b>	060	12.5	060	59.9	060	<b>656</b>	060	0.231	060	0.07	060	0.13	060	0.04	060	174	1565
061	31.9	061	<b>79.3</b>	061	19.3	061	43.5	061	147	061	<b>78.1</b>	061	0.471	061	0.126	061	1.21	061	0.17	061	<b>513</b>	1547
063	14.6	063	7.6	063	2.2	063	4.2	063	20.7	063	3.3	063	0.05	063	0.086	063	0.35	063	0.08	063	<b>759</b>	1650
062	17.8	062	9.7	062	2.2	062	4	062	24.8	062	4.2	062	0.099	062	0.09	062	0.33	062	0.08	062	<b>576</b>	1585
22	15.6	22	23.1	22	10.7	22	15	22	72.5	22	22.3	22	0.2	22	0.072	22	0.83	22	0.11	22	<b>410</b>	1510
064	22.1	064	29.6	064	9.7	064	20.5	064	74.8	064	25.6	064	0.17	064	0.078	064	0.32	064	0.12	064	<b>454</b>	1498
23	22.9	23	22.7	23	6.3	23	9.6	23	48.5	23	13.2	23	0.186	23	0.114	23	0.32	23	0.11	23	<b>740</b>	1800
065	19.3	065	5.9	065	4	065	9.7	065	61.3	065	3.5	065	0.215	065	0.054	065	0.6	065	0.15	065	<b>586</b>	1580
066	26.3	066	14.8	066	4.7	066	4.9	066	59.6	066	7.8	066	0.169	066	0.103	066	0.3	066	0.1	066	<b>612</b>	1675
056	<b>66.1</b>	056	15.9	056	6.3	056	8.1	056	37.9	056	12.9	056	0.133	056	0.05	056	0.52	056	0.2	056	<b>913</b>	1360
057	45.1	057	13.3	057	5.8	057	24.8	057	85.4	057	11	057	0.377	057	0.053	057	0.54	057	0.17	057	<b>755</b>	1270
052	49.8	052	8.8	052	6.5	052	14.8	052	88.1	052	9.4	052	0.449	052	0.051	052	0.55	052	0.24	052	<b>1050</b>	1117
054	22.2	054	9.1	054	3.4	054	4.5	054	22	054	6.8	054	0.07	054	0.043	054	0.71	054	0.12	054	<b>585</b>	1225
053	45.5	053	11.3	053	4.3	053	21.3	053	68.2	053	9.3	053	0.277	053	0.056	053	0.53	053	0.16	053	<b>662</b>	1222
13	46.5	13	12.4	13	4.7	13	16.2	13	141	13	8.7	13	0.39	13	0.052	13	0.52	13	0.38	13	<b>990</b>	1022
051	43.2	051	8.8	051	7.1	051	18.7	051	79.9	051	9.3	051	0.389	051	0.041	051	0.65	051	0.17	051	<b>1028</b>	992
055	<b>141</b>	055	15.8	055	9.2	055	14.4	055	65.2	055	20	055	<b>0.807</b>	055	0.215	055	1.05	055	0.58	055	<b>875</b>	970
14	31.1	14	14.2	14	7.3	14	7.1	14	39.5	14	16.7	14	0.238	14	0.052	14	0.3	14	0.12	14	<b>820</b>	1375
15	33.2	15	30.2	15	<b>25.6</b>	15	35.5	15	108	15	57	15	0.363	15	0.096	15	0.75	15	0.1	15	<b>874</b>	2055
Bündner Rheintal																						
3	34	3	30.1	3	10.1	3	10.8	3	108	3	27.6	3	0.358	3	0.055	3	0.26	3	0.09	3	<b>1000</b>	1770
2	20.7	2	18.3	2	5.7	2	5.8	2	33.9	2	13.5	2	0.18	2	0.04	2	0.17	2	0.11	2	<b>600</b>	1250
071	32.3	071	26.2	071	9	071	9.7	071	51.8	071	22.2	071	0.377	071	0.076	071	0.11	071	0.15	071	<b>670</b>	1125
070	42.5	070	21.6	070	8.9	070	10.8	070	62.1	070	29.4	070	1.2	070	0.25	070	0.24	070	0.15	070	<b>628</b>	1122
069	34	069	26.7	069	10.1	069	12	069	54.9	069	28.7	069	0.46	069	0.167	069	0.2	069	0.14	069	<b>669</b>	875
067	26.6	067	25.7	067	8.2	067	16.6	067	52.9	067	27.3	067	0.329	067	0.045	067	0.13	067	0.11	067	<b>688</b>	630
068	26.5	068	22.3	068	8.9	068	18.9	068	45.2	068	28.4	068	0.202	068	0.056	068	0.13	068	0.11	068	<b>522</b>	610
076	21.7	076	18.6	076	9.5	076	35.3	076	79.5	076	29.7	076	0.283	076	0.063	076	0.31	076	0.16	076	<b>658</b>	523
072	33.5	072	26.4	072	10.3	072	34.6	072	73.7	072	35	072	0.32	072	0.08	072	0.24	072	0.04	072	<b>721</b>	525
1	25.6	1	19.8	1	11.4	1	39.6	1	78.7	1	34.1	1	0.233	1	0.068	1	0.17	1	0.03	1	<b>1035</b>	540
073	34.4	073	29.4	073	16.4	073	44.5	073	97.9	073	45.3	073	0.212	073	0.066	073	0.2	073	0.05	073	<b>1119</b>	540
074	28.1	074	23.2	074	10.3	074	29.3	074	74.6	074	28.8	074	0.576	074	0.069	074	0.28	074	0.05	074	<b>1301</b>	595
075	19	075	14.6	075	4.8	075	10.9	075	32.6	075	19.4	075	0.236	075	0.058	075	0.17	075	0.03	075	355	545
Mediane																						
Mes.	27.7		43.2		7.8		24.4		72.9		23.5		0.21		0.075		0.38		0.22		359	
Da.M.	31.5		14.5		6.3		14.6		63.25		11.95		0.2345		0.075		0.545		0.125		<b>701</b>	
Bü.R.	28.1		23.2		9.5		16.6		62.1		28.7		0.32		0.066		0.2		0.11			

## Anhang 2

**Lösliche Schwermetall- und Fluorgehalte [mg/kg Boden] der V-DBS**

Nach VSBo, eine Mischprobe, 0-20 cm. Standorte sortiert nach Region und Koordinaten.

Stao = Standort

Stao	Pb	Stao	Cu	Stao	Zn	Stao	Ni	Stao	Cd	Stao	F	Höhe ü. Meer
Mesolcina												
077	0.004	077	0.013	077	0.267	077	0.05	077	0.003	077	2.06	1040
078	0.01	078	0.017	078	<b>0.509</b>	078	0.049	078	0.004	078	2.04	955
079	0.04	079	0.011	079	<b>1</b>	079	0.083	079	0.011	079	1.34	920
082	0.031	082	0.012	082	<b>1.7</b>	082	0.071	082	0.014	082	1.33	700
081	0.073	081	0.015	081	<b>2.54</b>	081	0.078	081	0.02	081	1.41	475
080	0.002	080	<b>0.71</b>	080	0.371	080	0.051	080	0.003	080	7.66	300
40	0.008	40	0.036	40	<b>0.611</b>	40	0.081	40	0.012	40	6.1	270
083	0.006	083	0.032	083	0.433	083	0.106	083	0.007	083	8.03	262
084	0.001	084	0.058	084	0.006	084	0.042	084	0.001	084	1.83	258
085	0.043	085	0.013	085	<b>2.07</b>	085	0.17	085	0.022	085	1.27	493
086	0.01	086	0.013	086	<b>0.631</b>	086	0.077	086	0.011	086	1.06	787
087	0.003	087	0.012	087	0.108	087	0.107	087	0.007	087	1.28	1125
41	0.05	41	0.021	41	<b>2.443</b>	41	0.169	41	<b>0.032</b>	41	0.97	1370
088	0.214	088	0.019	088	<b>1.79</b>	088	0.179	088	0.016	088	1.03	1350
42	0.027	42	0.014	42	<b>0.674</b>	42	0.07	42	0.016	42	0.6	1750
Davos und Mittelbünden												
24	0.003	24	0.012	24	0.234	24	0.034	24	0.007	24	1.97	2018
059	0.071	059	0.057	059	<b>1.65</b>	059	<b>2.45</b>	059	0.012	059	1.53	1525
058	0.507	058	0.083	058	<b>14.98</b>	058	<b>2.36</b>	058	<b>0.051</b>	058	1.73	1525
060	0.002	060	0.007	060	0.103	060	<b>0.664</b>	060	0.003	060	1.11	1565
061	0.003	061	0.086	061	0.342	061	<b>0.222</b>	061	0.003	061	6	1547
063	0.035	063	0.009	063	<b>0.929</b>	063	0.12	063	0.008	063	2.14	1650
062	0.048	062	0.01	062	<b>1.05</b>	062	0.113	062	0.013	062	1.75	1585
22	0.001	22	0.034	22	0.256	22	0.048	22	0.005	22	3.07	1510
064	0.001	064	0.057	064	0.019	064	0.043	064	0.001	064	3.74	1498
23	0.025	23	0.014	23	<b>1.063</b>	23	0.144	23	0.017	23	1.98	1800
065	0.001	065	0.03	065	0.249	065	0.055	065	0.002	065	6.18	1580
066	0.034	066	0.01	066	<b>1.69</b>	066	0.122	066	0.019	066	2.92	1675
056	0.002	056	0.018	056	0.014	056	0.042	056	0.001	056	3.66	1360
057	0.001	057	0.046	057	0.019	057	0.05	057	0.001	057	5.25	1270
052	0.001	052	0.033	052	0.016	052	0.036	052	0.001	052	6.38	1117
054	0.019	054	0.009	054	0.114	054	0.036	054	0.002	054	3.48	1225
053	0.001	053	0.063	053	0.024	053	0.047	053	0.001	053	6.87	1222
13	0.001	13	0.025	13	0.039	13	0.006	13	0.001	13	10.9	1022
051	0.001	051	0.032	051	0.014	051	0.034	051	0.001	051	7.3	992
055	0.002	055	0.035	055	0.018	055	0.068	055	0.001	055	5.18	970
14	0.001	14	0.007	14	0.031	14	0.013	14	0.002	14	3.74	1375
15	0.002	15	0.032	15	<b>0.564</b>	15	<b>0.419</b>	15	0.009	15	1.59	2055
Bündner Rheintal												
3	0.001	3	0.039	3	0.099	3	0.026	3	0.005	3	6.34	1770
2	0.008	2	0.006	2	0.08	2	0.027	2	0.005	2	2.42	1250
071	0.001	071	0.013	071	0.009	071	0.056	071	0.001	071	3.48	1125
070	0.001	070	0.036	070	0.017	070	0.072	070	0.002	070	4.6	1122
069	0.001	069	0.024	069	0.007	069	0.053	069	0.001	069	4.23	875
067	0.001	067	0.056	067	0.013	067	0.078	067	0.001	067	5.95	630
068	0.001	068	0.054	068	0.007	068	0.071	068	0.001	068	7.46	610
076	0.001	076	0.113	076	0.012	076	0.046	076	0.001	076	5.58	523
072	0.001	072	0.116	072	0.009	072	0.074	072	0.001	072	9.48	525
1	0.001	1	0.154	1	0.01	1	0.015	1	0.001	1	7.15	540
073	0.001	073	0.092	073	0.006	073	0.062	073	0.001	073	8.67	540
074	0.002	074	0.081	074	0.014	074	0.1	074	0.001	074	12.1	595
075	0.001	075	0.063	075	0.014	075	0.086	075	0.001	075	2.74	545
Mediane												
Mes.	0.01		0.015		<b>0.631</b>		0.078		0.011		1.34	
Da.M.	0.002		0.031		0.174		0.0525		0.003		3.57	
Bü.R.	0.001		0.056		0.012		0.062		0.001		5.95	
VSBo-RW	1		0.7		0.5		0.2		0.03		25	

Fett Richtwertüberschreitung

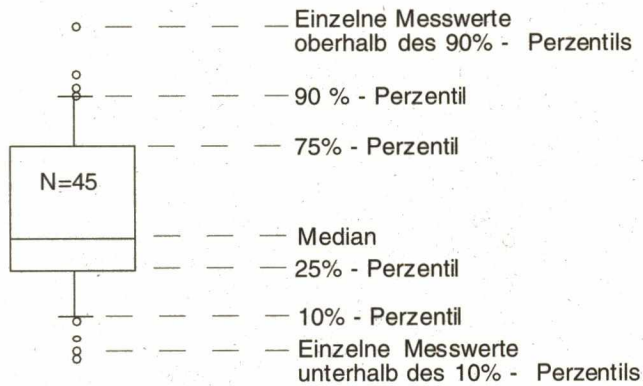
**Anhang 3: Abschätzung anthropogener Schwermetallanteile. Quotient von Ober- und Unterbodengehalten: Totalgehalte nach VSBo, oberste beprobte mineralische Horizonte (meist Ah) und unterste Horizonte (meist BC); Feinerdeproben einer Mischprobe.**

Stao	Pb	Rang	Stao	Zn	Rang	Stao	Cr	Rang	Stao	Ni	Rang	Stao	Co	Rang	Stao	Cd	Rang	Stao	Cu	Rang	Stao	Rangsumme
34	<b>11.2</b>	1	28	<b>3.53</b>	1	28	<b>2.86</b>	1	29	<b>1.97</b>	1	45	<b>2.08</b>	1	35	<u>7.57</u>	1	34	<b>2.73</b>	1	28	22
40	<b>7.97</b>	2	26	<b>3.01</b>	2	29	<b>2.03</b>	2	37	<b>1.61</b>	2	28	<b>1.70</b>	2	28	<b>6.50</b>	2	16	2.45	2	29	47
44	<b>7.80</b>	3	19	<b>2.99</b>	3	45	<b>1.73</b>	3	28	1.48	3	29	1.50	3	44	<u>5.46</u>	3	35	<u>2.08</u>	3	40	52
41	<b>7.10</b>	4	33	<b>2.58</b>	4	14	1.56	4	2	1.28	4	37	<b>1.50</b>	4	34	<u>5.41</u>	4	31	1.84	4	19	59
30	<b>5.82</b>	5	12	<b>2.51</b>	5	37	1.55	5	1	1.18	5	19	1.45	5	12	<b>5.27</b>	5	28	<b>1.74</b>	5	37	71
35	<b>4.86</b>	6	34	<u>2.33</u>	6	15	1.43	6	16	1.17	6	16	1.38	6	40	<u>4.31</u>	6	37	1.67	6	34	89
43	<b>4.64</b>	7	29	<b>2.29</b>	7	1	1.37	7	19	1.14	7	26	1.34	7	41	<u>3.42</u>	7	19	<b>1.60</b>	7	2	92
28	<b>3.69</b>	8	40	<u>2.08</u>	8	40	1.29	8	26	1.12	8	40	1.22	8	22	<b>2.98</b>	8	1	<b>1.55</b>	8	1	93
26	<b>3.57</b>	9	24	<b>2.06</b>	9	11	1.29	9	40	1.12	9	25	1.19	9	43	<u>2.87</u>	9	2	1.52	9	16	94
19	<b>3.14</b>	10	16	<b>1.98</b>	10	4	1.28	10	7	1.06	10	2	1.17	10	37	<b>2.78</b>	10	29	1.41	10	26	97
12	<b>2.97</b>	11	22	<b>1.94</b>	11	26	1.28	11	25	1.06	11	43	1.11	11	19	<b>2.72</b>	11	40	1.35	11	43	102
29	<b>2.92</b>	12	1	<b>1.88</b>	12	2	1.24	12	45	<u>1.04</u>	12	7	1.08	12	29	<b>2.70</b>	12	7	1.30	12	25	118
38	<b>2.42</b>	13	37	<b>1.81</b>	13	7	1.20	13	4	0.97	13	33	1.05	13	6	<u>2.02</u>	13	25	1.28	13	22	120
32	<b>2.34</b>	14	25	<b>1.80</b>	14	9	1.17	14	43	0.94	14	1	1.05	14	42	<b>1.95</b>	14	45	1.24	14	45	123
24	<b>2.13</b>	15	14	<u>1.77</u>	15	36	1.11	15	33	0.93	15	36	1.04	15	1	<b>1.83</b>	15	10	1.20	15	7	127
20	<b>2.13</b>	16	2	<b>1.71</b>	16	19	1.09	16	10	0.93	16	13	1.00	16	10	<b>1.82</b>	16	4	1.19	16	33	128
11	<b>2.12</b>	17	15	<u>1.69</u>	17	8	1.09	17	22	0.89	17	22	0.98	17	16	<b>1.78</b>	17	43	<u>1.18</u>	17	35	134
42	<b>2.12</b>	18	43	<u>1.63</u>	18	35	1.07	18	8	0.85	18	8	0.98	18	25	<b>1.78</b>	18	33	1.15	18	10	146
17	<b>2.10</b>	19	4	<b>1.58</b>	19	27	1.06	19	34	0.83	19	38	0.98	19	7	<b>1.71</b>	19	17	0.87	19	44	147
2	<b>2.04</b>	20	10	<b>1.58</b>	20	10	1.04	20	35	0.82	20	15	<u>0.97</u>	20	33	<b>1.65</b>	20	26	0.82	20	36	157
36	<b>2.00</b>	21	27	1.44	21	3	1.02	21	42	0.82	21	27	0.97	21	2	<b>1.56</b>	21	22	0.75	21	4	158
22	<b>1.99</b>	22	36	<u>1.39</u>	22	33	1.01	22	17	<u>0.78</u>	22	17	0.96	22	27	<b>1.53</b>	22	24	0.74	22	24	162
15	<b>1.86</b>	23	7	1.37	23	16	0.99	23	44	0.71	23	3	0.96	23	32	1.50	23	44	0.74	23	15	163
18	<b>1.85</b>	24	8	1.29	24	22	0.99	24	31	0.70	24	10	0.96	24	21	<u>1.42</u>	24	14	<u>0.66</u>	24	14	167
25	<b>1.82</b>	25	6	<u>1.29</u>	25	32	0.98	25	32	0.70	25	32	0.83	25	31	1.33	25	21	0.65	25	17	169
9	<b>1.78</b>	26	31	1.23	26	43	0.98	26	14	<u>0.66</u>	26	34	0.83	26	36	<u>1.26</u>	26	3	0.65	26	12	170
45	1.72	27	3	1.18	27	39	0.93	27	36	<u>0.66</u>	27	4	0.82	27	24	1.21	27	38	<u>0.64</u>	27	32	171
21	<b>1.55</b>	28	17	1.13	28	25	0.90	28	15	<u>0.61</u>	28	31	0.79	28	17	1.14	28	8	0.60	28	8	178
39	<b>1.55</b>	29	30	<u>1.10</u>	29	24	0.83	29	3	0.60	29	24	0.77	29	8	1.08	29	32	0.56	29	42	185
16	<b>1.54</b>	30	32	1.05	30	44	0.82	30	13	0.52	30	42	0.73	30	11	<u>1.08</u>	30	6	0.55	30	31	187
37	<b>1.53</b>	31	45	<u>0.99</u>	31	17	0.79	31	24	0.51	31	14	<u>0.69</u>	31	4	1.07	31	36	0.53	31	41	189
1	1.49	32	41	<u>0.99</u>	32	34	0.78	32	11	<u>0.51</u>	32	44	0.60	32	9	<u>1.03</u>	32	39	<u>0.52</u>	32	3	200
14	<b>1.43</b>	33	44	<u>0.98</u>	33	42	0.75	33	41	<u>0.50</u>	33	9	0.53	33	30	<u>1.02</u>	33	15	0.49	33	11	200
6	1.39	34	9	<u>0.92</u>	34	6	0.74	34	12	0.45	34	30	0.50	34	14	<u>1.00</u>	34	42	0.45	34	27	200
10	1.37	35	42	<u>0.90</u>	35	12	0.73	35	9	0.44	35	11	0.48	35	45	<u>0.94</u>	35	23	<u>0.45</u>	35	30	212
33	<b>1.36</b>	36	23	<u>0.84</u>	36	30	0.70	36	39	0.39	36	18	0.41	36	15	<u>0.92</u>	36	41	0.45	36	9	215
3	1.32	37	11	<u>0.84</u>	37	13	0.69	37	30	0.37	37	41	0.39	37	3	0.90	37	18	0.43	37	6	218
7	1.29	38	21	<u>0.82</u>	38	5	0.67	38	6	<u>0.36</u>	38	12	0.35	38	20	<u>0.75</u>	38	30	0.40	38	38	220
27	1.26	39	38	<u>0.78</u>	39	31	0.64	39	27	<u>0.32</u>	39	21	0.28	39	38	<u>0.71</u>	39	27	0.38	39	21	240
13	1.23	40	39	<u>0.64</u>	40	41	0.63	40	5	<u>0.31</u>	40	39	0.26	40	26	0.66	40	11	0.37	40	39	245
31	1.18	41	18	<u>0.61</u>	41	18	0.57	41	38	0.24	41	35	0.26	41	39	<u>0.63</u>	41	9	0.32	41	13	256
4	1.16	42	20	<u>0.59</u>	42	38	0.56	42	18	0.21	42	5	0.25	42	5	<u>0.48</u>	42	12	0.32	42	18	264
23	0.99	43	5	<u>0.44</u>	43	21	0.49	43	21	0.20	43	23	0.22	43	18	<u>0.43</u>	43	5	<u>0.28</u>	43	20	275
8	0.88	44	13	0.41	44	23	0.46	44	23	<u>0.19</u>	44	6	0.14	44	13	0.24	44	20	<u>0.28</u>	44	23	290
5	0.66	45	35	<u>0.36</u>	45	20	0.13	45	20	<u>0.07</u>	45	20	0.11	45	23	<u>0.24</u>	45	13	0.24	45	5	293
Median	1.86			1.37			0.99			0.71			0.96			1.50			0.74			

Standortnummer fett und linksbündig = Gefährdungspotential gross  
 Wert fett und gross = Standorte mit deutlichen anthropogenen Schwermetallanteilen  
 Wert fett = Standorte mit geringer bis mässiger anthropogener Schwermetallanteilen  
 Wert kursiv und unterstrichen = VSBo-Beprobung 0-20 cm ist aufgrund der Schwermetallprofile bzw. der löslichen Gehalte und Anteile kaum geeignet, die anthropogene Schwermetallbelastung anzuzeigen

**Anhang 4: Lesehilfe zu den Boxplots**

Box-Plot-Darstellungen ermöglichen optisch prägnante Vergleiche von Datenverteilungen mit dem Ziel Unterschiede zwischen den Datenverteilungen zu erkennen. Neben dem Median werden Einzelwerte oberhalb des 90 %- und unterhalb des 10 %-Perzentils dargestellt. Zwischen dem 90 %- und dem 10 %-Perzentil liegen 80 % und innerhalb der 75 %- und 25 %-Perzentile 50 % der Werte.  $N = 45$  (in diesem Beispiel) entspricht der Anzahl Messwerte.



**Anhang 5:** Totale und lösliche Cadmiumgehalte sowie *relative lösliche Cadmiumgehalte* und *Relative Bindungsstärken* (Einschätzung nach DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 1988) der Oberböden der Regionalen Dauerbeobachtungsstandorte (R-DBS) gegenüber Cadmium (Cd).

Totalgehalte		Lösliche Gehalte		Relative lösliche Gehalte <sup>1</sup>		Relative Bindungsstärke <sup>2</sup>	
StaO <sup>3</sup>	Cd [mg/kg]	StaO	Cd [mg/kg]	StaO	%	StaO	FSM
1	0.253	1	0.001	1	0.4	1	5.0
2	0.352	2	0.002	2	0.6	2	5.0
3	0.378	3	0.003	3	0.8	3	3.5
4	0.224	4	0.001	4	0.4	4	5.0
5	0.059	5	0.009	5	15.3	5	1.1
6	0.222	6	0.009	6	4.1	6	3.2
7	0.587	7	0.001	7	0.2	7	5.0
8	0.244	8	0.003	8	1.2	8	3.8
9	0.384	9	0.012	9	3.1	9	2.9
10	0.427	10	0.001	10	0.2	10	5.0
11	0.226	11	0.009	11	4.0	11	3.5
12	1.164	12	0.001	12	0.0	12	5.2
13	0.332	13	0.001	13	0.3	13	5.0
14	0.121	14	0.014	14	11.6	14	1.0
15	0.398	15	0.013	15	3.3	15	2.5
16	0.470	16	0.003	16	0.6	16	4.0
17	0.372	17	0.003	17	0.8	17	4.6
18	0.256	18	0.016	18	6.3	18	2.9
19	0.444	19	0.002	19	0.5	19	5.0
20	0.205	20	0.021	20	10.2	20	2.6
21	0.389	21	0.017	21	4.4	21	3.0
22	0.271	22	0.007	22	2.6	22	3.6
23	0.122	23	0.017	23	13.9	23	1.3
24	0.311	24	0.003	24	1.0	24	3.8
25	0.240	25	0.002	25	0.8	25	5.0
26	0.063	26	0.004	26	6.3	26	2.8
27	0.299	27	0.005	27	1.7	27	3.6
28	0.221	28	0.001	28	0.5	28	4.0
29	0.451	29	0.002	29	0.4	29	5.0
30	0.227	30	0.010	30	4.4	30	2.5
31	0.271	31	0.001	31	0.4	31	4.9
32	0.144	32	0.002	32	1.4	32	4.4
33	0.201	33	0.001	33	0.5	33	3.9
34	0.249	34	0.005	34	2.0	34	3.3
35	0.106	35	0.031	35	29.2	35	1.1
36	0.192	36	0.008	36	4.2	36	2.7
37	0.729	37	0.006	37	0.8	37	4.4
38	0.109	38	0.025	38	22.9	38	1.5
39	0.101	39	0.012	39	11.9	39	1.9
40	0.250	40	0.011	40	4.4	40	2.9
41	0.250	41	0.057	41	22.8	41	1.4
42	0.199	42	0.018	42	9.0	42	2.2
43	0.273	43	0.023	43	8.4	43	2.2
44	0.322	44	0.042	44	13.0	44	2.0
45	0.390	45	0.037	45	9.5	45	2.6

<sup>1</sup>Quotient aus den löslichen Gehalten zu den Totalgehalten

<sup>2</sup>Relative Bindungsstärke, FSM, der Oberböden gegenüber Cd: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel,

<sup>3</sup>StaO = Standort

4 = stark, 5 = sehr stark