



Kantonale
Bodenbeobachtung
(KABO) St.Gallen
Auswertung
der Erstbeprobung

Fachbericht



Baudepartement des Kantons St.Gallen

Amt für Umweltschutz

Kantonale Bodenbeobachtung (KABO) St.Gallen
Auswertung der Erstbeprobung

Fachbericht

Amt für Umweltschutz des Kantons St.Gallen
Fachstelle Bodenschutz

Projektbearbeitung:
Jürg Holenstein
Monika Schenk
Hermann Wismer

Projektbericht:
Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, 8034 Zürich

Analytik:
UFAG Laboratorien, 6210 Sursee

August 1995

Inhaltsverzeichnis

Für die eilige Leserschaft

| | |
|--|----|
| Ausgangslage | 1 |
| Böden als Naturkörper | 1 |
| Was sind Böden und welche Funktionen erfüllen sie? | 1 |
| Wie lassen sich Böden voneinander unterscheiden? | 2 |
| Die Entstehung von Böden | 3 |
| Warum gibt es verschiedene Böden? | 4 |
| Zivilisatorische Einwirkungen auf Böden | 6 |
| Die Rechte der Böden - Wie werden Böden geschützt? | 6 |
| Instrument im Bodenschutz - Kantonale Bodenbeobachtung | 8 |
| Ziele und Aufgaben der Bodenbeobachtung im Kanton St. Gallen | 8 |
| Vorgehen und Methoden | 8 |
| Kantonale Bodenbeobachtung - Ergebnisse der Ersterhebung | 11 |
| Schadstoffgehalte und Bodenbelastung nach VSBo | 12 |
| Geogene und anthropogene Schwermetallanteile | 14 |
| Ursachen der Schwermetallbelastung - Differenzierung der Standorte nach Einwirkungen | 16 |
| Schwermetalle werden mobil... | 20 |
| Wann Schwermetalle zur Belastung werden - Risikoabschätzung | 21 |
| Folgen der Bodenversauerung | 25 |
| Zusammenfassung und Empfehlungen für das weitere Vorgehen | 28 |
| Literaturverzeichnis | 32 |
| Abbildungsverzeichnis | 33 |
| Tabellenverzeichnis | 33 |

Für die eilige Leserschaft

Im Sinne eines präventiven Umweltschutzes und basierend auf das Umweltschutzgesetz wurde in den Jahren 1989 bis 1991 das Kantonale Bodenbeobachtungsnetz (KABO) im Kanton St. Gallen aufgebaut. Dieses hat zum Ziel, den Bodenzustand und relevante Einwirkungen - insbesondere Schwermetalle und Säuren - zu erfassen, mögliche schädliche Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und durch Gegenmassnahmen bereits im Ansatz zu verhindern. Das KABO besteht aus 17 Grünland- und 8 Waldstandorten, welche im gesamten Kantonsgebiet verteilt sind und unterschiedliche ökologische Verhältnisse bzw. zu vermutende Belastungen berücksichtigen. Beprobte wurde pro Standort eine Fläche von 100 m² und anschliessend relevante Bodenkenngrossen sowie Schadstoffgehalte analytisch bestimmt.

Der vorliegende Fachbericht fasst die wesentlichen Resultate der Erstbeprobung der KABO-Standorte zusammen. Im Vordergrund steht die Belastung der Böden mit Schwermetallen. Weitergehende Auswertungen wurden in einem separaten Bericht (Expertenbericht) zusammengestellt.

Generell ist davon auszugehen, dass die Böden im Kanton flächendeckend von Schwermetalleinträgen betroffen sind. So sind anhand der Schwermetalltotalgehalte auf 2/3 der Standorte deutliche Schwermetallanreicherungen in den Oberböden nachweisbar. Die Schwermetalle Cadmium, Kupfer, Zink und Chrom werden verstärkt über die Landbewirtschaftung eingetragen. Blei, Quecksilber, Cadmium, Kupfer und Zink gelangen zudem über Luftverunreinigungen in die Böden. So weisen siedlungsnahe und exponierte Standorte deutlich höhere Schwermetallgehalte auf. Für die relativ immobilen Schwermetalle Blei und Quecksilber sind Anreicherungen auch auf siedlungsfernen und bereits stark versauerten Standorten nachweisbar. Richtwertüberschreitungen für die Totalgehalte liessen sich an einem Standort feststellen. Dieser Standort ist im Sinne der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBö) belastet.

Das Belastungsrisiko, d.h. die Gefahr der biologischen Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden oder über eine Auswaschung ins Grundwasser, wird allerdings weniger durch die Totalgehalte als vielmehr durch die löslichen Gehalte bestimmt. Hier zeigt sich, dass vor allem die überwiegend sauren und stark sauren Waldstandorte bei unauffälligen Totalgehalten hohe lösliche Gehalte aufweisen und somit ein Belastungsrisiko darstellen. Richtwertüberschreitungen für die löslichen Gehalte waren an 9 Standorten (36 %) feststellbar. Auf diesen Standorten werden die Schwermetalle aus den Oberböden in die Unterböden und teilweise in tiefer liegende Schichten (Gefahr der Grundwasserbelastung) verlagert. Schädliche Auswirkungen auf Organismen sind nicht auszuschliessen.

Die Bodenversauerung bewirkt neben einer zunehmenden Mobilisierung von Schwermetallen auch eine Freisetzung von Aluminium und eine Auswaschung von Nährstoffen sowie eine irreversible Zerstörung von Silikaten und Tonmineralen. Die Böden verarmen.

Aufgrund dieser Untersuchung sind vor allem saure Waldstandorte und Standorte, welche deutliche Schwermetallanreicherungen aufweisen und bezüglich ihrer Filtereigenschaften sensibel auf Änderungen reagieren, als Problemstandorte einzustufen.

Ausgangslage

Im Verlaufe der Jahrtausende hat sich der Mensch in der Ökosphäre vom physiologisch unbedeutenden Konsumenten zum geochemischen Manipulator entwickelt und die Eingriffe in die Energie- und Materieflüsse zum Aufbau seiner Zivilisation(en) genutzt. Insbesondere 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 Energie- und Materieflüssen gekommen, mit der Folge einer ständig zunehmenden (Schadstoff-) Belastung der Umwelt. Die daraus resultierende Sorge um die langfristige Erhaltung der ökologischen Existenzgrundlagen unserer Gesellschaft ist Motiv einer intensiver werdenden Umweltbeobachtung.

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 St. Gallen von 1988 wurde als Grundlage für die Beurteilung von besonderen Problemflächen die Einrichtung von Dauerbeobachtungsstandorten als vordringlich bezeichnet und zwischen 1988 und 1991 umgehend eine Erstbeobachtung von 25 Standorten realisiert. Der vorliegende Kurzbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse der Kantonalen Bodenbeobachtung (KABO) zusammen.

Böden als Naturkörper

Was sind Böden und welche Funktionen erfüllen sie?

Böden sind Naturkörper und bilden als solche die Grundlage für das Leben von Mensch, Tier und Pflanze. Nach einer weit verbreiteten Definition wird der Boden (oder die Pedosphäre) von jenem schmalen Grenzbereich gebildet, in dem sich die Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre überlagern:

"Der Boden stellt das mit Wasser, Luft und Lebewesen durchsetzte, unter dem Einfluss der Umweltfaktoren entstandene Umwandlungsprodukt mineralischer und organischer Substanzen dar, welches in der Lage ist, höheren Pflanzen als Standort zu dienen." (nach Gisi et al., 1990)

Beurteilt man Böden danach, welche Rolle sie im Naturhaushalt spielen, dann müssen folgende wichtige Funktionen herausgestellt werden:

- Die Regelungsfunktion: Böden regeln die natürlichen Kreisläufe des Wassers, der Luft, der organischen und mineralischen Stoffe; sie filtern, reinigen, puffern, bauen ab und lagern.
- Die Lebensraumfunktion: Der Boden ist Lebensgrundlage und Lebensraum für Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und Menschen.
- Die Produktionsfunktion: Der Boden ist Grundlage für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung. Böden liefern Rohstoffe (Lehm, Kies, Erze usw.) und dienen als Standorte für Gebäude und Anlagen aller Art.
- Die kulturelle Funktion: Böden bilden ein kulturhistorisches Archiv der Landschafts- und Kulturgeschichte.

Die einzelnen Funktionen können miteinander konkurrieren, sich gegenseitig ausschliessen oder überlagern. So kann eine Fläche nicht gleichzeitig mit landwirtschaftlichen Kulturen und Gebäuden bebaut werden; eine versiegelte Fläche kann nicht mehr der Grundwasserneubildung dienen. Eine forstwirtschaftlich genutzte Fläche kann aber zugleich Standort für natürliche Vegetation und Erholungsgebiet für den Menschen sein.

Wie lassen sich Böden voneinander unterscheiden?

Bisweilen bieten sich auch für Nichtbodenkundler Gelegenheiten, die ansonsten unter der Bodenoberfläche versteckt bleibenden Böden zu betrachten. Bau- und Kiesgruben sowie Anschnitte im Strassen- und Leitungsbau eröffnen einen Blick in die Tiefe und damit auf die dritte Dimension von Böden. Ohne grössere Hilfsmittel lassen sich Merkmale wie z.B. Farbe und Farbverteilung, Steingehalt, Risse und Regenwurmgänge sowie die Wurzelverteilung erkennen. Nimmt man Bodenmaterial zwischen die Finger, so lassen sich Gemische der primären Bodenteilchen feststellen. Deren **Korngrösse** nimmt vom **Sand** über den **Schluff** oder Silt zum **Ton** ab. Gemische unterschiedlicher Korngrössen kennzeichnen eine wichtige Materialkonstante von Böden, nämlich die **Bodenart** wie z.B. den Lehm, mit etwa gleichen Anteilen an Sand, Schluff und Ton. In Abhängigkeit von den Tongehalten zeigen Böden die Eigenschaft, durch Austrocknung zu schrumpfen und durch erneute Wasseraufnahme nach Regenfällen wieder zu quellen. Durch Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge sowie besonders auch durch die Regenwurmtätigkeit entsteht ein gut erkennbares **Bodengefüge** aus unterschiedlich grossen sekundären Bodenstücken, die **Aggregate** genannt und nach Form und Grösse unterschieden werden.

Bei der manuellen Prüfung von Bodenmaterial aus unterschiedlichen Tiefen lassen sich ferner unterschiedliche Feuchtigkeitszustände feststellen.

Die Kombination typischer, wiederkehrender Merkmale in einem bestimmten Tiefenabschnitt kennzeichnet einen **Bodenhorizont**. Die Abfolge verschiedener Bodenhorizonte von der Oberfläche bis zum unverwitterten Gestein wird als **Bodenprofil** bezeichnet. Die charakteristischen Horizonte eines Bodenprofils bestimmen schliesslich den **Bodentyp**, also den Namen des jeweiligen Bodens mit bestimmten charakteristischen Eigenschaften.

Eine Bewertung des Bodens erfolgt auf der Grundlage seiner Eigenschaften. Mit Hilfe einer einfachen feldbodenkundlichen Aufnahme der wesentlichen Merkmale eines Bodens ist in der Regel eine qualitative, standortökologische Beurteilung möglich. Im Hinblick auf die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort wird die mögliche Ausbreitung der Pflanzenwurzeln, auch **Bodengründigkeit** oder Durchwurzelbarkeit genannt, der **Wasser-** und **Lufthaushalt** sowie der **Nährstoffhaushalt** bewertet.

Die Entstehung von Böden

Mit Ausnahme der Moorböden entstehen Böden entweder aus festen oder lockeren Gesteinen wie z.B. Granit, Basalt, Kalkstein, Sandstein, Nagelfluh, Molasse, Moräne oder Flussablagerungen (Alluvien). Trotz ihrer Komplexität kann die Entstehung von Böden auf vier grundlegende **Bodenbildungsprozesse** zurückgeführt werden, welche miteinander ablaufen und sich gegenseitig beeinflussen:

- **Verwitterung** (physikalisch, chemisch)
- **Humusbildung**
- **Verlagerung**
- **Gefügebildung**

Das Ausgangsgestein der Bodenbildung wird chemisch und physikalisch, aber auch biologisch zerkleinert, abgebaut, gelöst und umgewandelt. Es verwittert. So freigesetzte Ionen und Verbindungen dienen den Pflanzen als Nährstoffe bzw. werden im Boden zu neuen Mineralen umgewandelt. Abgestorbene Lebewesen (Tiere und Pflanzen) dienen Bodentieren, Pilzen und Mikroorganismen als Nahrungsquelle. Die organische Substanz wird zersetzt, ab- und umgebaut und ein Teil schliesslich dem Boden als Humus einverleibt. Ein Teil der Verwitterungsprodukte wird ständig mit dem Sickerwasser fortgeführt. Der Boden verändert sich sowohl in seinen chemischen als auch physikalischen Eigenschaften. Durch Schrumpfungs- und Quellungsprozesse kommt es zur Aggregation einzelner Körner, welche durch Kittstoffe miteinander verbunden werden. Es bildet sich ein bodeneigenes Gefüge.

Wasser stellt das wichtigste Lösungsmittel in Böden dar. Da Böden unseres Klimas in der Regel eine abwärtsgerichtete Wasserbewegung aufweisen, vollzieht sich die Bodenentwicklung von oben nach unten und zeigt sich morphologisch in der Ausprägung unterschiedlicher Bodenhorizonte.

Jeder Boden entwickelt so ein ihm eigenes Porensystem, welches den Boden durchzieht und den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt bestimmt. Grobporen führen überschüssiges Wasser ab und dienen der Sauerstoff-Zufuhr und der Kohlendioxid-Wegfuhr. Mittelporen vermögen Wasser und gelöste Stoffe durch Kapillar- und Absorptionsprozesse zu binden und sind daher von grosser Bedeutung für eine ausgewogene Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen. Tonmineralien, Tonhumuskomplexe und Humusstoffe vermögen Pflanzennährstoffe, aber auch Schadstoffe und Säuren (Protonen) mehr oder weniger stark zu binden bzw. zu neutralisieren. Böden wirken so als **Nährstoffspeicher**, **Puffer** und **Filter**.

Bodenkundler nennen den in Abbildung 1 schematisch abgebildeten Boden **Parabraunerde**. Er ist in der Schweiz typischerweise im Laufe der letzten ca. 10'000 Jahren aus Gesteinsablagerungen der Würmeiszeit entstanden. Diese Parabraunerde ist als ein tiefgründiger, gut

durchwurzelbarer Boden mit guter Nährstoffversorgung einzustufen. Der durchwurzelbare Raum bzw. das Wasserspeichervermögen wird durch den mit der Tiefe zunehmenden Steinanteil reduziert und ist als mässig bis gut zu bezeichnen.

Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Bodenprofils

| Horizont | | Profilskizze | Horizontbeschreibung (Merkmalskombinationen) |
|----------|-------------|---|---|
| Tiefe | Bezeichnung | | |
| +2 | 01 o | <p>Die Profilskizze zeigt ein Bodenprofil mit einer vertikalen Achse für die Tiefe in cm (von +2 bis 180). Die Horizontbezeichnungen sind: 01 o (Streu), Ah (Oberster humushaltiger Mineralerdehorizont), (A)E (Auswaschungs- oder Eluvialhorizont), It (Anreicherungs- oder Illuvialhorizont), Bv (Verwitterungshorizont) und (B)Ck (Mineralischer Untergrundhorizont). Die Skizze zeigt die typischen Merkmale dieser Horizonte wie Streu, Humus, Tonangereicherte Horizonte und Verwitterungsstrukturen.</p> | Streuhorizont: lose gerollte, meist frisch gefallene Streu |
| | Ah | | Oberster humushaltiger Mineralerdehorizont: dunkelbrauner Humushorizont, kalkfrei, stark durchwurzelt, innige Vermischung der organischen Substanz mit der Mineralerde |
| 17 | (A)E | | Auswaschungs- oder Eluvialhorizont: ockerbraun, sandiger Lehm, kalkfrei, stark verwittert, feinpolyedrisch, gut durchwurzelt, schwach humos |
| 35 | It | | Anreicherungs- oder Illuvialhorizont: durch Einwaschung mit Ton angereichert, dunkel-ockerbraun, Lehm bis toniger Lehm, kalkfrei, mittel verwittert, mittelpolyedrisch, schwach durchwurzelt |
| 90 | Bv | | Verwitterungshorizont: ockerbraun, steinreich, z.T. kalkhaltig, mittelpolyedrisch bis unstrukturiert, kaum durchwurzelt |
| 115 | (B)Ck | Mineralischer Untergrundhorizont mit beginnender Verwitterung: grau-ockerbraun, steinreich, kalkhaltig, schwach angewittert, unstrukturiert, nicht durchwurzelt | |

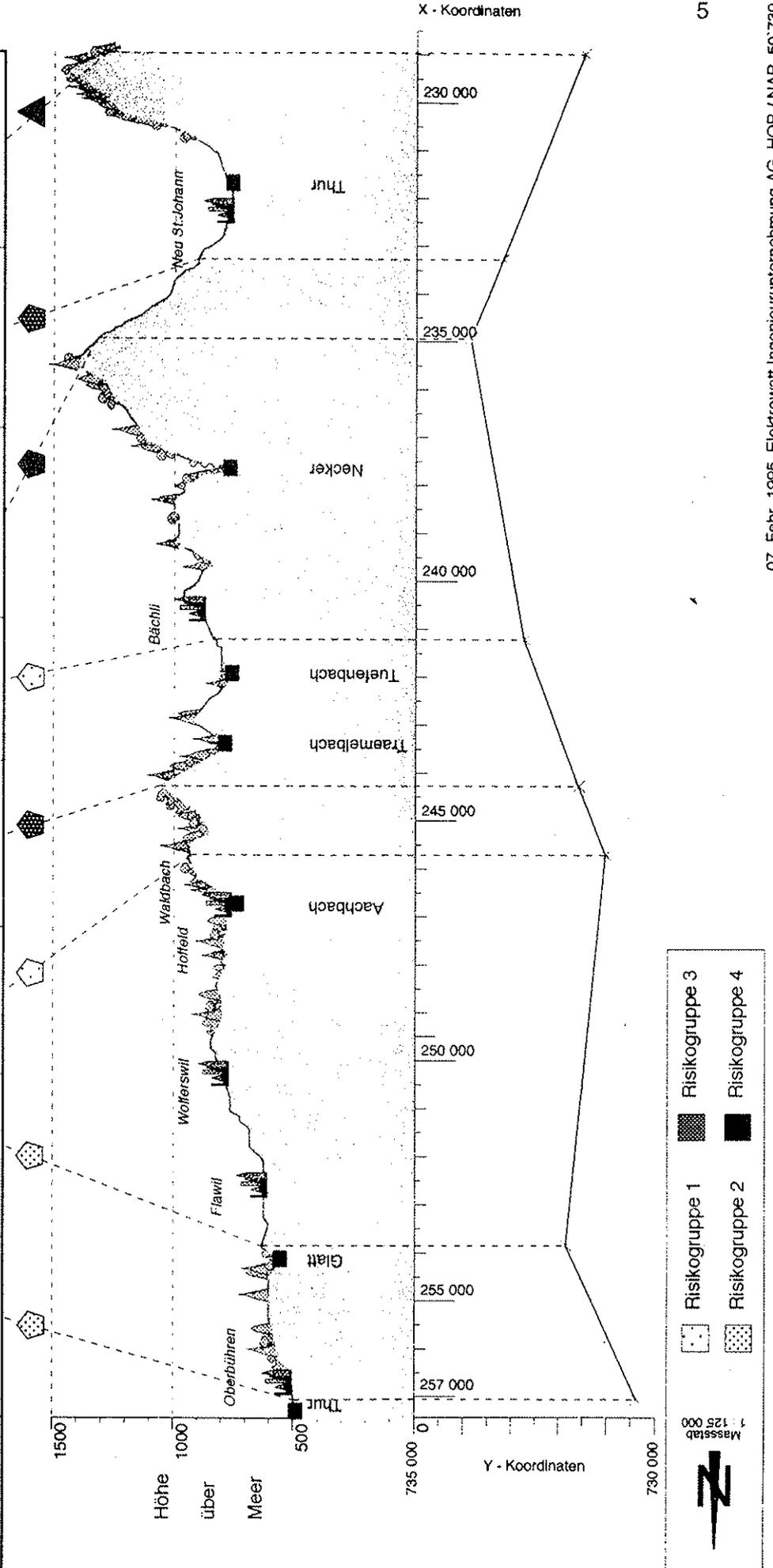
Warum gibt es verschiedene Böden?

Die Bodenbildung ist abhängig von den genannten **Bodenbildungsfaktoren**: Ausgangsgestein, Klima, Relief, Lebewesen (Vegetation, Tiere und Menschen) und dem Zeitraum der Bodenbildung. Diese Faktoren stehen in wechselseitiger Beziehung zueinander und bestimmen den Bodentyp und die Ausprägung seiner Merkmale an einem bestimmten Ort. Je nach Wirkung der Faktoren der Bodenbildung sind so ganz unterschiedliche Böden entstanden. Entsprechend vielfältig ist die Bildung und die Ausprägung unterschiedlicher Bodentypen in einer Region. Sind die Eingriffe durch den Menschen in eine Landschaft noch gering, so spiegelt sich die Verteilung unterschiedlicher Böden meist in erkennbaren Unterschieden des oberirdischen Bewuchses wider.

Der nachfolgende, in Nord-Süd-Richtung verlaufende Querschnitt durch den Kanton charakterisiert einige Untersuchungsstandorte der kantonalen Bodenbeobachtung (Abb. 2).

Abb. 2: Einige Bodentypen im KABO St. Gallen. Fünffach überhöhter Gelände-Querschnitt durch den Kanton in Nord-Süd-Richtung.

| Standort / Nr. | Sommerswis / 15 | Riedern / 14 | Hals / 8 | Wilket / 2 | Wies / 94 | Alp Gössigen / 10 | Windegg / 11 | Heurmoos / 4 |
|--------------------|-------------------------|-----------------|------------|---------------------|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------|
| Nutzung | Wiese | Wiese | Wiese | Wiese | Wiese | Wiese | Wiese | Wald |
| Höhe ü. M. | 495 m | 630 m | 930 m | 1060 m | 800 m | 1320 m | 900 m | 1280 m |
| Geländeform | Terrasse 0% | Hang 3-15% SW | Hang 30% N | Hang 60% S | Hang 15% N | Flachhang 30% S | Flachhang 15% SE | Hang 60% S |
| Geologie | Niederterrassenschotter | Würmmoräne | Nagelfluh | Nagelfluh-Kolluvium | Würmmoräne | Nagelfluh | Nagelfluh / Hangschutt | Gehängelehm über Nagelfluh |
| Bodentyp | Kalkbraunerde | saure Braunerde | Regosol | Braunerde | Braunerde-Gley | saure Braunerde | saure Braunerde | saure Braunerde |



Zivilisatorische Einwirkungen auf Böden

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.

Formen der Bodenschädigung mit Beispielen für mögliche verursachende Belastungen (nach Schulin, 1994)

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

Die Rechte der Böden - Wie werden Böden geschützt?

Böden sind vielfältigen zivilisatorischen Einwirkungen und Nutzungskonflikten ausgesetzt, welche quantitative und qualitative Bodenbeeinträchtigungen bewirken. Über eine ethische Verpflichtung hinaus besteht daher eine sachliche Notwendigkeit, Böden zu schützen.

Vorschriften zur Begrenzung quantitativer Bodenbeeinträchtigungen (Bodenverluste durch Überbauung, Erosion) sind auf Bundesebene im Raumplanungsgesetz vom 22. Juni 1979 sowie im Gesetz über Bewirtschaftungsbeiträge an die Landwirtschaft mit erschwerten Produktionsbedingungen vom 14. Dezember 1979 enthalten.

Der qualitative Bodenschutz wurde auf gesetzlicher Ebene im Umweltschutzgesetz (USG) von 1985 verankert und in der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo) konkretisiert. Ziel der Bodenschutzvorschriften des USG bildet die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, welche wie folgt definiert wird:

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.

Diese Umschreibung der Bodenfruchtbarkeit entspricht einer ganzheitlichen Betrachtungsweise, die einen breiten Ermessensspielraum lässt. Weiterhin regelt die VSBo die Überwachung und Beurteilung der Belastung des Bodens mit Schadstoffen. Als Schadstoffe werden natürliche oder künstliche Stoffe bezeichnet, welche die Fruchtbarkeit des Bodens beeinträchtigen können. Explizit wurden Richtwerte für zehn Schwermetalle und Fluor festgelegt. Darüberhinaus stellt die VSBo die gesetzliche Grundlage für die Untersuchung von Böden zur Beobachtung von Belastungen durch Schadstoffe dar.

Unter dem Begriff Bodenschutz werden alle direkten und indirekten Massnahmen zusammengefasst, welche die Funktionen des Bodens in ihrer Gesamtheit und in ausgewogenem Verhältnis auf lange Frist nachhaltig bewahren helfen (Prinzip der haushälterischen Bodennutzung). Direkte Massnahmen sind auf einen sinnvoll begrenzten Landverbrauch sowie auf Massnahmen am Boden selbst - z.B. bodenschonende Landbewirtschaftung - ausgerichtet. Indirekte Massnahmen sollen Böden vor qualitätsmindernden Einflüssen von aussen bewahren. Dazu gehören stoffliche Bodenschutzmassnahmen, welche eine Begrenzung der Schadstofffrachten bewirken sollen. Als Instrumente sind hier die Luftreinhalteverordnung (LRV), die Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (StoV) und die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) zu nennen.

Die gesellschaftlichen Regeln und Rechtsnormen für einen haushälterischen Umgang mit dem Boden werden sich mit zunehmendem Problembewusstsein weiterentwickeln. Insofern ist jeder einzelne in der Lage, (in)direkt den Boden zu schützen.

Instrument im Bodenschutz - Kantonale Bodenbeobachtung

Böden unterscheiden sich im Vergleich zu den Umweltmedien Wasser und Luft vor allem durch eine wesentlich grössere Komplexität, Diversität und Trägheit. Bodenveränderungen vollziehen sich meist schleichend, können aber zu relativ plötzlichen Kippeffekten führen, deren Konsequenzen praktisch irreversibel oder nur mit sehr grossem Aufwand rückgängig zu machen sind. Schädliche Entwicklungen, die zu Gefahrenpotentialen und Risiken führen, sollten daher im Sinne eines präventiven Umweltschutzes frühzeitig erkannt und durch Gegenmassnahmen nach Möglichkeit bereits im Ansatz verhindert werden. Kantonale und nationale Bodenbeobachtungsnetze sollen die hierfür notwendigen Datengrundlagen liefern. Sie erfüllen damit die Funktion eines Frühwarnsystems und dienen als Referenzflächen.

Ziele und Aufgaben der Bodenbeobachtung im Kanton St. Gallen

Die Ziele der langfristigen Bodenbeobachtung für den Kanton St. Gallen sind im Bodenschutzkonzept von 1988 umrissen. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erfassen von Einwirkungen stofflicher Belastungen - insbesondere Schwermetalle und Säuren - bzw. daraus resultierender Veränderungen (Stoffgehalte und Prozesse) in Böden im Sinne eines Frühwarnsystems.
- Erfassen von Einwirkungen auf Böden aufgrund der Nutzung, Nutzungsintensität, Schadstoffexposition, Siedlungsnähe und standortökologischen Verhältnisse.
- Beschreibung des allgemeinen Bodenzustandes.
- Beurteilung der ökologischen Funktionsfähigkeit.
- Dauerbeobachtungsflächen dienen als Referenzstandorte. Sie bilden damit eine Vergleichsgrundlage für die Beurteilung belasteter oder auch unbelasteter Standorte und dienen allenfalls der Begründung weiterer Massnahmen im Bodenschutz.

Vorgehen und Methoden

Das kantonale Bodenbeobachtungsnetz umfasst gegenwärtig 25 im gesamten Kantonsgebiet verteilte Standorte. Davon werden 17 Standorte landwirtschaftlich als Grünland und 8 Standorte als Wald genutzt. Sie repräsentieren somit die wichtigsten Nutzungsformen im Kanton. Die gezielte Auswahl der Standorte sollte weiterhin unterschiedliche ökologische Verhältnisse (Höhe ü.M., Bodentyp, Landschaftselement) sowie zu vermutende unterschiedliche Belastungen aufgrund der Nutzungsintensität, Schadstoffexposition und Entfernung zu Siedlungen berücksichtigen (Abb. 3).

Die Beprobung der Standorte erfolgte zwischen 1989 und 1991. Dafür wurde auf jedem Standort eine Beobachtungsfläche (10 mal 10 m) eingemessenen und eine Bodenprofilgrube

geöffnet. Von den Beobachtungsflächen wurden Oberbodenmischproben (0 - 20 cm) entnommen. Die Profilgruben dienen der feldbodenkundlichen Aufnahme der Bodenprofile sowie der horizontbezogenen Entnahme von Mischproben. Anschliessend gelangten die Proben zur Aufbereitung und Analyse ins Labor. Eine Übersicht der analytisch bestimmten Schadstoffgehalte und Bodenkenngrossen ist der untenstehenden Abbildung (Abb. 4) 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. Bodenkenngrossen beschreiben den allgemeinen Bodenzustand und erlauben Rückschlüsse auf Einwirkungen und Bodenfunktionen. Im besonderen dienen sie der Interpretation der gemessenen Schadstoffgehalte im Hinblick auf mögliche Belastungsrisiken.

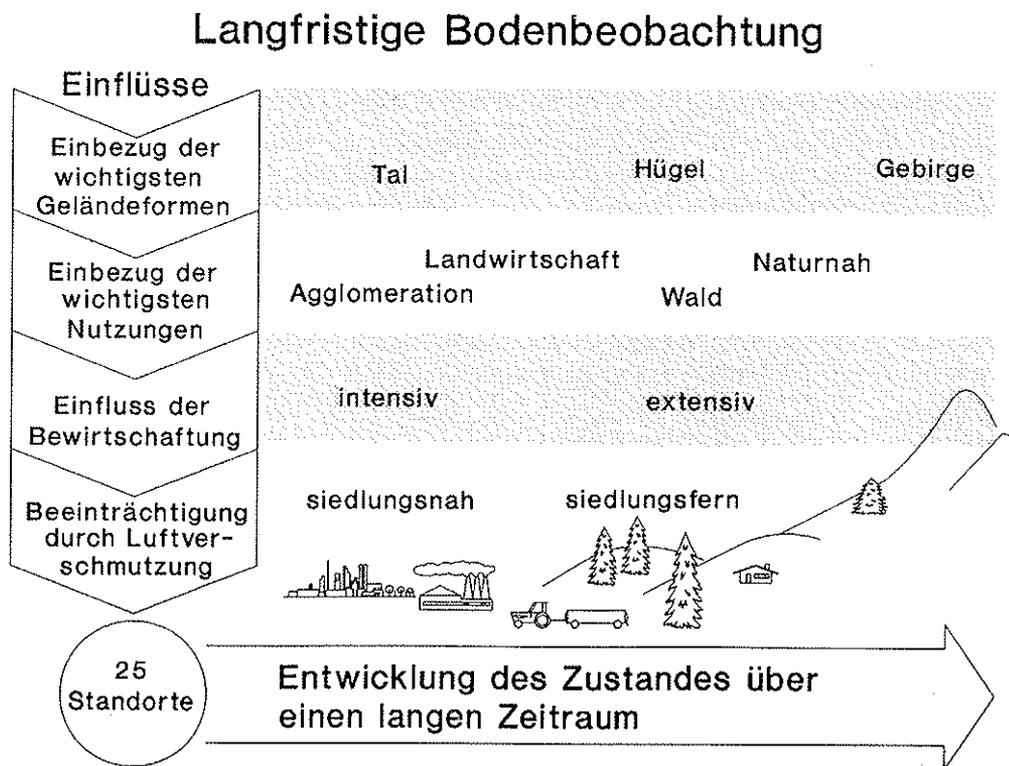
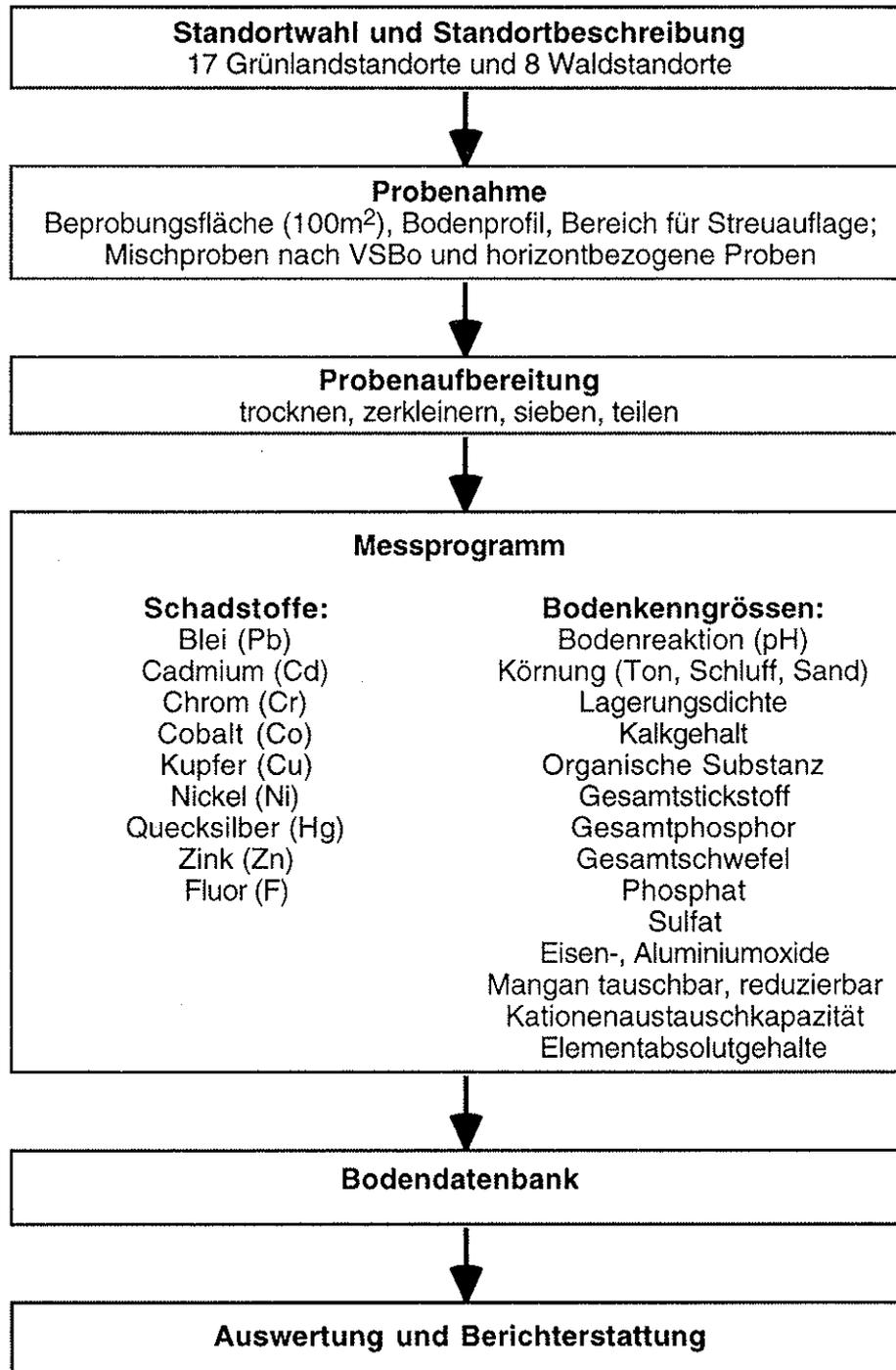


Abb. 3: Wahl der Beobachtungsstandorte nach unterschiedlichen standörtlichen Kriterien

Abb. 4: Arbeitsablauf und Messprogramm im KABO-St. Gallen



Kantonale Bodenbeobachtung - Ergebnisse der Ersterhebung

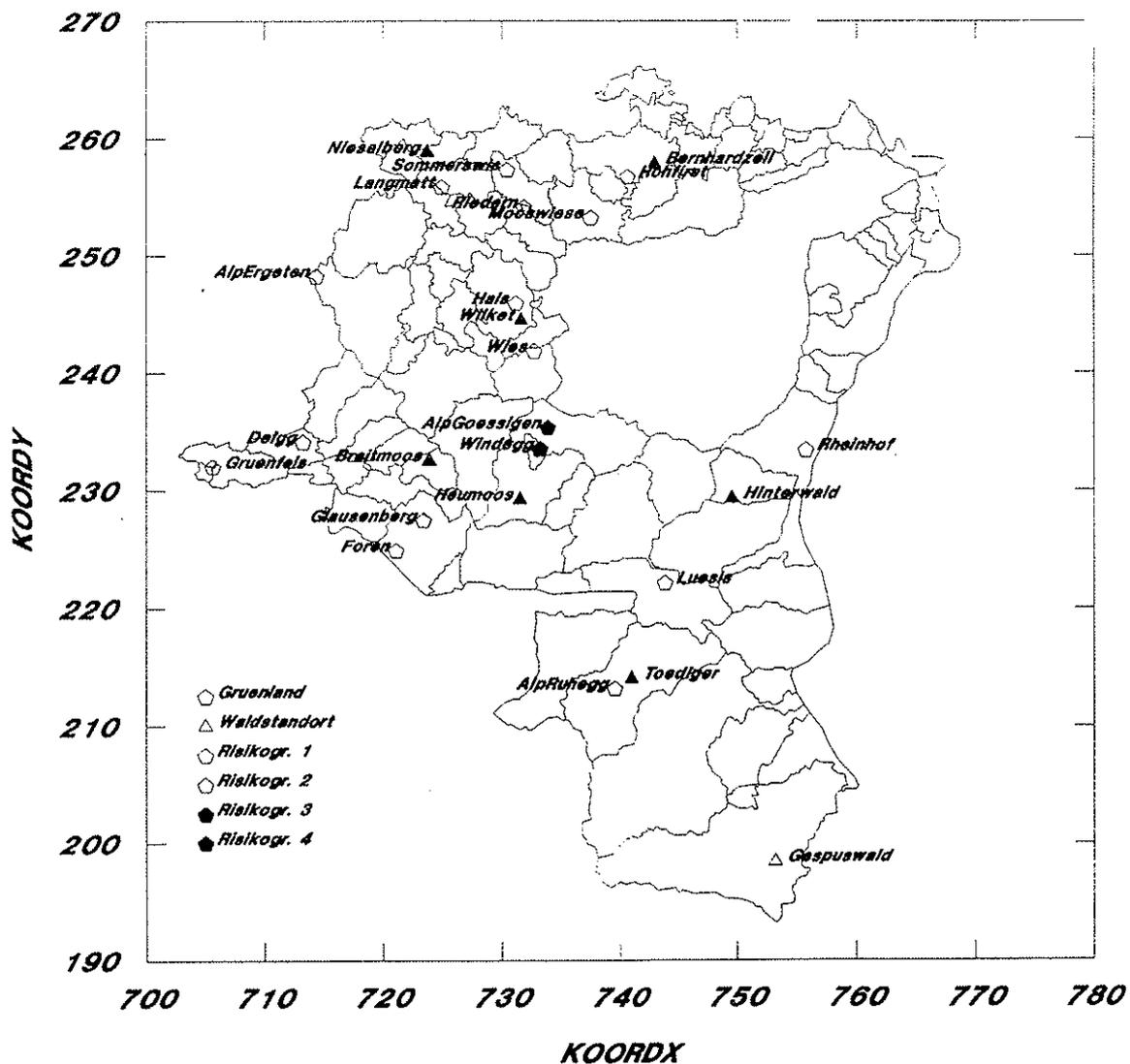
Die Auswertung der umfangreich erhobenen Daten aus der Erstbeprobung hat wertvolle Informationen über die Zustände der Böden im Kantonsgebiet geliefert. Im Vordergrund steht die Schwermetallbelastung der Böden sowie die Bodenversauerung und daraus resultierende Veränderungen.

Die Ergebnisse der Ersterhebung werden in folgenden Kapiteln vorgestellt:

- Schadstoffgehalte und Bodenbelastung nach VSBo.
- Abschätzung geogener und anthropogener Schwermetallanteile.
- Ursachen der Schwermetallbelastung - Differenzierung der Standorte nach Einwirkungen.
- Schwermetalle werden mobil... - Relative Bindungsstärken der Böden.
- Wann Schwermetalle zur Belastung werden - Beurteilung des Belastungsrisikos.
- Folgen der Bodenversauerung - pH als Mastervariable.

Die Lage der KABO-Standorte ist der nachfolgenden Karte zu entnehmen.

KABO-Standorte in St. Gallen



Schadstoffgehalte und 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. In der Tabelle 1 sind die Resultate der Schadstoff-Beprobung nach VSBo (0 - 20 cm) für die einzelnen Standorte sowie schweizerische Vergleichswerte aus anderen Untersuchungen dargestellt. Demnach weist der Standort 82 (Grünfelswiese) Richtwertüberschreitungen für die Totalgehalte an Blei (Pb), Cadmium (Cd) und Kupfer (Cu) auf und ist somit im Sinne der VSBo belastet. Diese Situation ist ursächlich mit der Nutzung (Wiese) in Verbindung mit Schadstoffeinträgen über die Luft (Siedlungsstandort) erklärbar.

Für die Standorte 6 (Foren), 10 (Alp Gössigen), 11 (Windegg), 53 (Nieselberg), 58 (Rheinhof), 75 (Tödigerhütte), 76 (Gaspuswald) und 81 (Mooswiese) wurden Totalgehalte für einzelne Schwermetalle gemessen, die zwar unterhalb der entsprechenden Richtwerte liegen, aber diese bereits zu mindestens 2/3 erreicht haben. Diese Werte indizieren Anreicherungen von Schwermetallen in den Oberböden der betreffenden Standorte (32 Prozent der beprobten Standorte).

Insgesamt liegen die im KABO-St. Gallen gemessenen Schwermetalltotalgehalte durchaus im Bereich häufig gemessener Werte in der Schweiz. Auffällig sind dennoch im Mittel höhere Cd- und Pb-Gehalte. Wie aus Kontrollmessungen zu schliessen ist, sind vergleichsweise tiefe mittlere Cr-, Cu- und Ni-Gehalte vermutlich analytisch bedingt.

Die Totalgehalte erlauben im allgemeinen keine direkte Beurteilung biologischer Wirkungen, die von Schwermetallen in Böden ausgehen können. In der VSBo ist deshalb die Bestimmung löslicher Gehalte (NaNO₃-Extrakte) zur Abschätzung mobiler bzw. pflanzenverfügbarer Schwermetallanteile festgeschrieben. Richtwertüberschreitungen für die löslichen Gehalte waren an 9 Standorten (36 %) feststellbar. Die Standorte 4 (Heumoos) und 5 (Breitmooswald) sind bezüglich der löslichen Cd- und Zn-Gehalte und die Standorte 1 (Bernhardzeller Wald), 10 (Alp Gössigen), 11 (Windegg), 3 (Hinterwald) 53 (Nieselberg), 2 (Wilket) und 75 (Tödigerhütte) in der Reihenfolge abnehmender Gehalte bezüglich der löslichen Zn-Gehalte im Sinne der VSBo als belastet einzustufen. Auf diesen Standorten sind schädliche Wirkungen auf Organismen nicht mehr auszuschliessen, so dass weitere Abklärungen des Belastungsrisikos angezeigt sind.

Die zahlreichen Richtwertüberschreitungen für die Fluortotalgehalte sind nicht als eindeutiger Hinweis auf anthropogene, d.h. durch Menschen verursachte Belastungen zu werten, sondern eher im Zusammenhang mit hohen natürlichen (geogenen) Gehalten zu sehen. Die auf den KABO-Standorten ermittelten Gehalte liegen im Spektrum häufig gemessener Werte. Die Fluorlöslichkeit ist generell sehr gering. Schädliche Auswirkungen sind daher nicht zu befürchten.

Tab. 1: Totale und lösliche Schwermetall- und Fluorgehalte (nach VSBo) der KABO-Standorte, Oberbodenproben (0 - 20 cm); schweizerische Vergleichswerte

| Standort Nr. (Nutzung) | Totalgehalte [mg/kg] | | | | | | | | | Lösliche Gehalte [mg/kg] | | | |
|---------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Pb | Cd | Cr | Co | Cu | Ni | Hg | Zn | F | Cd | Zn | Cu | F |
| 1 (Wald) | 12.5 | 0.03 | 3.0 | 2.8 | 2.9 | 4.4 | 0.08 | 17.6 | 266 | 0.013 | 1.42 | 0.08 | 2.0 |
| 2 (Wald) | 21.4 | 0.30 | 11.9 | 6.7 | 11.3 | 28.4 | 0.10 | 43.5 | 403 | 0.022 | 0.63 | 0.05 | 2.0 |
| 3 (Wald) | 30.5 | 0.24 | 7.0 | 7.9 | 10.7 | 17.5 | 0.17 | 54.7 | 456 | 0.016 | 0.65 | 0.06 | 2.0 |
| 4 (Wald) | 20.1 | 0.11 | 7.3 | 5.3 | 7.2 | 8.5 | 0.09 | 28.4 | 323 | 0.032 | 2.22 | 0.05 | 2.0 |
| 5 (Wald) | 28.8 | 0.06 | 5.5 | 5.9 | 4.4 | 4.1 | 0.07 | 21.2 | 300 | 0.032 | 2.00 | 0.05 | 2.0 |
| 6 (Wiese) | 42.1 | 0.52 | 19.0 | 11.4 | 42.0 | 39.0 | 0.10 | 99.9 | 700 | 0.001 | 0.10 | 0.19 | 4.6 |
| 7 (Wiese) | 27.1 | 0.46 | 13.4 | 6.5 | 13.0 | 25.0 | 0.09 | 67.0 | 350 | 0.002 | 0.20 | 0.05 | 2.6 |
| 8 (Wiese) | 27.5 | 0.36 | 14.6 | 7.9 | 12.8 | 22.6 | 0.11 | 50.8 | 365 | 0.004 | 0.12 | 0.05 | 2.0 |
| 9 (Wiese) | 24.6 | 0.31 | 7.5 | 11.5 | 12.3 | 18.0 | 0.09 | 73.7 | 1002 | 0.002 | 0.10 | 0.05 | 2.0 |
| 10 (Wiese) | 23 | 0.58 | 9.5 | 4.5 | 6.3 | 11.4 | 0.10 | 36.3 | 370 | 0.027 | 1.06 | 0.05 | 2.0 |
| 11 (Wiese) | 22.5 | 0.59 | 9.2 | 8.0 | 16.5 | 17.6 | 0.07 | 70.3 | 440 | 0.016 | 0.91 | 0.05 | 3.9 |
| 12 (Wiese) | 16.25 | 0.29 | 11.3 | 3.1 | 10.9 | 11.9 | 0.07 | 32.0 | 262 | 0.001 | 0.10 | 0.09 | 3.8 |
| 13 (Wiese) | 24 | 0.50 | 14.3 | 7.3 | 17.6 | 22.0 | 0.07 | 59.4 | 350 | 0.002 | 0.10 | 0.09 | 3.3 |
| 14 (Wiese) | 31.3 | 0.26 | 8.8 | 5.1 | 22.3 | 14.1 | 0.16 | 52.1 | 339 | 0.005 | 0.34 | 0.10 | 3.9 |
| 15 (Wiese) | 24.3 | 0.34 | 12.3 | 5.2 | 17.4 | 19.8 | 0.05 | 49.7 | 290 | 0.001 | 0.10 | 0.05 | 4.1 |
| 53 (Wald) | 25.1 | 0.13 | 17.2 | 11.0 | 10.3 | 42.0 | 0.11 | 37.0 | 343 | 0.009 | 0.65 | 0.05 | 2.9 |
| 58 (Wiese) | 32.5 | 0.46 | 14.7 | 12.2 | 49.6 | 38.6 | 0.10 | 72.1 | 730 | 0.001 | 0.10 | 0.33 | 2.3 |
| 75 (Wald) | 34.1 | 0.19 | 4.4 | 9.7 | 7.6 | 11.8 | 0.16 | 36.2 | 567 | 0.008 | 0.53 | 0.05 | 2.0 |
| 76 (Wald) | 46.6 | 0.59 | 7.0 | 1.9 | 6.0 | 5.9 | 0.19 | 58.8 | 430 | 0.001 | 0.10 | 0.09 | 2.3 |
| 81 (Wiese) | 37.7 | 0.31 | 13.3 | 4.7 | 18.6 | 16.0 | 0.14 | 60.1 | 310 | 0.005 | 0.22 | 0.07 | 5.9 |
| 82 (Wiese) | 54.2 | 0.84 | 11.5 | 6.9 | 75.4 | 20.0 | 0.18 | 117.0 | 290 | 0.008 | 0.44 | 0.12 | 3.0 |
| 93 (Wiese) | 16.7 | 0.38 | 13.8 | 5.7 | 20.5 | 24.3 | 0.05 | 45.9 | 404 | 0.004 | 0.15 | 0.05 | 4.2 |
| 94 (Wiese) | 21.6 | 0.31 | 9.4 | 4.8 | 10.2 | 13.7 | 0.07 | 43.7 | 350 | 0.005 | 0.13 | 0.05 | 2.2 |
| 95 (Wiese) | 28.7 | 0.44 | 7.6 | 5.4 | 26.2 | 20.0 | 0.09 | 69.5 | 375 | 0.002 | 0.13 | 0.05 | 4.5 |
| 174 (Wiese) | 29.8 | 0.46 | 7.2 | 5.2 | 6.9 | 10.2 | 0.06 | 62.5 | 1013 | 0.009 | 0.28 | 0.05 | 2.4 |
| KABO St.G. | Pb | Cd | Cr | Co | Cu | Ni | Hg | Zn | F | Cd | Zn | Cu | F |
| Median, Wiese: | 27.1 | 0.44 | 11.5 | 5.7 | 17.4 | 19.8 | 0.09 | 60.1 | 365 | 0.004 | 0.13 | 0.05 | 3.3 |
| Median, Wald: | 27.0 | 0.16 | 7.0 | 6.3 | 7.4 | 10.1 | 0.11 | 36.6 | 373 | 0.014 | 0.75 | 0.05 | 2.0 |
| Meyer, 1990 | | | | | | | | | | | | | |
| Landwirtschaft: | 22.6 | 0.31 | 30.0 | 8.7 | 23.6 | 29.8 | 0.08 | 62.1 | 420 | 0.004 | 0.10 | 0.09 | |
| Wald: | 21.3 | 0.21 | 27.0 | 9.4 | 12.1 | 27.8 | 0.13 | 47.5 | 365 | 0.003 | 0.19 | 0.07 | 1.1 |
| Vogel, 1989 | | | | | | | | | | | | | |
| Landwirtschaft: | 21.4 | 0.24 | | | 23.6 | 24.4 | | 56.5 | | | | | |
| Grünland: | 22.3 | 0.25 | | | 22.3 | 22.9 | | 60.9 | | | | | |
| Wald: | 26.1 | 0.17 | | | 11.6 | 19.8 | | 45.6 | | | | | |
| NABO, 1993 | | | | | | | | | | | | | |
| Grasw. intensiv: | 24.0 | 0.29 | 32.4 | 6.4 | 21.4 | 25.5 | 0.11 | 70.1 | 522 | | | | |
| Grasw. extensiv: | 22.7 | 0.16 | 26.2 | 5.5 | 16.4 | 18.7 | 0.10 | 52.1 | 672 | | | | |
| Kunstpflanze: | 25.6 | 0.30 | 25.1 | 8.3 | 17.9 | 24.6 | 0.09 | 56.0 | 435 | | | | |
| Nadelwald: | 29.8 | 0.15 | 22.2 | 4.6 | 10.6 | 16.8 | 0.14 | 43.1 | 355 | | | | |
| Laubwald: | 23.4 | 0.29 | 21.6 | 5.3 | 10.7 | 17.3 | 0.11 | 49.8 | 380 | | | | |
| VSBo-Richtwert | 50.0 | 0.80 | 75.0 | 25.0 | 50.0 | 50.0 | 0.80 | 200.0 | 400 | 0.03 | 0.50 | 0.70 | 25.0 |

Richtwertüberschreitung (fett)
2/3 des entsprechenden Richtwertes überschritten

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 u.a. Schwermetalle vor allem über Luftverunreinigungen und direkt über landwirtschaftliche Hilfsstoffe und Dünger in die Böden eingetragen. Diese Anteile werden daher als anthropogen bezeichnet. Richtwerte, wie sie in der VSBo zur Beurteilung der Schwermetallbelastung festgelegt wurden, berücksichtigen weder Variationen der geologischen Grundgehalte im Muttergestein noch bodengene-tische oder biologische Prozesse, die zu Anreicherungen ("Ionenpumpe") bzw. Residualanrei-cherungen (durch Auswaschung von Verwitterungsprodukten) oder Verdünnungen (Bioturba-tion, Humusbildung usw.) führen können. Sie sind daher nicht geeignet, die effektive Ver-schmutzung aufgrund anthropogener Tätigkeiten zu beurteilen. Richtwerte dienen vielmehr als Handlungskriterium.

Zur Beurteilung der anthropogenen Schwermetallanteile in den Oberböden der KABO-Standorte wurden daher die gewichtsbezogenen Oberbodentotalgehalte mit denjenigen der Unterböden verglichen und so die Schwermetallanreicherung abgeschätzt. In Tabelle 2 sind die Quotienten aus den Ober- und Unterbodengehalten dargestellt. Sind die Quotienten grösser als 1, so wurden im Oberboden höhere Gehalte als im Unterboden gemessen. Bei der Interpretation dieser Werte sind die oben erwähnten Schwierigkeiten zu berücksichtigen. Weiterhin hat die Bezugsgrösse der gemessenen Schwermetallgehalte (volumen- oder gewichts-bezogen) einen Einfluss auf derartige Abschätzungen. Diesen Schwierigkeiten wurde bei der Interpretation der Quotienten in Tabelle 2 insofern Rechnung getragen, als dass erst dann Standorte als deutlich anthropogen belastet bezeichnet wurden, wenn die Quotienten Werte grösser als 2 annehmen und wenn diese Anreicherung in den Schwermetalltiefenprofilen ins-gesamt deutlich zum Ausdruck kommt. Weiterhin ist bei der Beurteilung dieser Verhältnis-zahlen 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 auch folgendes Kapitel "Schwermetalle werden mobil...").

Aufgrund dieser Auswertung sind folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Vor allem das weitgehend immobile Pb zeigt auf 3/4 der Standorte eine deutliche anthropo-gene Anreicherung an.
- Die Standorte 9 (Ruhegg/Gnatscher) und 82 (Grünfelsewiese) weisen eindeutig die höchsten Quotienten auf, wobei am Standort 9 sehr tiefe Unterbodengehalte gemessen wurden und lediglich für Zn auch absolut hohe Gehalte im Oberboden festgestellt wurden. Der Standort 82 (Wiese im Siedlungsgebiet) ist auch nur aufgrund der Oberbodengehalte als am stärksten belastet zu bezeichnen.
- Beim Vergleich aller Schwermetalle ist lediglich Standort 8 (Hals) als unbelastet bis schwach belastet zu bezeichnen.
- Für Cd und Zn sind die Oberbodentotalgehalte von 9 Standorten und für Ni diejenigen von 13 Standorten aufgrund offensichtlich hoher Schwermetalllöslichkeiten nicht mehr geeignet, das kumulative Ausmass der anthropogenen Schwermetallbelastung anzuzeigen. Auf diesen Standorten ist also davon auszugehen, dass Schwermetallverlagerungen aus den

Oberböden in die Unterböden stattfinden und bereits stattgefunden haben. Dies betrifft in erster Linie die Waldstandorte, aber auch einige stark saure Wiesen.

Da es kein Verfahren gibt, geogene und anthropogene Schwermetallanteile in Böden streng quantitativ zu trennen, sind derartige gängige Abschätzungen Annäherungen zur Beurteilung anthropogener Schwermetallgehalte in Böden. Die Plausibilität wird vor allem durch die Quotienten der sehr immobilen und vorwiegend über die Atmosphäre (ubiquitär) eingetragenen Schwermetalle Blei und Quecksilber gestützt. Eine analoge Abschätzung anthropogener Schwermetallanteile unter Verwendung der Schwermetallabsolutgehalte zeigte im wesentlichen die gleichen Resultate.

Tab. 2: Quotienten von Ober- und Unterbodentotalgehalten (oberste und unterste beprobte mineralische Horizonte) zur Abschätzung anthropogener Schwermetallanteile.

| StaO | Cd | StaO | Cu | StaO | Zn | StaO | Pb | StaO | Cr | StaO | Ni | StaO | Hg | StaO | Co |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|
| 9 | 8.2 | 82 | 14.6 | 9 | 45.3 | 82 | 22.6 | 93 | 1.9 | 9 | 12.7 | 82 | 18.2 | 9 | 6.6 |
| 82 | 5.9 | 9 | 10.6 | 82 | 10.3 | 76 | 15.9 | 58 | 1.8 | 82 | 3.0 | 4 | 5.3 | 6 | 5.3 |
| 6 | 3.2 | 15 | 3.4 | 15 | 3.6 | 9 | 12.0 | 9 | 1.8 | 76 | 2.7 | 9 | 3.7 | 82 | 3.2 |
| 84 | 3.1 | 76 | 2.5 | 6 | 3.3 | 15 | 6.4 | 82 | 1.7 | 6 | 1.7 | 15 | 2.9 | 76 | 2.1 |
| 14 | 3.1 | 93 | 2.4 | 83 | 2.9 | 7 | 5.4 | 81 | 1.6 | 15 | 1.6 | 76 | 2.6 | 15 | 2.1 |
| 13 | 2.7 | 14 | 2.3 | 13 | 2.7 | 93 | 5.3 | 2 | 1.3 | 93 | 1.6 | 6 | 2.5 | 93 | 2.1 |
| 93 | 2.6 | 95 | 2.2 | 95 | 2.5 | 2 | 5.2 | 10 | 1.3 | 13 | 1.2 | 94 | 2.3 | 53 | 1.9 |
| 7 | 2.5 | 81 | 2.1 | 7 | 2.4 | 81 | 5.1 | 13 | 1.1 | 58 | 1.1 | 81 | 2.3 | 58 | 1.8 |
| 81 | 2.3 | 12 | 2.1 | 2 | 2.3 | 10 | 5.1 | 95 | 1.1 | 81 | 1.0 | 13 | 2.2 | 2 | 1.7 |
| 76 | 2.2 | 174 | 1.7 | 81 | 2.3 | 4 | 4.7 | 12 | 1.1 | 2 | 1.0 | 14 | 2.1 | 11 | 1.1 |
| 15 | 2.1 | 6 | 1.6 | 174 | 2.1 | 5 | 4.1 | 15 | 1.1 | 53 | 1.0 | 53 | 2.0 | 81 | 1.1 |
| 95 | 1.8 | 7 | 1.6 | 76 | 2.0 | 174 | 3.5 | 53 | 1.0 | 8 | 0.9 | 75 | 2.0 | 174 | 1.1 |
| 12 | 1.7 | 2 | 1.5 | 14 | 1.9 | 13 | 3.1 | 8 | 1.0 | 3 | 0.9 | 93 | 2.0 | 14 | 1.0 |
| 174 | 1.6 | 3 | 1.2 | 58 | 1.9 | 95 | 3.0 | 14 | 1.0 | 14 | 0.9 | 95 | 2.0 | 5 | 0.9 |
| 3 | 1.5 | 8 | 1.2 | 10 | 1.6 | 53 | 2.9 | 76 | 0.9 | 174 | 0.8 | 5 | 1.7 | 7 | 0.9 |
| 2 | 1.5 | 4 | 1.2 | 12 | 1.6 | 14 | 2.8 | 94 | 0.8 | 4 | 0.8 | 11 | 1.7 | 3 | 0.9 |
| 7 | 1.4 | 58 | 1.2 | 8 | 1.4 | 6 | 2.6 | 3 | 0.8 | 12 | 0.8 | 3 | 1.3 | 95 | 0.9 |
| 10 | 1.1 | 13 | 1.1 | 4 | 1.3 | 94 | 2.5 | 4 | 0.8 | 95 | 0.7 | 7 | 1.3 | 12 | 0.9 |
| 8 | 1.1 | 94 | 0.9 | 53 | 1.3 | 11 | 2.4 | 6 | 0.7 | 75 | 0.5 | 1 | 1.3 | 8 | 0.9 |
| 58 | 1.0 | 10 | 0.9 | 94 | 1.3 | 12 | 1.9 | 11 | 0.7 | 7 | 0.5 | 8 | 1.2 | 13 | 0.8 |
| 11 | 0.8 | 84 | 0.7 | 11 | 1.2 | 58 | 1.7 | 75 | 0.6 | 94 | 0.5 | 174 | 1.2 | 75 | 0.8 |
| 75 | 0.7 | 11 | 0.6 | 2 | 1.0 | 3 | 1.5 | 174 | 0.6 | 11 | 0.4 | 2 | 1.1 | 10 | 0.8 |
| 53 | 0.6 | 75 | 0.6 | 1 | 0.9 | 75 | 1.4 | 7 | 0.5 | 10 | 0.4 | 58 | 1.1 | 94 | 0.6 |
| 5 | 0.3 | 1 | 0.5 | 75 | 0.9 | 1 | 1.2 | 3 | 0.5 | 1 | 0.2 | 12 | 0.9 | 4 | 0.4 |
| 1 | 0.1 | 5 | 0.2 | 5 | 0.8 | 8 | 1.1 | 1 | 0.3 | 5 | 0.1 | 10 | 0.8 | 1 | 0.4 |
| Median: | 1.7 | | 1.5 | | 1.9 | | 3.1 | | 1.0 | | 0.9 | | 2.0 | | 1.0 |
| <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div> Standorte mit deutlichen anthropogenen Schwermetallanteilen (Verhältnis > 2)</div> <div> Standorte mit geringer bis mässiger anthropogener Schwermetallanreicherung</div> <div> Unbelastete Standorte, bzw. Standorte auf denen die Schwermetallprofile nicht eindeutig anthropogene Belastungen anzeigen</div> <div> Oberbodengehalte sind aufgrund der Schwermetallprofile bzw. der löslichen Gehalte und Anteile kaum geeignet, das kumulative Ausmass der anthropogenen Schwermetallbelastung anzuzeigen</div> </div> | | | | | | | | | | | | | | | |

Ursachen der Schwermetallbelastung - Differenzierung der Standorte nach Einwirkungen

Die bei der Standortwahl zugrundegelegten Kriterien (Standortvariablen) lassen unterschiedliche stoffliche Einwirkungen auf die Böden erwarten. Sollen umweltrelevante Schadstoffe gezielt an ihren Quellen eingedämmt werden, so ist es wichtig, die Eintragsfrachten nach ihrer Herkunft zu erfassen. 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 oder Ursachen für unterschiedliche Bodenzustände erkennen.

Für die folgenden Visualisierungen wurden Box-Plot-Darstellungen gewählt, da so Verteilungen von Daten optisch prägnant verglichen werden können. Dargestellt werden sämtliche Mischproben (2 bis 3 pro Standort) der Oberböden (0 - 20 cm). Die Schwermetalltotalgehalte werden in Prozenten der VSBö-Richtwerte (% VSBö-RW) angegeben.

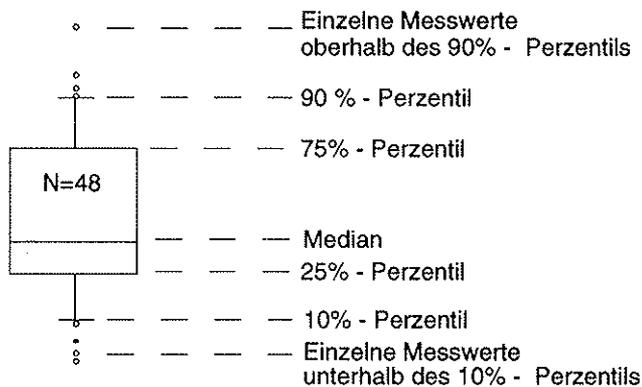


Abb. 5: Lesehilfe zu den Box-Plots

Innerhalb der 10 - 90%-Perzentile liegen 80% und innerhalb der 25 - 75%-Perzentile 50% aller Werte. N=48 entspricht der Anzahl Messwerte.

Schwermetalltotalgehalte differenziert nach Nutzung:

Die Verteilungen der Schwermetalltotalgehalte zwischen den Nutzungsformen Wald und Wiese (Abb. 6) weisen deutliche Unterschiede für die Schwermetalle Cd, Cr, Cu und Zn auf. Charakteristisch sind jeweils erhöhte Extremwerte (Minima und Maxima) sowie deutlich erhöhte Medianwerte auf den Wieslandstandorten. Für die Elemente Cd, Cu und Zink sind ebenfalls die mittleren 50% aller Werte verschieden, so dass von einem deutlichen Nutzungseinfluss ausgegangen werden kann. Für Kupfer lässt sich zudem eine deutlich grössere Streuung der Daten auf den Wieslandstandorten feststellen, was auf spezifisch erhöhte Einwirkungen (einzelne Standorte) hinweist. Für Ni ist der Nutzungseinfluss bei deutlichen Unterschieden in den Medianwerten aber einer grösseren Streuung der Daten auf den Waldstandorten weniger deutlich ausgeprägt. Insgesamt ist die Differenzierung bezüglich dieser Elemente aufgrund eines wahrscheinlich erhöhten Eintrags über landwirtschaftliche Hilfsstoffe plausibel. Für die Elemente Pb, Co und Hg ist keine deutliche Differenzierung ersichtlich.

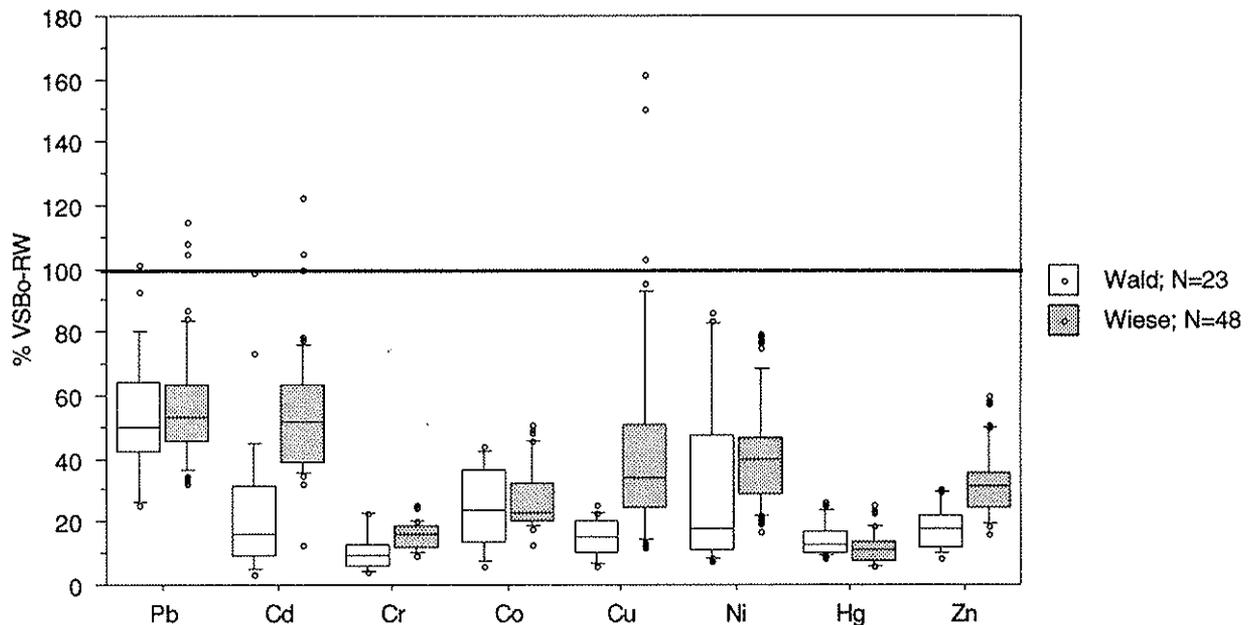


Abb. 6: Schwermetalltotalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Nutzung

Schwermetalltotalgehalte differenziert nach "Siedlung":

Die Standortvariable "Siedlung" unterscheidet die Kategorien "Wald, siedlungsfern", "Wald, siedlungsnah", "Wiese, naturnah" und "Wiese innerhalb Siedlung". In die Darstellung wurden darüber hinaus die übrigen Wieslandstandorte einbezogen (Abb. 7).

Besonders auffällig sind die Wieslandstandorte der Kategorie "Siedlung" (Mooswiese (81) und Grünfelswiese (82)), welche im Vergleich zu den übrigen Kategorien für Pb, Cd, Cu und Zn deutlich höhere Medianwerte sowie die höchsten Extremwerte aufweisen. Hier liegt offensichtlich eine von den übrigen Standorten verschiedene Immissionssituation vor.

Im Vergleich siedlungsferne - siedlungsnah Waldstandorte liessen sich für sämtliche betrachteten Schwermetalle auf den siedlungsfernen Standorten (Wilket (2), Hinterwald (3), Tödigerhütte (75), Gaspuswald (76)) höhere Medianwerte sowie für die Elemente Pb, Cd, Cu, Hg und Zn die höchsten Extremwerte beobachten. Diese Beobachtung impliziert, dass mit zunehmender Entfernung von Siedlungsgebieten und damit von Emittenten nicht zwangsläufig mit einer Abnahme von Immissionen zu rechnen ist. Die Schwermetallgehalte der naturnahen Wiese (Lüsis/Vogelrüti (174)) bekräftigen diese Beobachtung.

Besonders bezüglich Cr, aber auch bezüglich Co scheinen die Standorte wenig differenziert. Dies deutet auf eine vergleichsweise geringe Relevanz dieser Schwermetalle als anthropogene Schadstoffe hin.

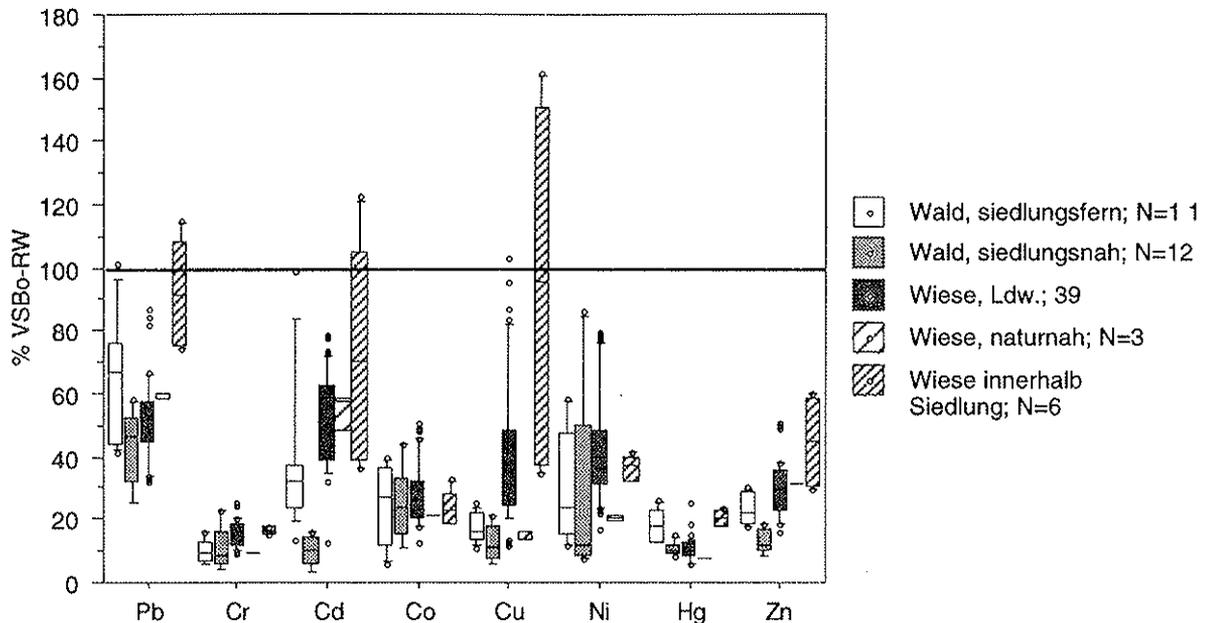


Abb. 7: Schwermetalltotalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach der Entfernung zu Siedlungen

Schwermetalltotalgehalte differenziert nach Schadstoffexposition

Bezüglich der Schadstoffexposition wurden die Standorte nach den Kategorien "gering", "mässig" und "gross" differenziert (Abb. 8). Für die Schwermetalle Pb, Cd, Cu, Hg und Zn wiesen die Standorte mit "grosser" Schadstoffexposition die jeweils deutlich höchsten Medianwerte und abgesehen von Hg auch die höchsten Extremwerte auf, so dass sich diese Standorte im Vergleich zu den gering bis mässig exponierten eindeutig unterscheiden. Diese Beobachtung impliziert verstärkte atmosphärische Schwermetalleinträge. Besonders für Pb und Hg ist eine derartige Einschätzung plausibel, da diese Elemente weniger im Zusammenhang mit Einträgen über die Landwirtschaft zu sehen sind. Cr, Co, und Ni zeigen keine Differenzierungen nach Schadstoffexposition. .

Zwischen geringer und mässiger Exposition wird lediglich für Cu ein Unterschied in der Verteilung deutlich. Der Wert der Standortvariablen "Schadstoffexposition" wäre für genauere Analysen durch Immissionsmessungen zu verifizieren.

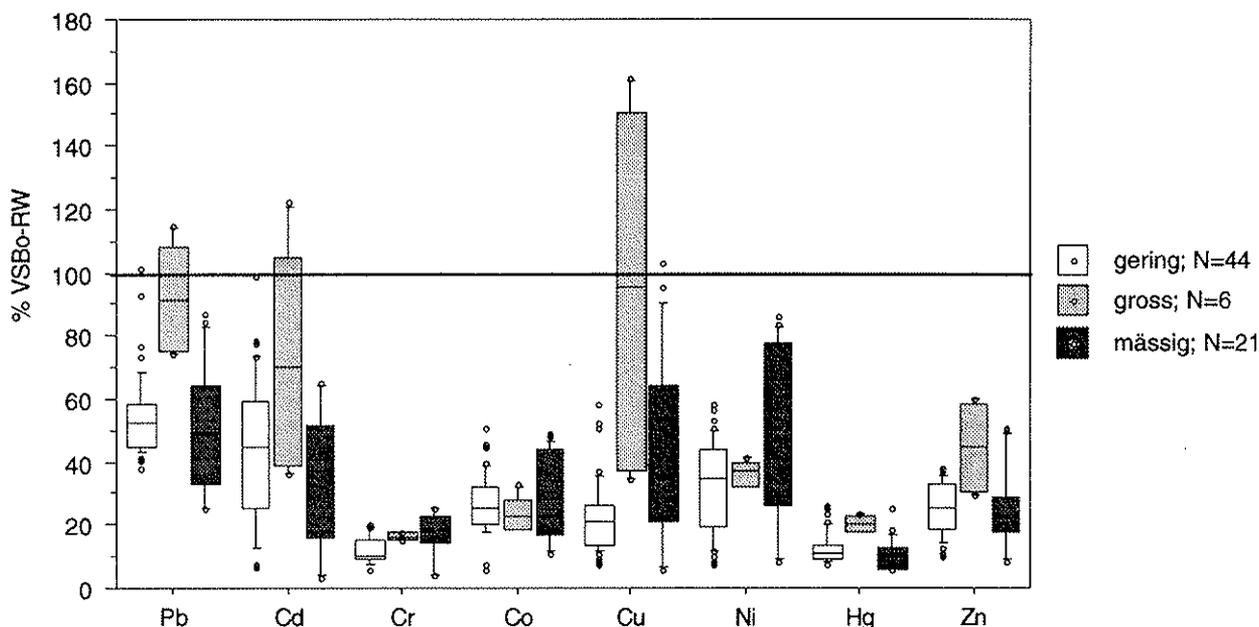


Abb. 8: Schwermetalltotalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Schadstoffexposition

pH-Werte der Standorte differenziert nach Nutzung:

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

Die pH-Werte weisen die erwartete deutliche Nutzungsabhängigkeit auf (Abb. 9). Während die Wieslandstandorte im allgemeinen als gut gepuffert bezeichnet werden können, sind die Oberböden der Waldstandorte überwiegend stark sauer. Diese Entwicklung ist auf siedlungsnahen im Vergleich zu siedlungsfernen Waldstandorten deutlich ausgeprägter. Ein Zusammenhang zu verstärkten atmosphärischen Einträgen säurebildender Stoffe auf siedlungsnahen Waldstandorten ist naheliegend und wird durch entsprechende Kohlenstoff/Schwefel-Verhältnisse in den Streuauflagen der Waldstandorte unterstützt. Die ökologischen Auswirkungen von starken Bodenversauerungen haben weitreichende Folgen und sind z.B. im Zusammenhang mit dem Waldsterben oder der Versauerung von Oberflächengewässern zu sehen. Für Böden sind es irreversible Veränderungen.

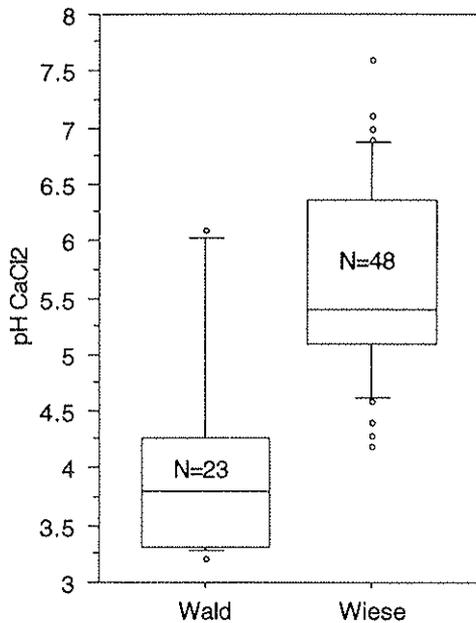


Abb. 9: Abhängigkeit der pH-Werte von der Nutzung

Schwermetalle werden mobil...

Im Stoffhaushalt der Ökosphäre bilden Böden ein natürliches Reinigungssystem, das immitierte Schadstoffe zu binden und - je nach Art der Stoffe und Eigenschaften der Böden - in mehr oder weniger hohem Masse aus dem Stoffkreislauf zu entziehen vermag. Ist die Fähigkeit eines Bodens, Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) zu immobilisieren, gestört, so sind diese mit der Wasserbewegung im Boden mobil. Es besteht die Gefahr einer Schadstoffaufnahme durch Organismen entweder direkt aus dem Boden oder über eine Belastung des Grundwassers.

Das Immobilisierungs- oder Filtervermögen von Böden gegenüber Schwermetallen wird massgeblich durch den pH-Wert sowie durch die Humus- und Tongehalte bestimmt. Bei Kenntnis dieser Eigenschaften ist eine Diagnose der Immobilisierung möglich (DVWK-Merkblättern zur Wasserwirtschaft, 1988). Für die Standorte im KABO St. Gallen wurden nach dieser Methode die relativen Bindungsstärken gegenüber Cd eingeschätzt. Die umweltgefährdende Mobilität von Schwermetallen nimmt mit abnehmender Bindungsstärke eines Bodens für Schwermetalle zu (Abb. 10). Der leichtlösliche Cd-Anteil steigt im Bereich geringer bis sehr geringer Bindungsstärken steil an. 9 Standorte (36%), davon 7 der 8 untersuchten Waldstandorte weisen demnach ein eingeschränktes Filtervermögen gegenüber Schwermetallen 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: $Cd \geq Zn \geq Tl > Ni > Cu > As = Cr \geq Pb \geq Hg$.

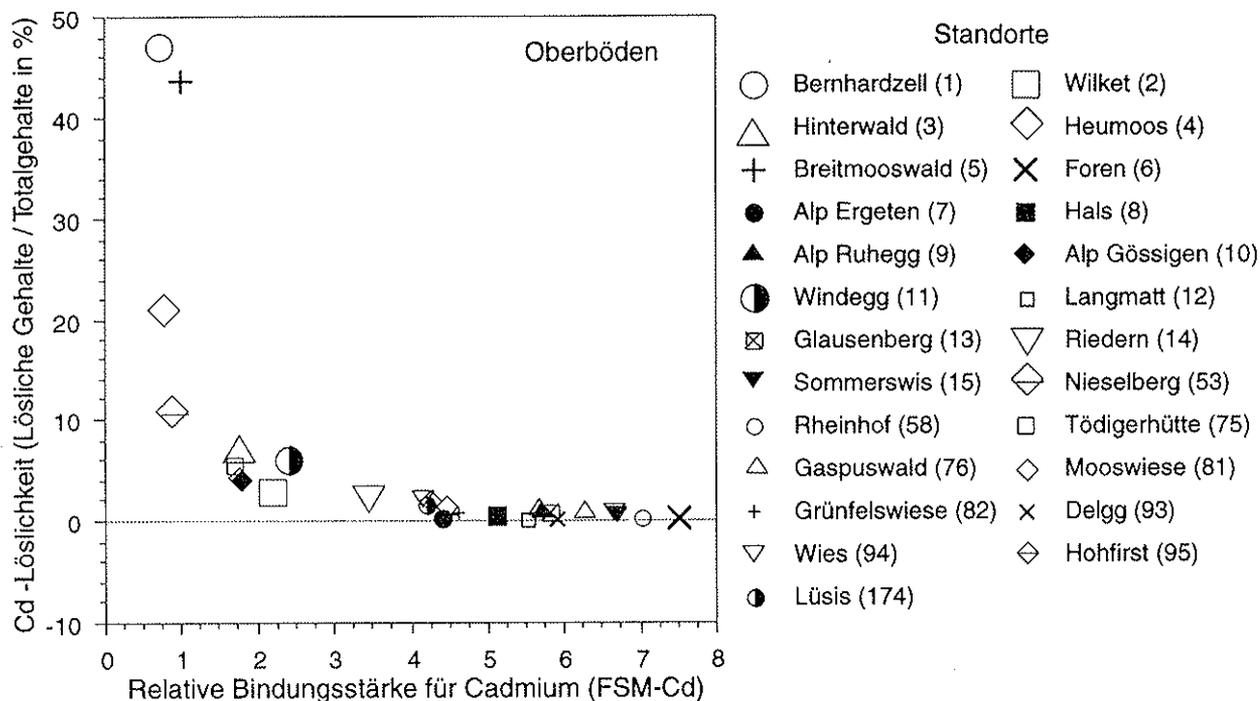


Abb. 10: Cd-Löslichkeit in Abhängigkeit der relativen Bindungsstärken der Oberböden für Cd. Relative Bindungsstärken: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = stark, 5 und > 5 = sehr stark

Wann Schwermetalle zur Belastung werden - Risikoabschätzung

Ein Belastungsrisiko von Schadstoffen ist allgemein dann gegeben, wenn sie in stoffspezifischen Konzentrationen biologisch verfügbar sind. Die biologische Verfügbarkeit von Schwermetallen in Böden wird mit Hilfe der löslichen Gehalte nach den Vorschriften der VSBo abgeschätzt und anhand der entsprechenden Richtwerte beurteilt. Sind die Richtwerte für die löslichen Gehalte überschritten, so können schädliche Auswirkungen auf Organismen nicht mehr ausgeschlossen werden. Soll die zukünftige Entwicklung bezüglich eines Belastungsrisikos beurteilt werden, so ist insbesondere das Filtervermögen der Böden gegenüber Schwermetallen miteinzubeziehen.

Tabelle 3 fasst geeignete Parameter zur Beurteilung der gemessenen Schwermetallgehalte hinsichtlich eines Belastungsrisikos zusammen. Insgesamt kann man sagen, dass saure und stark saure Böden - insbesondere Waldstandorte- aufgrund des eingeschränkten Rückhaltevermögens für Schwermetalle degradiert sind und somit das höchste Belastungsrisiko (Grundwassergefährdung und biologische Aufnahme) aufweisen. Die Degradation dieser Böden ist eine Folge der natürlichen und anthropogenen Bodenversauerung und bezieht sich hier auf die damit einhergehende Abnahme des Rückhaltevermögens gegenüber Schwermetallen aber auch gegenüber Nährstoffen.

Tab. 3: Parameter zur Beurteilung der Schwermetallbelastung (Oberböden), sortiert nach Risikogruppen

| Standorte | | Schwermetallgehalte (nach VSBo) | | Relative Löslichkeit ¹ (Cd-lösl/Cd-totl) % | Filterfunktion ² FSM-Cd | Säuregrad pH | Schwermetall Belastung Risiko-Gruppe |
|--------------------|---------|---------------------------------|------------------|---|---------------------------------------|-----------------|---|
| Flurname (Nr.) | Nutzung | Totalgehalte | lösliche Gehalte | | | | |
| Hals (8) | Wiese | | | 1.11 | 5.1 | 5.1 | 1 |
| Langmatt (12) | Wiese | | | 0.34 | 5.5 | 5.9 | 1 |
| Wies (94) | Wiese | | | 1.61 | 4.2 | 5.1 | 1 |
| Rheinhof (58) | Wiese | Cu, Ni | | 0.22 | 7 | 7.3 | 1 |
| Alp Ergeten (7) | Wiese | | | 0.43 | 4.4 | 5.2 | 2 |
| Alp Ruhegg (9) | Wiese | | | 0.65 | 5.7 | 5.4 | 2 |
| Delgg (93) | Wiese | | | 1.05 | 5.9 | 5.5 | 2 |
| Glausenberg (13) | Wiese | | | 0.40 | 5.8 | 6.9 | 2 |
| Hohfirst (95) | Wiese | | | 0.45 | 4.5 | 5.9 | 2 |
| Lüsis (174) | Wiese | | | 1.96 | 4.2 | 4.8 | 2 |
| Riedern (14) | Wiese | | | 1.73 | 3.5 | 5.0 | 2 |
| Sommerswis (15) | Wiese | | | 0.29 | 6.7 | 6.8 | 2 |
| Foren (6) | Wiese | Pb, Cu, Ni | | 0.19 | 7.5 | 6.6 | 2 |
| Gaspuswald (76) | Wald | Pb, Cd | | 0.17 | 6.3 | 6.2 | 2 |
| Mooswiese (81) | Wiese | Pb | | 1.61 | 4.3 | 5.7 | 2 |
| Grünfelswiese (82) | Wiese | Pb, Cd, Cu | Zn | 0.95 | 4.6 | 5.4 | 2 |
| Tödigerhütte (75) | Wald | Pb | Zn | 4.21 | 1.7 | 4.2 | 3 |
| Windegg (11) | Wiese | Cd | Zn | 2.71 | 2.4 | 4.6 | 3 |
| Wilket (2) | Wald | | Zn | 7.33 | 2.2 | 4.4 | 3 |
| Nieselberg (53) | Wald | Ni | Zn | 6.92 | 0.9 | 3.3 | 3 |
| Breitmooswald (5) | Wald | | Cd, Zn | 53.33 | 1.0 | 3.5 | 3 |
| Bernhardzell (1) | Wald | | Zn | 43.33 | 0.7 | 3.3 | 3 |
| Alp Gössigen (10) | Wiese | Cd | Zn | 4.66 | 1.8 | 4.3 | 4 |
| Hinterwald (3) | Wald | | Zn | 6.60 | 1.8 | 4.3 | 4 |
| Heumoos (4) | Wald | | Cd, Zn | 29.09 | 0.8 | 3.3 | 4 |

 Richtwertüberschreitung

 2/3 des entsprechenden Richtwert überschritten

1 Anteil der löslichen an den totalen Schwermetallgehalten (%), hier für Cadmium dargestellt

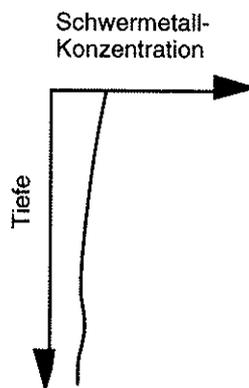
2 Ausgedrückt als relative Bindungsstärke gegenüber Cadmium (FSM-Cd): 1=sehr gering, 2=gering, 3=mittel, 4=stark, ≥5=sehr stark

Die KABO-Standorte lassen sich bezüglich der Schwermetallbelastung grob in 4 (Risiko-) Gruppen gliedern, wobei das Belastungsrisiko von Gruppe 1 zu Gruppe 4 zunimmt:

Gruppe 1: Standorte 8, 12, 58 und 94

Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:

- Schwache Schwermetallanreicherungen im Oberboden.
- Immobilisierung aufgrund hoher Bindungsstärken.

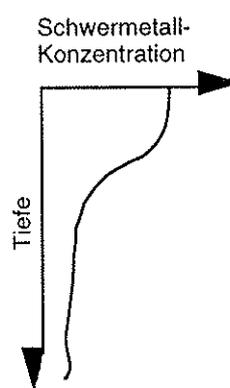


Die Standorte dieser Gruppe weisen eher schwache anthropogene Schwermetallanteile (Anreicherungsfaktoren < 2) auf. Kennzeichnend hierfür sind leicht höhere Schwermetallkonzentrationen in den Oberböden im Vergleich zu den Unterböden. Die Schwermetallprofile der Totalgehalte zeigen einen entsprechenden, mit der Tiefe leicht abnehmenden Verlauf. Die pH-Werte der Böden liegen im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich, so dass die Schwermetalle in den Oberböden dieser Standorte immobilisiert werden. Die Bindungsstärken gegenüber Schwermetallen sind entsprechend hoch (FSM > 4) und die relativen Löslichkeiten tief. Die Standorte dieser Gruppe sind insgesamt als schwach belastet zu bezeichnen. Ein Belastungsrisiko ist aufgrund geringer löslicher Schwermetallgehalte und hoher Bindungsstärken gegenüber Schwermetallen auch längerfristig unwahrscheinlich.

Gruppe 2: Standorte 6, 7, 9, 13, 14, 15, 76, 81, 82, 93, 95 und 174

Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:

- Deutliche Schwermetallanreicherungen im Oberboden.
- Immobilisierung aufgrund hoher Bindungsstärken.

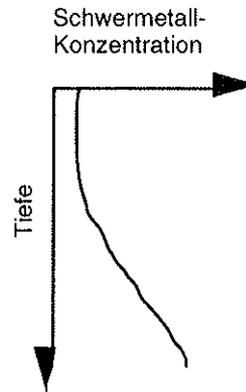


Charakteristisch für diese Standorte sind deutliche bis starke anthropogene Schwermetallanteile in den Oberböden. Die Schwermetalltotalgehalte in den Profilen der einzelnen Standorte zeigen einen deutlich mit der Tiefe abnehmenden Verlauf. Aufgrund meist hoher Bindungsstärken und im Einklang mit sehr geringen löslichen Schwermetallgehalten sind trotz eindeutig erhöhter Totalgehalte (Richtwertüberschreitung am Standort 82) keine phyto- oder zootoxischen Wirkungen zu erwarten. Längerfristig kann sich diese Situation verändern, insbesondere wenn Nutzungsänderungen zu einer verstärkten Versauerung führen sollten. Eine unmittelbare Gefährdung von Organismen ist aufgrund der Immobilisierung der Schwermetalle derzeit nicht anzunehmen.

Gruppe 3: Standorte 1, 2, 5, 11, 53 und 75

Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:

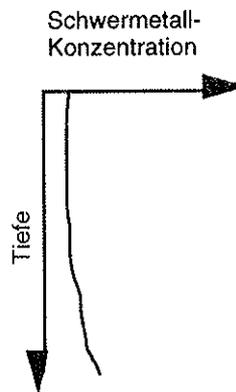
- Hohe Schwermetallmobilität im Oberboden.
- Vertikale Schwermetallverlagerungen.
- Immobilisierung und Anreicherung der Schwermetalle im Unterboden.



Der typische Verlauf der Schwermetalltotalgehalte auf den Standorten der Gruppen 1 und 2 ist auf den Standorten der Gruppe 3 nicht mehr zu erkennen. Im Gegenteil, auf diesen Standorten kehrt sich der Verlauf der Totalgehalte um. Die Richtwerte für die Totalgehalte werden meist deutlich unterschritten. Trotzdem werden teilweise die Richtwerte für die löslichen Gehalte überschritten. Die 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. Ansteigende Schwermetall-Gehalte mit zunehmender Tiefe im Unterboden sprechen für vertikale Verlagerungsprozesse. Die Filterfunktion dieser Standorte ist im Oberboden als degradiert und im Unterboden als intakt zu bezeichnen. Da die Oberböden dieser Standorte offensichtlich keine Senken mehr für die mobileren Schwermetalle darstellen, sind die Oberbodentotalgehalte kaum noch geeignet, das kumulative Ausmass der über die Atmosphäre eingetragenen Belastung abzuschätzen. Auf diesen und den Standorten der Gruppe 4 wäre es hilfreich, genauere Informationen über die Immissionssituation zu erhalten. 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. Die Wirkung von Schwermetallen auf Organismen ist besonders auf sauren Standorten immer auch im Zusammenhang mit dem Nährstoffhaushalt zu sehen (Welp und Brümmer, 1989), d.h. die Empfindlichkeit von Organismen gegenüber Schwermetallen variiert mit der Nährstoffversorgung.

Gruppe 4: Standorte 3, 4 und 10

- Schematische Darstellung eines Schwermetalltiefenprofils für die Totalgehalte. Charakteristika:
- Profilumfassende hohe Schwermetalllöslichkeit.
 - Geringe bis sehr geringe Bindungsstärken.
 - Böden stellen keine Senken mehr für Schwermetalle dar.



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 profilumfassend 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.

Die Situation der Standorte mit z.T. deutlichen Schwermetallanreicherungen in Oberböden (Gruppe 2) stellt sich zur Zeit wegen geringer löslicher Gehalte unbedenklich dar, obwohl ein Risikopotential sicher vorhanden ist. Mit einer Mobilisierung der Schwermetalle bei fortschreitender Versauerung ist insbesondere auf den heute schwach sauren Standorten (7, 9, 81, 82, 174) zu rechnen. Die Einschätzung des Filtervermögens der Böden gegenüber Schwermetallen in Verbindung mit den Schwermetalltotalgehalten kommt dabei einem prognostischen Wert bezüglich eines Belastungsrisikos zu. Standorte mit hohen Belastungspotentialen (hohe Schwermetalltotalgehalte) und hohen Empfindlichkeiten in Bezug auf die Filterfunktion bieten sich für eingehendere Untersuchungen an.

Folgen der Bodenversauerung

Der pH-Wert gilt als "Master-Variable" in Böden und steht folglich mit vielen Eigenschaften in mehr oder weniger enger Beziehung. Er beeinflusst die Prozesse der Bodenbildung und Reaktionen in Böden 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. Die Anteile anthropogener Säuren an der Gesamtsäurebelastung von Böden nimmt bei pH-Werten unter 6 deutlich zu. Böden im Austausch- (pH 5 - 4.2), Aluminium- (pH 4.2 - 2.8) und Eisenpuffer (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_3 ,

...). Eine Folge der Säurepufferung ist die ständige Abnahme der Pufferkapazität und somit eine allmähliche Erschöpfung der natürlichen Pufferfunktion. Die Böden degradieren irreversibel.

Wie gezeigt werden konnte sind die Folgen der Säurebelastung vor allem auf Waldstandorten relevant. Die Oberböden von sechs der acht untersuchten Waldstandorte sind stark versauert. Auf zwei Waldstandorten (Nr. 3 und 4) ist bereits eine profillumfassende starke Versauerung feststellbar. Auf diesen Standorten hat die Pufferung der Säuren eine fortgeschrittenen Auflösung (Verwitterung) der Tonminerale und Silikate bewirkt und zu Auswaschungen von Nährstoffen geführt (Abb. 11). In der Bodenlösung treten verstärkt Aluminium-Ionen auf (Abb. 12). 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. Damit gehen ökologisch relevante Vorgänge einher, welche den Boden in seiner stofflichen Zusammensetzung verändern und so insbesondere die Filter- und Pufferfunktion erschöpfen. Diese Veränderungen werden nicht ohne Auswirkungen auf die Mengen und das Artenspektrum von Fauna und Flora bleiben.

Veränderungen des Bodenzustandes durch Bodenversauerung liessen sich im KABO St. Gallen anhand verschiedener Bodenkennwerte nachweisen. Höhe der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}, entspricht der Summe austauschbarer Kationen in Böden), Zusammensetzung des Kationenbelages und 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} kennzeichnet ein Potential, welches durch die Prozesse der Bodenbildung (Verwitterung, Verlagerung, Humusbildung) verändert wird. Insbesondere die Mineralverwitterung durch die Reaktion mit Säuren verbraucht dieses Potential mit der Zeit. Böden im Aluminium und Eisenpufferbereich weisen in der Regel deutlich tiefere Kationenaustauschkapazitäten auf, als weniger stark versauerte Böden. In Abb. 11 ist die Abhängigkeit der Basensättigung vom pH dargestellt. Obwohl die absoluten Werte auf methodische Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Basensättigung hindeuten, ist doch der Verlauf der Daten grundsätzlich plausibel. 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. 12).

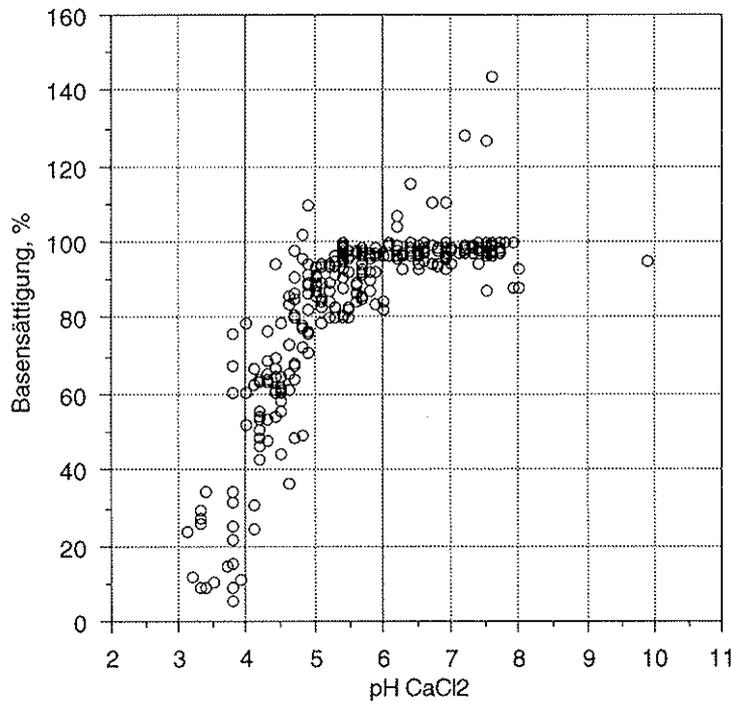


Abb. 11: Basensättigung in Abhängigkeit vom pH

Eine abnehmende Basensättigung mit sinkenden pH-Werten ist plausibel. Allerdings sind die absoluten Werte der Sättigungsgrade unwahrscheinlich, d.h. sie sind zu hoch. Bei pH 5 wird z.B. eine Basensättigung von ca. 90 % berechnet, erwartet werden können hingegen ca. 50 %. Sättigungsgrade > 100 % sind ebenfalls unlogisch und dürften auf Messfehler bzw. auf unsachgemässe Methodenanwendungen zurückzuführen sein.

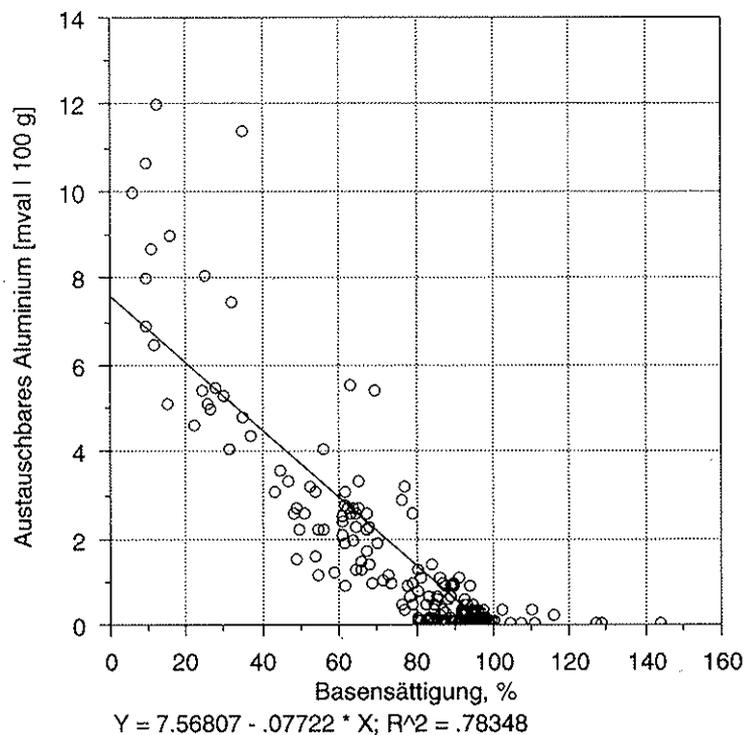


Abb. 12: Austauschbares Aluminium in Abhängigkeit von der Basensättigung

Mit abnehmender Basensättigung (entspricht einer zunehmenden 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.

Zusammenfassung und Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Das Kantonale Bodenbeobachtungsnetz hat zum Ziel, den Bodenzustand und relevante Einwirkungen - insbesondere Schwermetalle und Säuren - zu erfassen, mögliche schädliche Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und durch Gegenmassnahmen bereits im Ansatz zu verhindern.

Aufgrund der Auswertung der Daten aus der Erstbeprobung der Beobachtungsstandorte ist von flächendeckenden, anthropogenen (von Menschen verursachten) Schwermetallanteilen in den Böden des Kantonsgebietes auszugehen. Die Schwermetallgehalte sind dabei stark von der Nutzung sowie von der Schadstoffexposition und der Nähe der Standorte zu Siedlungsgebieten abhängig. Mit fortschreitenden Schwermetalleinträgen wird das Belastungspotential, sprich die Schwermetallgehalte, vor allem auf Landwirtschaftsstandorten aber auch auf siedlungsfernen Waldstandorten weiter ansteigen.

Das Belastungsrisiko, d.h. die Gefahr der biologischen Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden oder über eine Auswaschung ins Grundwasser, wird allerdings weniger durch die Totalgehalte als vielmehr durch die löslichen Gehalte bestimmt. Hier zeigt sich, dass vor allem die überwiegend sauren und stark sauren Waldstandorte bei unauffälligen Totalgehalten hohe lösliche Gehalte aufweisen und somit ein Belastungsrisiko darstellen.

Die Bodenversauerung stellt auf landwirtschaftlich genutzten Böden infolge der Düngung in der Regel kein Problem dar, hingegen sind die Waldstandorte teilweise profilumfassend stark versauert, so dass die Böden bezüglich ihrer Puffer- und Filterfunktion als degradiert zu bezeichnen sind. Auf diesen Standorten finden vertikale Schwermetallverlagerungen statt.

Die Einschätzung relativer Bindungsstärken der Böden gegenüber Schwermetallen stellt ein geeignetes Verfahren zur Beurteilung der Filterfunktion bzw. der Schwermetallmobilität dar. In Verbindung mit gemessenen Schwermetallgehalten ist eine Prognose des Belastungsrisikos möglich. Problematisch sind demnach Standorte, welche deutliche Schwermetallanreicherungen aufweisen und bezüglich ihrer Filtereigenschaften sensibel auf Änderungen reagieren. Aus der Tabelle 4 wird deutlich, dass dies insbesondere Böden im schwach sauren bis sauren Milieu betrifft. Auf diesen Standorten ist mit einer deutlichen Schwermetallmobilisierung bei leichten pH-Absenkungen zu rechnen.

Die Bodenversauerung bewirkt neben einer zunehmenden Mobilisierung von Schwermetallen auch eine Freisetzung von Aluminium und eine Auswaschung von Nährstoffen sowie eine irreversible Zerstörung von Silikaten und Tonmineralen. Die Böden verarmen.

Die wesentlichen Resultate der Auswertungen werden wie folgt zusammengefasst (siehe auch Tab. 4):

- Richtwertüberschreitungen für die Totalgehalte nach VSBo liessen sich an einem Standort (Grünfelswiese) für Pb, Cd und Cu feststellen. Diese Situation ist ursächlich mit

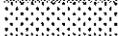
- der Nutzung (Wiese) in Verbindung mit erhöhten atmosphärischen Einträgen (Siedlungsstandort) erklärbar.
- Richtwertüberschreitungen für die löslichen Gehalte (Cd und Zn) waren bei vermeintlich tiefen Totalgehalten an 9 Standorten (36 %) feststellbar. Diese Standorte sind im Sinne der VSBo belastet. Schädliche Auswirkungen auf Organismen sind nicht mehr auszuschliessen.
 - Vergleiche der Schwermetalltotalgehalte von Ober- und Unterbodenproben indizieren deutliche anthropogene Schwermetallanteile auf 12 Standorten (48 %) und weniger deutlich ausgeprägt auf 4 Standorten (16 %).
 - An mindestens 9 Standorten (36 %) ist aufgrund der Schwermetallprofile (lösliche und totale Gehalte) von vertikalen Verlagerungsprozessen der relativ mobilen Schwermetalle (Cd, Zn, Ni) auszugehen. Oberbodenproben dieser Standorte sind daher nicht mehr geeignet, das kumulative Ausmass der Schwermetallbelastung anzuzeigen. Diese Diagnose wird durch entsprechend tief eingeschätzte Bindungsstärken der Böden gegenüber Schwermetallen erhärtet. Lediglich Pb und Hg scheinen unter diesen Bedingungen weitgehend immobil zu sein. Für diese Schwermetalle sind Anreicherungen auch auf siedlungsfernen Standorten nachweisbar.
 - An drei Standorten ist das Rückhaltevermögen der Böden gegenüber Schwermetallen profilmfassend eingeschränkt. Diese Standorte stellen keine Senken mehr für Schwermetalle dar, so dass eine Migration von Schwermetallen in tiefer liegende Schichten (potentielle Gefahr einer Grundwasserbelastung) angenommen werden muss.
 - Stark saure Böden (9 Standorte oder 36 %) sind aufgrund des eingeschränkten Rückhaltevermögens für Schwermetalle als degradiert zu bezeichnen und weisen somit das höchste Belastungsrisiko (Grundwassergefährdung und biologische Aufnahme) auf. Die Degradation dieser Böden ist eine Folge der natürlichen und anthropogenen Bodenversauerung und bezieht sich hier auf die damit einhergehende Abnahme des Rückhaltevermögens gegenüber Schwermetallen aber auch gegenüber Nährstoffen und der Filterfunktion insgesamt.
 - Die Schwermetalltotalgehalte von Cd, Cr, Cu und Zn weisen eine deutliche Nutzungsabhängigkeit auf und sind im Zusammenhang mit Einträgen über die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zu sehen.
 - Deutlich höhere Pb-, Cd-, Cu- und Zn-Gehalte auf siedlungsnahen Wieslandstandorten indizieren zusätzliche atmosphärische Schwermetalleinträge.
 - Standorte mit "grosser" Schadstoffexposition sind durch höhere Pb-, Cd-, Cu-, Hg- und Zn-Totalgehalte gekennzeichnet. Diese Beobachtung impliziert verstärkt atmosphärische Einträge.
 - Waldstandorte weisen im Vergleich zu Wieslandstandorten markant tiefere pH-Werte und folglich deutlich höhere lösliche Schwermetallgehalte auf.
 - Eine deutlich weiter fortgeschrittene Versauerung auf siedlungsnahen im Vergleich zu siedlungsfernen Waldstandorten ist ein Indiz für stärkere atmosphärische Säurebelastungen in siedlungsnähe.

Tab. 4: Zusammenfassende Beurteilung der KABO-Standorte

| Standorte | | Schwermetallgehalte (nach VSBo) | | Schwermetallanreicherung | | Säure- grad | Schwermetalle - Auswirkungen | |
|--------------------|---------|------------------------------------|---------|--------------------------|----------------|----------------|---------------------------------|-----------------------|
| Flurname (Nr.) | Nutzung | total | löslich | anthropogene Anteile | Ursachen | pH | Mobilität | Belastungs- risiko |
| Rheinhof (58) | Wiese | Cu, Ni | | + | Ldw. | 7.3 | + | + |
| Glausenberg (13) | Wiese | | | +++ | Ldw., Exp. | 6.9 | + | + |
| Sommerswis (15) | Wiese | | | +++ | Ldw., Exp. | 6.8 | + | + |
| Foren (6) | Wiese | Pb, Cu, Ni | | +++ | Ldw., Exp. | 6.6 | + | + |
| Gaspuswald (76) | Wald | Pb, Cd | | +++ | Exp. | 6.2 | + | + |
| Langmatt (12) | Wiese | | | + | Ldw. | 5.9 | + | + |
| Hohfirst (95) | Wiese | | | +++ | Ldw., Exp. | 5.9 | + | + |
| Mooswiese (81) | Wiese | Pb | | +++ | Ldw., Siedl. | 5.7 | + | + |
| Delgg (93) | Wiese | | | +++ | Ldw., Exp. | 5.5 | + | + |
| Alp Ruhegg (9) | Wiese | | | +++ | Ldw., Exp. | 5.4 | + | ++ |
| Grünfelswiese (82) | Wiese | Pb, Cd, Cu | Zn | +++ | Ldw., Siedl. | 5.4 | + | ++ |
| Alp Ergeten (7) | Wiese | | | +++ | Exp., Ldw. | 5.2 | + | ++ |
| Hals (8) | Wiese | | | + | Ldw. | 5.1 | + | + |
| Wies (94) | Wiese | | | + | Exp., Ldw. | 5.1 | + | + |
| Riedern (14) | Wiese | | | +++ | Ldw., Exp. | 5.0 | ++ | ++ |
| Lüsis (174) | Wiese | | | +++ | Exp., (Ldw.) | 4.8 | ++ | ++ |
| Windegg (11) | Wiese | Cd | Zn | o | Exp., (Ldw.) | 4.6 | +++ | +++ |
| Wilket (2) | Wald | | Zn | o | Exp. | 4.4 | +++ | +++ |
| Hinterwald (3) | Wald | | Zn | oo | Exp. | 4.3 | +++ | +++ |
| Alp Gössigen (10) | Wiese | Cd | Zn | oo | Exp., (Ldw.) | 4.3 | +++ | +++ |
| Tödigerhütte (75) | Wald | Pb | Zn | o | Exp. | 4.2 | +++ | +++ |
| Breitmooswald (5) | Wald | | Cd, Zn | o | Exp. | 3.5 | +++ | +++ |
| Bernhardzell (1) | Wald | | Zn | o | (Siedl., Exp.) | 3.3 | +++ | +++ |
| Heumoos (4) | Wald | | Cd, Zn | oo | Siedl., Exp. | 3.3 | +++ | +++ |
| Nieselberg (53) | Wald | Ni | Zn | o | Siedl., Exp. | 3.3 | +++ | +++ |

Legende:

 Richtwertüberschreitung (fett)

 > 2/3 des entsprechenden Richtwertes

Ldw. Landwirtschaft (Wiese)

Exp. Schadstoffexposition

Siedl. Siedlung

+ gering

++ mittel

+++ gross

o Oberböden sind wegen Schwermetallverlagerungen nicht geeignet, Anreicherungen anzuzeigen

oo Senkenfunktion für Schwermetalle ist profillumfassend eingeschränkt

Empfehlungen

Die Auswertung zur Erstbeprobung der KABO-Standorte stellt eine Grundlage für die Ableitung von Empfehlungen für weitere Beprobungen der Dauerbeobachtungsflächen dar. Die Empfehlungen orientieren sich an den Eingangs formulierten Zielen der Kantonalen Bodenbeobachtung.

Differenzierung des Beprobungsnetzes

Stark versauerte Standorte, Standorte mit einem hohen Schadstoffbelastungspotential und einer Empfindlichkeit gegenüber diesen Einwirkungen sowie Standorte auf denen verstärkt Schadstoffanreicherungen zu erwarten sind, stellen Problemflächen dar. Im Sinne eines optimalen Mitteleinsatzes wird daher empfohlen, die Standorte in ihrer Intensität und entsprechend ihrer Belastung bzw. Empfindlichkeit gegenüber Einwirkungen differenziert zu beproben. 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. Grundsätzlich sollten so sämtliche Parameter bezüglich ihres Informationswertes im Hinblick auf die jeweiligen Fragestellungen bzw. standörtlichen Anforderungen überprüft werden. Es wird daher vorgeschlagen, ein Grundprogramm von Parametern zu erstellen, welches auf allen Standorten zur Anwendung kommt, und darüber hinaus ein Intensivprogramm, welches sich nach den jeweiligen spezifischen Anforderungen richtet.

Einbezug von Daten aus anderen Umweltkompartimenten

Um die zeitliche Entwicklung in Bezug auf Schadstoffbelastungen sowie bezüglich der Bodenversauerung besser abschätzen zu können, sind Messungen bzw. Abschätzungen der Schadstoffeinträge an ausgewählten Standorten sinnvoll. 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.

Stoffflussbilanzierungen

Stoffflussbilanzierungen stellen im eben erwähnten Sinne einer integrierten Umweltbeobachtung besonders auf Landwirtschaftsstandorten ein geeignetes Instrument dar, um Anreicherungen und Abreicherungen 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.

Qualitätssicherung

Sollen derartige Untersuchungen wissenschaftlich oder juristisch belangvoll sein, so sind grundsätzlich Kriterien wie Nachvollziehbarkeit, Genauigkeit und Vergleichbarkeit zu erfüllen. Diesen Qualitätsansprüchen kommt bei langfristig angelegten Projekten besondere Bedeutung

zu. Die Auswertung der Daten lässt in dieser Hinsicht teilweise erhebliche methodische Probleme vermuten. Für die Sicherung der Qualität werden folgende Massnahmen empfohlen:

- Kontrolle der Messungen durch Check-, Blind- und Standardproben.
- Doppelbestimmungen von Stichproben durch unabhängige Labors.
- Standardisierung der Methoden und Arbeitsgänge (Methodenhandbuch.
- Dokumentation aller Arbeitsgänge von der Probenahme bis zur Analyse (vorbereitete Protokollblätter).

Prüfung und Einbezug weiterer Kenngrössen

Ein derartiges Messprogramm muss neuen Entwicklungen und Erkenntnissen gegenüber offen bleiben. Insbesondere ist die Aufnahme aussagekräftiger Bioindikatoren zu prüfen.

Zukünftig ist das Messprogramm um organische Schadstoffe zu erweitern (z.B. PCB, PAK). Die Relevanz organischer Schadstoffe dürfte im Vergleich zu den Schwermetallen zunehmen.

Literaturverzeichnis

- DVWK, 1988: Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil 1: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 212.
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F.X. und H. Sticher, 1990: Bodenökologie. Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Meyer K., 1991: Bodenverschmutzung in der Schweiz. Themenbericht NFP 22 "Boden", Bern-Liebfeld.
- NABO, 1993: Nationales Bodenbeobachtungsnetz. Messresultate 1985-1991. Schriftenreihe Umwelt Nr. 200, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.) , Bern.
- Schulin R., 1994: Bodenschutz - Grundzüge. Unterlagen zur Vorlesung. Institut für Terrestrische Ökologie, ETH-Zürich.
- Vogel H., A. Desales und H. Häni, 1989: Schwermetallgehalte in den Böden der Schweiz. NFP 22 Boden, Liebfeld-Bern.

| Abbildungsverzeichnis | Seite |
|---|--------------|
| Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Bodenprofils | 4 |
| Abb. 2: Einige Bodentypen im KABO St. Gallen. Fünffach überhöhter Gelände- Querschnitt durch den Kanton in Nord-Süd-Richtung | 5 |
| Abb. 3: Wahl der Beobachtungsstandorte nach unterschiedlichen standörtlichen Kriterien | 9 |
| Abb. 4: Arbeitsablauf und Messprogramm im KABO-St. Gallen | 10 |
| Abb. 5: Lesehilfe zu den Box-Plots | 16 |
| Abb. 6: Schwermetalltotalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Nutzung | 17 |
| Abb. 7: Schwermetalltotalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach der Entfernung zu Siedlungen | 18 |
| Abb. 8: Schwermetalltotalgehalte in Prozent der Richtwerte differenziert nach Schadstoffexposition | 19 |
| Abb. 9: Abhängigkeit der pH-Werte von der Nutzung | 20 |
| Abb. 10: Cd-Löslichkeit in Abhängigkeit der relativen Bindungsstärken der Oberböden für Cd | 21 |
| Abb. 11: Basensättigung in Abhängigkeit vom pH | 27 |
| Abb. 12: Austauschbares Aluminium in Abhängigkeit von der Basensättigung | 27 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tab. 1: Totale und lösliche Schwermetall- und Fluorgehalte (nach VSBo) der KABO- Standorte, Oberbodenproben (0 - 20 cm) | 13 |
| Tab. 2: Quotienten von Ober- und Unterbodentotalgehalten zur Abschätzung anthropogener Schwermetallanteile | 15 |
| Tab. 3: Parameter zur Beurteilung der Schwermetallbelastung (Oberböden), sortiert nach abnehmenden pH-Werten | 22 |
| Tab. 4: Zusammenfassende Beurteilung der KABO-Standorte | 30 |