



b
**UNIVERSITÄT
BERN**

Zusammenfassender Bericht über bestehende Studien und Untersuchungen zu geogenen Schadstoffgehalten in Böden und Gesteinen der Schweiz

Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Von Lucija Stanisic, Juliet Blum und Moritz Bigalke

Vom Geographischen Institut der Universität Bern

07.12.2021

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Boden und Biotechnologie, Sektion Boden, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Geographisches Institut Universität Bern

Autorinnen und Autoren: Lucija Stanisic, Juliet Blum und Moritz Bigalke

Begleitung BAFU: Alice Badin, Leonard Zourek, Stephanie Zimmermann

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	1
Zusammenfassung	2
1. Einleitung.....	5
2. Methodik	8
2.1 Datensammlung	8
2.2 Formatierung und Aufbereitung der Daten	9
2.3 Aufschluss- und Messmethodenvergleich	10
2.4 Deskriptive Statistik	11
2.5 Visualisierung der potentiellen geogenen Bodenbelastung.....	12
2.6 Verhältnis Ober- zu Unterboden.....	13
2.7 Vergleich der Daten zu Metallkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser und in den Böden/Gestein.....	13
3. Resultate und Diskussion.....	14
3.1 Aufschluss- und Messmethodenvergleich	19
3.2 Geogene Bodenbelastungen.....	26
3.3 Visualisierung der potentiellen geogenen Bodenbelastung.....	28
3.3.1 Arsen (As).....	29
3.3.2 Cadmium (Cd)	30
3.3.3 Kobalt (Co)	31
3.3.4 Chrom (Cr).....	32
3.3.5 Kupfer (Cu).....	33
3.3.6 Quecksilber (Hg).....	34
3.3.7 Nickel (Ni)	35
3.3.8 Blei (Pb).....	36

3.3.9 Antimon (Sb).....	37
3.3.10 Thallium (Tl).....	38
3.3.11 Zink (Zn)	39
3.3.12 Fazit zur Visualisierung der potentiellen geogenen Bodenbelastung	40
3.4 Verhältnis Ober- zu Unterboden	41
3.5 Vergleich der Daten zu Metallkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser und in den Böden/Gestein	43
3.5.1 Arsen (As).....	44
3.5.2 Cadmium (Cd)	45
3.5.3 Kobalt (Co)	46
3.5.4 Chrom (Cr).....	47
3.5.5 Kupfer (Cu).....	48
3.5.6 Nickel (Ni).....	49
3.5.7 Blei (Pb).....	50
3.5.8 Antimon (Sb).....	51
3.5.9 Thallium (Tl).....	52
3.5.10 Zink (Zn)	53
3.5.11 Fazit zum Vergleich der Daten zu Metallkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser und in den Böden/Gestein	54
4. Schlussfolgerung	55
5. Literatur	56
6. Anhang	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herkunft aller Datenpunkte	15
Tabelle 2: Zusammenfassung Anzahl aller Datenpunkte pro Analysematerial (keine Datenpunkte ausgeschlossen).....	15
Tabelle 3: Zusammenfassung Anzahl aller Datenpunkte pro Aufschluss- bzw. Messmethode (keine Datenpunkte ausgeschlossen).....	16
Tabelle 4: Zusammenfassung der Parameter der Regressionsanalyse zwischen 2 M Salpetersäure (VBBo total)- und Königswasser-Aufschluss (KW) und XRF	25
Tabelle 5: Anzahl, Spanne, Mittelwerte und Anzahl der Standorte, an denen Richt-, Prüf und Sanierungswerte überschritten werden. Zu jedem Element gibt es zwei Zeilen. Die obere Zeile zeigt Werte nach VBBO, oder darauf umgerechnete Werte. Die untere Zeile zeigt Werte nach Königswasser-Aufschluss oder darauf umgerechnete Werte. Es ist jeweils die relevante Zeile hervorgehoben, je nachdem ob sich die Werte auf die VBBo oder auf Eikmann et al. (1999) beziehen. Für die nicht umgerechneten Werte (Ba, Hg, Mo, Sb, Sn) unterscheiden sich die Anzahl der Datenpunkte stark und sind nicht vergleichbar, da sie von unterschiedlichen Proben stammen.....	27
Tabelle 6: Beschreibung der Spalten und Attribute der Datenbank.....	58
Tabelle 7: Anzahl aller aufgenommenen Datenpunkte pro Kanton.....	62
Tabelle 8: Regelungswerten nach VBBo und Eikmann et al. 1999 (gemäss Anhang. 8, Handbuch Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden, BUWAL 2005).....	63
Tabelle 9: Anzahl aller aufgenommenen Datenpunkte pro Metall	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geographische Darstellung des VBBo-Aufschlusses aller Datenpunkte	17
Abbildung 2: Geographische Darstellung der Aufschluss- bzw. Messmethoden aller Datenpunkte (ausgenommen: nach VBBo-Aufschluss analysierte Datenpunkte).	18
Abbildung 3: Die Boxplots (25 %-Quantil, Median, 75 %-Quantil) zeigen die Wiederfindung in % der verschiedenen Metalle (VBBo/ Königswasser *100) bzw. den prozentualen Anteil der gemessenen Metallbelastung durch VBBo- Aufschluss im Vergleich zum Königswasser-Aufschluss.....	19
Abbildung 4: Einfache Regressionsanalyse zwischen Salpetersäure- und Königswasser-Aufschluss für Arsen (As), Cadmium (Cd), Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Molybdän (Mo) und Antimon (Sb).	21
Abbildung 5: Einfache Regressionsanalyse zwischen der Wiederfindungsrate (Salpetersäure- und Königswasser-Aufschluss) und pH für Arsen (As), Cadmium (Cd) und Blei (Pb).	22
Abbildung 6: Die Boxplots (25 %-Quantil, Median, 75 %-Quantil) zeigen die Wiederfindung in % (Salpetersäure-/ Königswasser-Aufschluss *100) und dem Ausgangsgestein für Cadmium (Cd) und Blei (Pb).....	22
Abbildung 7: Die Boxplots (25 %-Quantil, Median, 75 %-Quantil) zeigen die Wiederfindung in % der verschiedenen Metalle (Salpetersäure: XRF) bzw. den prozentualen Anteil der gemessenen Metallbelastung durch VBBo-Aufschluss im Vergleich zu XRF..	24
Abbildung 8: Einfache Regressionsanalyse zwischen Salpetersäureaufschluss und XRF für Cadmium (Cd) und Chrom (Cr).....	24
Abbildung 9: Untersuchungsstandorte für Arsen (As).....	29
Abbildung 10: Untersuchungsstandorte für Cadmium (Cd).	30

Abbildung 11: Untersuchungsstandorte für Kobalt (Co).	31
Abbildung 12: Untersuchungsstandorte für Chrom (Cr).....	32
Abbildung 13: Untersuchungsstandorte für Kupfer (Cu).	33
Abbildung 14: Untersuchungsstandorte für Quecksilber (Hg).....	34
Abbildung 15: Untersuchungsstandorte für Nickel (Ni).	35
Abbildung 16: Untersuchungsstandorte für Blei (Pb).....	36
Abbildung 17: Untersuchungsstandorte für Antimon (Sb).....	37
Abbildung 18: Untersuchungsstandorte für Thallium (Tl).....	38
Abbildung 19: Untersuchungsstandorte für Zink (Zn).	39
Abbildung 20: Verhältnis von Ober- zu Unterboden für Arsen (As).	42
Abbildung 21: Verhältnis von Ober- zu Unterboden für Cadmium (Cd).	42
Abbildung 22: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Arsen (As).....	44
Abbildung 23: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Cadmium (Cd).	45
Abbildung 24: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Kobalt (Co).	46
Abbildung 25: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Chrom (Cr).....	47
Abbildung 26: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Kupfer (Cu).	48
Abbildung 27: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Nickel (Ni).	49
Abbildung 28: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Blei (Pb).....	50
Abbildung 29: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Antimon (Sb).....	51
Abbildung 30: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Thallium (Tl).....	52
Abbildung 31: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Zink (Zn).	53

Danksagung

Die Autorschaft dankt allen in diesem Projekt involvierten Personen. Den folgenden Institutionen, Kantonen und Personen wird ausdrücklich für ihre Mitarbeit bzw. Bereitstellung ihrer Daten gedankt:

- Den Kantonen (Aargau, Basel-Land, Bern, Freiburg, Graubünden, Obwalden, Schwyz, Solothurn, Tessin und Thurgau), die Daten über NABODAT zur Verfügung gestellt haben.
- Den Kantonen St.Gallen (Amt für Umwelt), Tessin (Sezione della protezione dell'aria dell'acqua e del suolo), Wallis (Amt für Altlasten, Boden und Grundwasser) und Zürich (Amt für Landschaft und Natur – Fachstelle Bodenschutz) für die direkte Weiterleitung Ihrer Daten.
- Den Ingenieurbüros, HOLINGER AG und Pegeol AG, für die Bereitstellung von Daten.
- Der Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) für die Datenübermittlung.
- Prof. Lenny Winkel von der ETH Zürich, Prof. Emeritus H.-R. Pfeifer von der Universität Lausanne, Prof Jean-Michel Gobat von der Universität Neuenburg und, Prof. Niklaus Zimmermann von der WSL, für die Bereitstellung von Publikationen und den darin enthaltenen Daten.
- Der Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) für die Initialisierung der Untersuchung und wertvolles Feedback.
- Dem Bundesamt für Umwelt BAFU – Abteilung Boden und Biotechnologie für die Initialisierung der Untersuchung und die fachliche Begleitung der Arbeit.
- Nationale Bodeninformationssystem (NABODAT) für die Bereitstellung der Daten.
- Dem Bundesamt für Umwelt BAFU – Abteilung Hydrologie für die Bereitstellung der Grundwasserdaten der Nationalen Grundwasserbeobachtung (NAQUA)
- Dem Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) für die Übermittlung der Trinkwasserdaten.

Zusammenfassung

In den Böden können Metalle auch ohne anthropogene Einträge lokal in hohen Konzentrationen vorkommen. Unter solchen Gegebenheiten spricht man von «geogenen Bodenbelastungen». Zur Unterstützung der Kantone im Umgang mit geogenen Bodenbelastungen ist die Erstellung eines Berichtes über bestehende Studien und Untersuchungen zu geogenen Schadstoffen in Böden und Gesteinen in der Schweiz das Ziel dieses Projektes. Der in diesem Projekt generierte Datensatz, wird wieder in das NABODAT eingespeist und steht damit dem Vollzug zur Verfügung. Des Weiteren werden die Daten in einem anschliessenden Projekt, mit aktuellen Messwerten zusammengefasst und geostatistisch und kartographisch aufbereitet.

Insgesamt wurden 152'212 Datenpunkte in die Datenbank eingespeist. Diese kamen zu einem grossen Teil von NABODAT, direkt aus den einzelnen Kantonen und von der WSL. Ferner wurden Daten aus 41 wissenschaftlichen Publikationen und Berichten in die Datenbank aufgenommen. Es wurden auch Daten aus Gutachten von zwei Ingenieurbüros einbezogen. Nach Möglichkeit wurden Informationen über pH-Werte, organischen Kohlenstoff und Humusgehalt an den Standorten in die Datenbank eingezogen. Dazu wurden individuelle Spalten für diese Bodenkennwerte erstellt. Die Daten wurden aufbereitet, bereinigt und einheitlich formatiert, um die Einspeisung der Daten in NABODAT vorzubereiten.

Für die Bestimmung und Quantifizierung der Metalle wurden verschiedene Aufschluss- und Messmethoden eingesetzt. Die 2 M Salpetersäure (Verordnung über Belastungen des Bodens; VBBo total) war die am häufigsten verwendete Aufschlussmethode. In den Kantonen BL und SO wurden jeweils 155 Standorte (insgesamt 2067 Datenpunkte) mit der VBBo-Methode und dem Königswasser-Aufschluss analysiert. Bei dem Vergleich der Datensätze ist zu beachten, dass bei der VBBo nur Feinmaterial < 2 mm untersucht wird. Bei dem Königswasser-Aufschluss wird im Gegensatz das gesamte Material (auch Grobmaterial) auf eine Korngrösse < 2 mm aufgemahlen (in diesem Fall ist die angewandte Methodik gemäss der Verordnung zur Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen). Daher können sich die Proben in Ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Im Kanton Zürich wurden 414 Standorte (insgesamt 6144 Datenpunkte) erfasst, die jeweils mit der VBBo-Methode und mit dem Röntgenfluoreszenzspektrometer (XRF, Laborgerät) gemessen wurden. Anhand dieser zweifach gemessenen Proben konnte mittels Regressionsanalyse der Korrekturfaktor für den Königswasser-Aufschluss bzw. XRF gegenüber der VBBo-

Methode eruiert und angewendet werden.

Folglich wurden an den Standorten, wo mittels VBBo-Methode, Königswasser-Aufschluss und Röntgenfluoreszenz gemessen wurde, zwei Werte für die Metallgehalte erfasst, nämlich der ursprünglich gemessene Wert und der daraus errechnete VBBo-Wert. Die Wiederfindungsrate zwischen dem VBBo-Aufschluss und dem Königswasser-Aufschluss weist teilweise eine grosse Variabilität auf. Um die Variabilität zu reduzieren wurden der pH-Wert, der organischen Kohlenstoffgehalt und das Ausgangsgestein als weitere erklärende Faktoren untersucht. Der Einbezug der zusätzlichen Parameter brachte allerdings keine Verbesserung der Korrelationen. Der Aufschluss- bzw. Methodenvergleich zeigte, dass der VBBo-Aufschluss für die meisten Metalle im Vergleich zu Königswasser-Aufschluss und XRF eine deutlich geringere Extraktionseffizienz aufweist. Insbesondere für Arsen, Chrom, Molybdän, Antimon, Thallium, Uran und Vanadium liegt die Wiederfindungsrate beim VBBo-Aufschluss unter 50 % im Vergleich zum Königswasser-Aufschluss.

Die räumliche Darstellung der Metallkonzentrationen zeigte für verschiedene Metalle (z.B. Arsen, Chrom, Nickel und Zink) eine lokale Anreicherung. Besonders im kristallinen Teil der Alpen sind hohe geogene Metallbelastungen zu beobachten. Diese treten vor allem im Unterwallis (Region um Martigny), im Südtessin und in Graubünden auf. Aber auch im Jura finden sich erhöhte Konzentrationen einzelner Elemente (Arsen und Cadmium). Erhöhte Konzentrationen im Boden können lokal durch das Vorkommen von Gesteinen mit generell hohen Metallgehalten erklärt werden (Tuchs Schmid, 1995). Allerdings erklären die Ausgangsgesteine allein oft nicht die hohen oder sehr hohen Konzentrationen, sondern es kommen oft weitere lokale Faktoren (lokale Anreicherung, Verwitterung etc.) hinzu.

Von den Kantonen wurden nur Daten übermittelt, für die ein geogener Ursprung vermutet wurde. Trotzdem ist es wahrscheinlich, dass auch einzelne Standorte mit anthropogene Belastungen unwissentlich aufgenommen wurden. Anthropogene Metalle sind oft im Oberboden angereichert. Entsprechend wurden die Werte des relativen Unterschieds des Ober- und Unterbodens in der Datenbank abgelegt. Das Verhältnis der Metallkonzentration von Oberboden zu Unterboden kann zur Beantwortung der Frage nach dem Ursprung der Belastung allerdings nur unzureichend beantworten, da auch geogen Anreicherungen im Oberboden vorliegen können. Gegebenenfalls müssen für die einzelnen Standorte weitere Abklärungen durchgeführt werden, um die genauen Quellen der Metalle zu identifizieren.

Im Boden vorkommende Metalle geogenen Ursprungs können auch im Grundwasser beobachtet werden (z.B. Pfeifer et al., 2007). Darüber hinaus kann die Grundwasserbelastung auch Hinweise auf bisher unbekannte geogene Bodenbelastungen liefern. Daher wurden die Grundwasser-Daten der NAQUA-Messstellen (der Module TREND und SPEZ) aus der NAQUA-Pilotstudie aus dem Jahr 2018 und die vom Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen gesammelten Trinkwasser-Daten aus dem Zeitraum 2000-2011 einbezogen. Durch den Vergleich von Bodendaten und Wasserdaten konnte für einzelne Regionen und Elemente eine Wechselbeziehung festgestellt werden. Einzelne Elemente wie Chrom, Kupfer und Zink waren im Wasser in einigen Regionen flächendeckend erhöht. Inwieweit dies ein Hinweis auf unbekannte geogene Bodenverunreinigungen ist, ist schwierig zu beurteilen. Insbesondere die erhöhten Kupfer- und Zinkkonzentrationen in den Wasserproben können durch Leitungen/technische Anlagen verfälscht sein.

1. Einleitung

Um die Kantone bei dem Umgang mit geogen bedingten Bodenbelastungen zu unterstützen wurden die bestehenden Daten zu geogenen Bodenbelastungen in der Schweiz gesammelt und digital verfügbar gemacht. Das Projekt bezieht sich auf ein vom CercleSol formuliertes Pflichtenheft (Brief vom 11.04.2019 an die Sektion Boden des BAFU). Unter Ziel 1 ist ein «Zusammenfassender Bericht über bestehende Studien und Untersuchungen zu geogenen Schadstoffgehalten in Böden und Gesteinen der Schweiz» definiert. Als Methoden sind das «Literaturstudium von wissenschaftlichen Arbeiten und Untersuchungen im Inland und nahen Ausland; aktives Nachfragen bei Kantonen, Universitäten, Fachhochschulen, Ingenieurbüros und bei der NABO bezüglich Studien und unveröffentlichten Untersuchungsergebnissen/Berichten» definiert. Die Erstellung des Verdachtsflächenkatasters wurde im Vertrag 16.0104.PJ / S353-0565 vom BAFU bei Dr. Moritz Bigalke am Geographischen Institut der Universität Bern in Auftrag gegeben. In den 15 Monaten der Projektlaufzeit wurden die folgenden Punkte erarbeitet: Datensammlung bei den Kantonen, Formatierung der Daten aus NABODAT, Formatierung der von Kantonen direkt erhaltenen Daten, Einarbeitung der Daten in die NABODAT Formblätter, Aufschlussvergleich Methoden 2 M Salpetersäure (HNO_3 ; VBBo total), Königswasser-Aufschluss (HNO_3 und HCl), Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF, Labormessgerät), Angabe von Bodenkennwerten pH, Corg und Humus, Integration der vom WSL erhobenen Daten zu Metallen in Waldböden, Sammlung von Publikationen mit relevanten Daten zu Metallen in der Schweiz und Integration der Daten aus den Publikationen, Datensammlung Wasserdaten, Lancierung der «Sommerprojektes» zum Abgleich von Wasserdaten mit potentiellen geogenen Belastungen, Erstellung von Karten zur Visualisierung der Daten.

Zur Unterstützung der Kantone im Umgang mit geogenen Bodenbelastungen ist das Ziel dieses Projektes die Erstellung eines Berichtes über bestehende Studien und Untersuchungen zu geogenen Schadstoffen in Böden und Gesteinen in der Schweiz. Der in diesem Projekt generierte Datensatz, wird wieder in das NABODAT eingespeist und steht damit dem Bund und den Kantonen zur Verfügung. Des Weiteren werden die Daten in einem anschliessenden Projekt unter Leitung von Dr. Reto Meuli (NABO), Prof. Lenny Winkel (ETHZ) und Prof. Ruben Kretschmar (ETHZ) mit aktuellen Messwerten zusammengefasst und geostatistisch und kartographisch aufbereitet. Die

Daten werden dann in einem geochemischen Atlas der Schweiz verarbeitet. Die Darstellung der Daten in Karten in diesem Bericht dient daher der Visualisierung der Datenverfügbarkeit und einer groben Abschätzung der Belastungen. Eine Kartengrundlage mit einer genügenden Auflösung zur genauen räumlichen Zuordnung der Belastungen wird im Folgeprojekt erarbeitet.

Ein Problem, bei der Erfassung der Metallkonzentrationen aus verschiedenen Datenquellen, bereiten die verschiedenen Aufschluss- und Messmethoden, die für die Analyse der Bodenproben gewählt wurden. In der Verordnung über Belastungen von Böden (VBBo) ist für die Ermittlung und Beurteilung von (Gesamt-)Metallgehalten ein Aufschluss mit 2 M Salpetersäure erforderlich. Neben der VBBo-Methode wird aber auch eine Mischung aus konzentrierter Salzsäure (HCl) und konzentriertem HNO₃ im Verhältnis 3 zu 1 (Königswasser; gemäss der Verordnung zur Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen) und die Messung mit XRF breit eingesetzt. Für die Beurteilung der Elemente, die nicht nach VBBo-Methode geregelt sind werden die Bodenwerte I-III nach Eikmann et al. (1999) genutzt. Diese Werte beziehen sich aber auf den Königswasser-Aufschluss. Eine Aktualisierung der Vorschriften ist geplant. Hier wurde beschlossen, die nach den derzeit gültigen Vorschriften gemessenen Werte zu vergleichen, um einen möglichst umfassenden Überblick über die Vorhandenen Daten zu bekommen.

Werden im Boden erhöhte Metallkonzentrationen gefunden ist nicht immer klar, ob die Belastungen aus geogenen und anthropogenen Quellen stammen. Auch wenn in der Datenanfrage explizit nach Daten zur geogenen Bodenbelastung gefragt und die Datenerfassung aus den Publikationen entsprechend aufgebaut wurde, ist eine anthropogene Beeinflussung an einzelnen Standorten wahrscheinlich. Um auf diesen Punkt weiter einzugehen wurde der relativen Unterschiede zwischen der Metallkonzentration von Oberboden und Unterboden an den Standorten berechnet. Während angenommen wird, dass eine geogene Bodenbelastung auch im Unterboden vorhanden ist, konzentrieren sich anthropogene Metalle oft im Oberboden. Entsprechend wurden die Werte des relativen Unterschieds des Ober- und Unterbodens in der Datenbank abgelegt. Allerdings gibt es auch hier zahlreiche Ausnahmen, bei denen geogene Belastungen im Oberboden angereichert sind bzw. anthropogene Belastungen im Profil gleichmässig verteilt sind. Daher erlauben auch diese Daten keine abschliessende Beurteilung, sondern bieten nur eine weitere Information, die zur generellen Beurteilung der Belastungen dienen kann.

Anschliessend an den eigentlichen Bericht wurden (im Rahmen einer studentischen Hausarbeit) auch Daten über Wasserkonzentrationen in der Schweiz erhoben und mit Bodenbelastungen abgeglichen, um mögliche Zusammenhänge aufzuzeigen und potenzielle «Hotspots» zu identifizieren. Dafür wurden die Grundwasser-Daten der NAQUA-Messstellen (der Module TREND und SPEZ) aus der NAQUA-Pilotstudie aus dem Jahr 2018 und die vom Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV) gesammelten Trinkwasser-Daten aus dem Zeitraum 2000-2011 einbezogen.

2. Methodik

2.1 Datensammlung

Zu allen Kantonen, ausschliesslich dem Kanton Glarus, konnte in Folge elektronischer und/oder telefonischer Datenanfrage Kontakt aufgenommen werden. Folgende zehn Kantone sind im Besitz von Daten zu geogenen Bodenbelastungen, welche bereits in NABODAT abgelegt waren und für welche die Nutzung für das Projekt freigegeben werden konnte: Aargau, Basel-Landschaft, Bern, Freiburg, Graubünden, Obwalden, Schwyz, Solothurn, Tessin und Thurgau sowie Daten aus dem Projekt GEMAS (Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing land Soil). Die Kantone Zürich, Wallis, St.Gallen und das Tessin stellten Ihre Daten direkt zur Verfügung. Das Tessin konnte noch (zusätzliche zu den im NABODAT enthaltenen Daten) mobile XRF-Daten zu Arsen zur Verfügung stellen.

Die Kantone Zürich, Wallis, St Gallen und Tessin übergaben ihre Daten direkt an die Uni Bern (anstatt durch NABODAT), da diese Kantone ihre verfügbaren Daten zu Bodenbelastungen (noch) nicht oder erst unvollständig in NABODAT eingespeist hatten. Unter Absprache mit NABODAT wurde beschlossen diese Daten nicht in die Formtabellen der NABODAT einzutragen, da die für die Uni Bern relevanten Daten nur einen Teil der verfügbaren Daten darstellen und die Einspeisung der Daten durch Agroscope ohnehin vorgesehen ist. Die von den Kantonen erhaltenen Daten wurden daher in das von der Universität Bern erstellte Format überführt.

In drei Buchbänden «Waldböden der Schweiz» sind Metallmessungen in Waldbodenprofilen hinterlegt. Die WSL verfügt über diese Daten im digitalen Format, welche die Uni Bern erhalten, nach dem NABODAT-Format formatiert und in diesen Bericht aufgenommen hat.

Eine ausgiebige Literaturrecherche sowie persönliche Anfragen bei den Kantonen, Universitäten und Forschungsanstalten ergab eine Sammlung von ca. 80 Publikationen und Berichten mit potenziell relevanten Daten. Diese Literatur wurde begutachtet und die Daten von 41 Publikationen wurden als relevant für das Verdachtsflächenkataster eingestuft und in die Datenbank eingespeist. Der Anhang enthält das entsprechende Quellenverzeichnis. Es wurden auch Daten aus Gutachten von zwei Ingenieurbüros einbezogen. Nachweis- oder Bestimmungsgrenzen wurden nur berücksichtigt, wenn diese in den Datensätzen angegeben waren.

Der Vergleich von Bodendaten mit Grund- und Trinkwasserdaten erfolgt anhand von Daten, die vom BAFU und vom BLV zur Verfügung gestellt wurden. Die vom BAFU bereitgestellten Grundwasserdaten mit 10'257 Messwertestammen von den NAQUA-Messstellen der Module TREND und SPEZ aus dem Jahr 2018. Die Trinkwasseruntersuchung des BLV wurde im Zeitraum 2000-2011 durchgeführt und umfasst 53'000 Messwerte.

2.2 Formatierung und Aufbereitung der Daten

Um den zeitlichen Aufwand für die Überlieferung der Daten für Agroscope zu optimieren, bedurfte es einer teilweisen Bereinigung und generellen Formatierung der Daten. Die von NABODAT erhaltenen Daten von den Kantonen wurden zur Übersichtlichkeit und Weiterverwendung neu formatiert, d.h.:

- Erstellung einer individuellen Spalte für Metalle und Bodenkennwerte (pH, organischen Kohlenstoff (Corg) und Humus)
- Nach Möglichkeit wurden Informationen über pH-Werte, Corg und Humusgehalt an den Standorten einbezogen
- In einigen Fällen wurden mehrere Messverfahren zur Bestimmung des pH-Wertes pro Standort eingesetzt. Um nur jeweils eine pH-Wert Messung zu erhalten, wurden nach Art der Messmethode in der folgenden Reihenfolge priorisiert: Calciumchlorid (CaCl₂), Wasser (H₂O), Kaliumchlorid (KCl)
- Corg und Humusgehalt wurden teilweise mehrfach und zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt. Um nur eine Messung pro Standort zu erhalten, wurde jeweils die letzte Messung berücksichtigt
- In Spalte Analysematerial: Auswahl Mineralboden oder keine Angabe (Ausschluss «Skelett», «Auflage», «Streu»)
- Ergänzung fehlender Angaben zur Bestimmungsgrenze. Abklärung unter Rücksprache mit Kantonen zu anderen ‚fehlenden‘ Angaben z.B. vor allem bezüglich der Aufschlussmethoden und Ausgangsmaterial
- Erstellung einer individuellen Spalte für den Titel der wissenschaftlichen Publikation
- Erstellung einer separaten Spalte für Bemerkungen bei der Dateneingabe von

wissenschaftlichen Publikationen

Im Anhang (Tabelle 6) ist die Beschreibung der Tabelle und der Attribute beigefügt. Somit ist die reibungslose Nutzung der Daten (speziell auch für die Nutzung in R, statistische Software) zur Entwicklung des Aufschlussvergleichs, Anfertigung der GIS Karten, Datenbeschrieb und -analyse und für eine allfällige statistische Auswertung sichergestellt.

2.3 Aufschluss- und Messmethodenvergleich

Die gemessenen Metallkonzentrationen der beiden Aufschlüsse: VBBo (total) und Königswasser, wurden miteinander verglichen. Die Auswahl der Standorte, innerhalb derer Metalle jeweils mit den VBBo- und Königswasser-Aufschlüssen gemessen wurden, ergaben 2067 zu vergleichende Messwerte für 155 Standorte. 154 Standorte befinden sich im Kanton Basel-Landschaft und einer im Kanton Solothurn. Projektmandant ist in allen Fällen der Kanton Basel-Landschaft. Eine Messung mit VBBo- und Königswasser-Aufschluss war für folgende Elemente vorhanden: Arsen, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Molybdän, Nickel, Antimon, Thallium, Uran, Vanadium und Zink. Bei dem Vergleich der Datensätze ist zu beachten, dass bei der VBBo nur Feinmaterial < 2 mm untersucht wird. Bei dem Königswasser-Aufschluss wird im Gegensatz das gesamte Material (auch Gromaterial) auf eine Korngrösse < 2 mm aufgemahlen (in diesem Fall ist die angewandte Methodik gemäss der Verordnung zur Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen). Daher können sich die Proben in Ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Desweiteren werden die Elemente, die nicht in der VBBo geregelt sind, Bodenwerte nach Eikmann et al. (1999), verwendet. Die Referenzwerte von Eikman et al. (1999) entsprechen den a priori Werten, die nach Königswasser-Aufschluss gemessen wurden. Eine Aktualisierung der Vorschriften ist geplant. Hier wurde beschlossen, die nach den derzeit gültigen Vorschriften gemessenen Werte zu vergleichen.

Zusätzlich wurden die mit dem VBBo (total) Aufschlusses erhaltenen Metallkonzentrationen mit der nicht-destruktiven XRF-Messmethode verglichen. Von den mit dem XRF gemessenen Bodenproben wurden nur die mit einem XRF-Laborgerät analysierten berücksichtigt. An 414 Standorten im Kanton Zürich wurden insgesamt 6144 Datenpunkte mit dem VBBo-Aufschluss und der XRF-Messmethode (Labormessgerät) ermittelt. Für folgende Elemente lag eine Doppelmessung mit dem

VBBo-Aufschluss und der XRF-Messmethode vor: Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink.

In beiden Fällen wurde eine Regressionsanalyse verwendet, um den Korrekturfaktor für die VBBo-Methode zu bestimmen. Als Grundlage diente der Regressionskoeffizient. Fehlende Werte und Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze wurden nicht berücksichtigt. Ausreisser wurden mit Hilfe der Cook'schen Distanz identifiziert und ausgeschlossen. Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Aufschluss- und Messmethoden wurden anhand des p-Werts mit einem Signifikanzniveau von $p < 0.01$ überprüft. Das 95%-Vorhersageintervall wurde wie folgt ermittelt: $(\text{Regressionskoeffizient}/2 * \text{Standardfehler}) * 100$.

Um die Datengrundlage zu vereinheitlichen, d.h. die Daten vergleichbar zu machen und mit den bestehenden Richt-, Prüf- und Sanierungswerten abzugleichen werden die mit den häufigsten angewandten Methoden (Königswasser-Aufschluss und XRF) gewonnenen Daten in VBBo-Werte umgerechnet. Für die Metallgehalte, die mit Königswasser-Aufschluss und XRF gemessen wurden, wurden entsprechend im Datensatz zwei Werte festgehalten, nämlich der Originalwert und der zu VBBo umgerechnete Wert. Dies verbessert die Vergleichbarkeit der Daten. Allerdings sollten die Richt-, Prüf- und Sanierungswerte nach VBBo auch weiterhin mit dem VBBo-Aufschluss verglichen werden, während sich die Bodenwerte nach Eikmann et al. (1999) auf Königswasser-Aufschlüsse beziehen.

Zur Erklärung der Varianzen des Konvertierungsfaktors innerhalb einzelner Metalle wurden der pH-Wert, der organische Gehalt und das Ausgangsgestein näher untersucht. Die Abhängigkeit der Wiederfindungsrate der einzelnen Metalle vom pH-Wert, dem organischen Gehalt und dem Ausgangsgestein wurde mittels Regressionsanalyse ermittelt.

2.4 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik wurde mit R Version 4.1.0 durchgeführt. Zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Elemente wurden die mittels 2 M Salpetersäureaufschluss (VBBo) bestimmten Bodendatenpunkte sowie die transformierten Werte (d. h. Datenpunkte, bei denen ein Königswasser-Aufschluss oder eine XRF-Laborgerät verwendet wurde) berücksichtigt. Zur Vergleichbarkeit der Daten, die nach VBBo-Methode und nach Königswasser bestimmt wurden, wurden

ausserdem noch die nach Königswasser bestimmten Werte und die nach Königswasser transformierten Werte (d. h. Datenpunkte, bei denen die VBBo-Methode verwendet wurde) berücksichtigt. Für die Elemente Quecksilber, Molybdän und Antimon wurden nur die mittels VBBo-Aufschluss/Königswasser determinierten Datenpunkte einbezogen, da kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem VBBo-Aufschluss und dem Königswasser-Aufschluss gefunden wurde und daher keine Werte transformiert werden konnten. Fehlende Messwerte wurden ausgeschlossen. War ein Messwert unterhalb der Quantifizierungsgrenze, wurde die Hälfte der Quantifizierungsgrenze für die Statistik verwendet.

Die Einteilung in verschiedene Konzentrationskategorien erfolgte über den Richt-, Prüf- (Nutzungsart: Futterpflanzenanbau) und Sanierungswert (Nutzungsart: Landwirtschaft und Gartenbau) der VBBo (Tabelle 8). Für die Elemente, für die keine Richt-, Prüf- und/oder Sanierungswerte nach VBBo vorlagen, wurden die Werte nach Eikmann et al. 1999 (gemäss Anhang 8, Handbuch Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden, BUWAL 2005) gewählt.

Für die Basiswerte (vergleichbar mit Richtwerten nach VBBo) wurde jeweils der Wert für die «multifunktionale Nutzung für andere Schutzgüter» gewählt. Prüf- und Eingreifwerte (vergleichbar mit Prüf- bzw. Sanierungswerten nach VBBo) wurde in allen Fällen der Wert für die Nutzung als «landwirtschaftliche Nutzflächen, Obst- und Gemüsebau für andere Schutzgüter» gewählt. Für beide Einstufungen (d.h VBBo und Eikmann et al., 1999) gibt es Grenzwerte, die je nach Art der Verwendung des Bodens höher und/oder niedriger sind.

2.5 Visualisierung der potentiellen geogenen Bodenbelastung

Die Visualisierung der räumlichen Verteilung der Metallkonzentrationen wurde mit ArcMap 10.7.1 durchgeführt. Zur besseren Identifizierung lokal erhöhter Bodenverunreinigungen wurden alle Aufschluss- und Messmethoden berücksichtigt, aber in den Abbildungen unterschiedlich markiert. Die Priorisierung der Layer wurde wie folgt festgelegt: VBBo-Aufschluss, nach VBBo transformierte Werte (wenn vorhanden), andere Aufschluss- oder Messverfahren und Datenpunkte mit dem Analysematerial Gestein.

2.6 Verhältnis Ober- zu Unterboden

Das Verhältnis zwischen Oberboden und Unterboden ist der Quotient aus den beiden Metallkonzentrationen. Innerhalb eines Bodenprofils wurden die kleinste und die maximale Tiefe verwendet. Für Cd wurden keine XRF Daten verwendet, da Cd oft geringe Konzentrationen aufweist, die mit der XRF nicht oder nur ungenau gemessen werden können. Für die anderen Elemente wurden alle Aufschluss- und Analysemethoden berücksichtigt. Der Quotient zwischen den beiden Bodentiefen wurde nur berechnet, wenn beide Datenpunkte die gleiche Aufschluss- bzw. Analysemethoden aufwiesen. Die Quotienten können sich bei verschiedenen Aufschluss- bzw. Analysemethoden unterscheiden. Datenpunkte mit Analysematerial Streu, Skelette oder Gestein wurden ausgeschlossen, um den Vergleich zu standardisieren (nur wenige Standorte hatten Daten dazu, Tabelle 2) und um die Untersuchung auf Mineralboden zu beschränken. Darüber hinaus wurden fehlende Werte und Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze nicht berücksichtigt. Bei mehrfach gemessenen Bodenproben wurde der Mittelwert aus beiden Werten genommen. Entsprechend wurde dieser Parameter in der Datenbank als individuelle Spalte abgelegt.

2.7 Vergleich der Daten zu Metallkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser und in den Böden/Gestein

Im Boden vorkommende Metalle geogenen Ursprungs können eventuell auch im Grundwasser beobachtet werden (z.B. Pfeifer et al., 2007). Darüber hinaus kann die Wasserbelastung auch Hinweise auf bisher unbekannte geogene Bodenbelastungen liefern. Daher wurden ein Datensatz mit 63'257 einzelnen Datenpunkten räumlich mit den in diesem Bericht zusammengefassten Boden-/Gesteinsdaten verglichen. Bei den Visualisierungen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nur Boden-/Gesteinsdaten oberhalb des Prüfwertes berücksichtigt. Des Weiteren wurden alle Aufschluss- und Messmethoden und alle Analysematerialien herangezogen. Bei der Kategorisierung der Wasserdaten war das Ziel, die Konzentrationsverteilung der einzelnen Elemente zu veranschaulichen.

3. Resultate und Diskussion

Insgesamt wurden 152'212 Datenpunkte in die Datenbank aufgenommen. Die Herkunft der Daten ist in Tabelle 1 aufgelistet. Im Anhang ist die Anzahl der erfassten Datenpunkte pro Kanton tabellarisch dargestellt (Tabelle 7). Tabelle 2 zeigt die Aufteilung nach Analysematerial. Für den Grossteil der Daten wurden keine Angaben hinsichtlich des Analysematerials gemacht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich um Boden handelt. Die Metallkonzentration wurde durch verschiedene Aufschluss- und Messmethoden bestimmt, wie aus Tabelle 3 hervorgeht. Der VBBo-Aufschluss (total) war die am häufigsten verwendete Aufschlussmethode und wurde zur besseren Übersichtlichkeit auf einer separaten Karte dargestellt (Abbildung 1). Eine Übersicht über die geografische Verteilung der verschiedenen Aufschlussmethoden und die Verbreitung von XRF ist in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. In Abbildung 2 wird zudem zwischen den erfassten Analysematerialien und Gestein unterschieden. Für die Gesteinsanalyse wurden in fast allen Fällen HF und HNO₃ eingesetzt (N = 3300). Ergänzend wurde in 393 Datenpunkten des Analysematerials Gestein die XRF-Messmethode herangezogen.

Tabelle 1: Herkunft aller Datenpunkte

Datenherkunft	Anzahl Datenpunkte
St.Gallen	208
Wallis	9'613
Zürich	25'600
WSL	7'322
Wissenschaftliche Berichte/Publicationen	14'868
Keine Angaben	52
NABODAT (total)	94'549
GEMAS	2'652
Davon enthaltene Datenpunkte im NABODAT aus den folgenden Kantonen:	
Aargau	1'398
Basel Land/ Basel Stadt	20'004
Bern	9'329
Freiburg	20'154
Graubünden	32'559
Obwalden	135
Schwyz	240
Solothurn	881
Tessin	1'266
Thurgau	5'931

Tabelle 2: Zusammenfassung Anzahl aller Datenpunkte pro Analysematerial (keine Datenpunkte ausgeschlossen)

Analysematerial	Anzahl Datenpunkte
Keine Angaben (wahrscheinlich Boden)	82'709
Mineralboden	64'126
Gestein	3'704
Streu	1642
Auflage	21
Skelett	10

Tabelle 3: Zusammenfassung Anzahl aller Datenpunkte pro Aufschluss- bzw. Messmethode (keine Datenpunkte ausgeschlossen)

Aufschluss- bzw. Messmethode	Anzahl Datenpunkte
2M Salpetersäure (VBBo total)	85'387
Röntgenfluoreszenz (XRF), Labormessgerät	18'672
HNO₃, HF und HClO₄	16'024
HCl und HNO₃ (Königswasser)	10'488
Röntgenfluoreszenz (XRF), mobiles Messgerät	5'804
Ammoniumacetat-EDTA	3'580
HF und HNO₃	3'300
H₂O	1'139
NaNO₃ (VBBo löslich)	849
Mobile Metal Ions (SGS)	680
HNO₃	583
HNO₃ und Citronensäure	248
NaOH	1774
HF und HClO₄	75
HCl, HF und H₂SO₄	20
NH₄-Acetat	18
HNO₃, H₂O₂, HF und H₃BO₃	5
Keine Angaben/ Aufschluss unbekannt	3'566

Aufschluss- und Messmethoden

● 2M HNO₃ (VBo total)

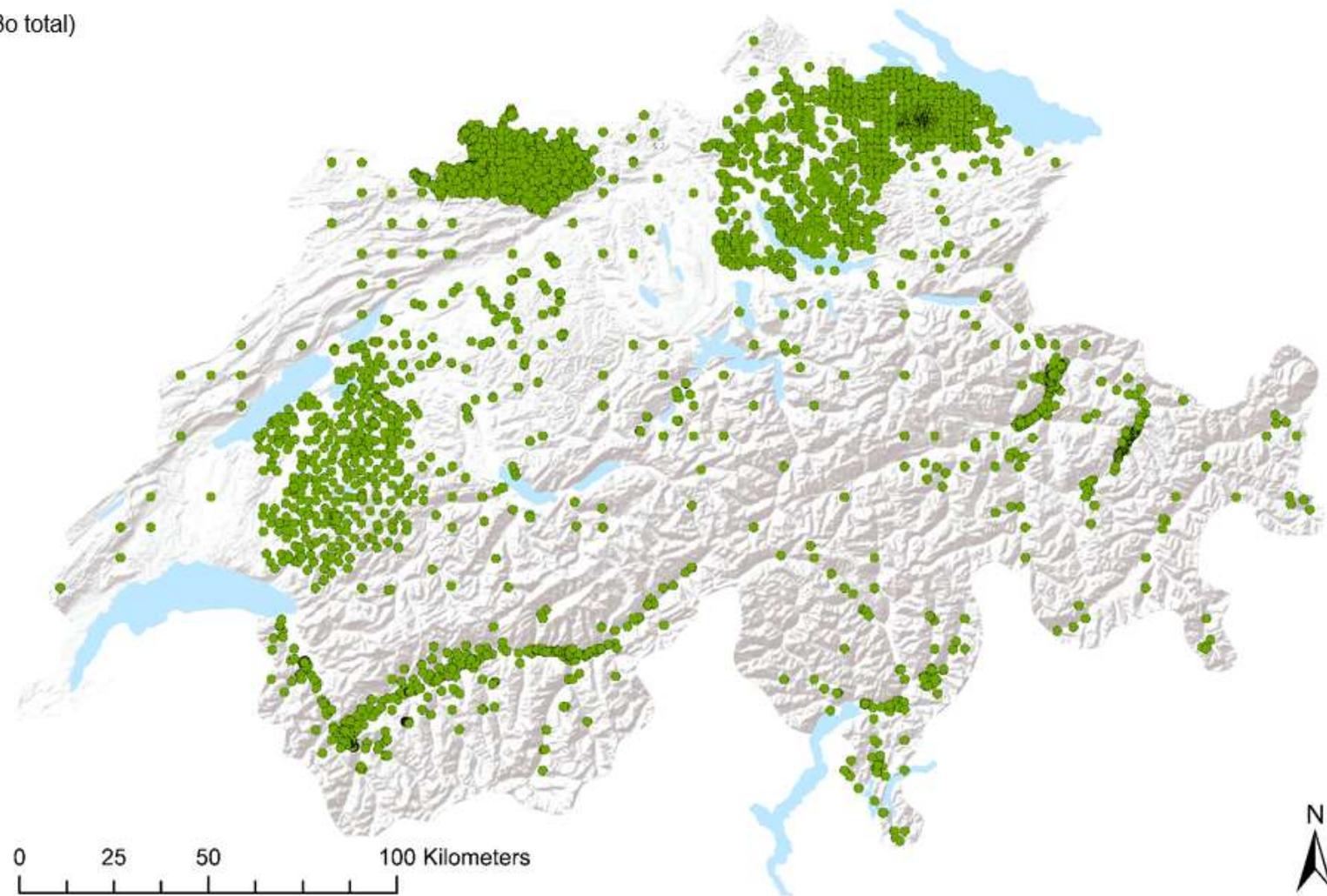


Abbildung 1: Geographische Darstellung des VBo-Aufschlusses aller Datenpunkte

Aufschluss- und Messmethoden

- XRF, Labormessgerät ★ Gestein
- HCl und HNO₃ (Königswasser)
- ▲ XRF, mobiles Messgerät
- ▲ HNO₃, HF und HClO₄
- ▲ C₂H₇NO₂-EDTA
- ▲ HF und HNO₃
- ▲ H₂O
- ▲ NaNO₃ (VBBo löslich)
- Mobile Metal Ions (SGS)
- HNO₃
- HNO₃ und C₆H₈O₇
- NaOH
- HF und HClO₄
- HCl, HF und H₂SO₄
- NH₄-Acetat
- HNO₃, H₂O₂, HF und H₃BO₃
- Keine Angaben/ Aufschluss unbekannt

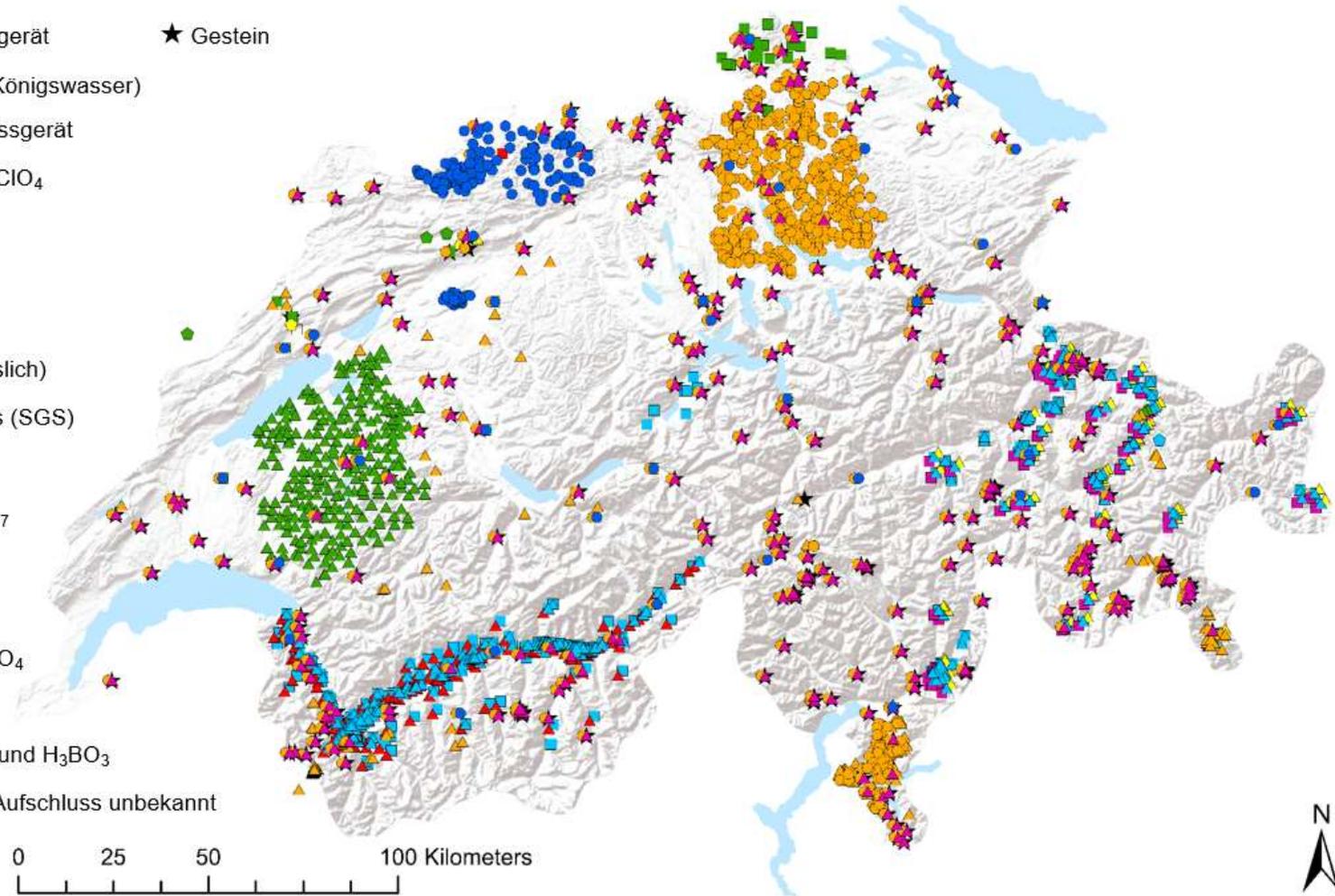


Abbildung 2: Geographische Darstellung der Aufschluss- bzw. Messmethoden aller Datenpunkte (ausgenommen: nach VBBo-Aufschluss analysierte Datenpunkte).

3.1 Aufschluss- und Messmethodenvergleich

Die Auswahl der Standorte, an denen die Metalle jeweils mit dem VBBo-Aufschluss (2 M Salpetersäure) und dem Königswasser-Aufschluss gemessen wurden, ergab 2067 Messwerte für 155 zu vergleichende Standorte. Eine Messung sowohl mit VBBo- als auch mit Königswasser-Aufschluss war nur für folgende Elemente vorhanden: Arsen, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Molybdän, Nickel, Antimon, Thallium, Uran, Vanadium und Zink. Für die einzelnen Metalle wird in Abbildung 3 die prozentuale Wiederfindungsrate zwischen VBBo- und Königswasser-Aufschluss als Gesamtübersicht dargestellt. Mit Ausnahme von Cadmium liegt der Median der prozentualen Wiederfindungsrate deutlich unter 100 % und die Streuung der prozentualen Wiederfindungsrate ist für einzelne Elemente (z. B. Arsen, Cadmium, Kupfer und Blei) hoch.

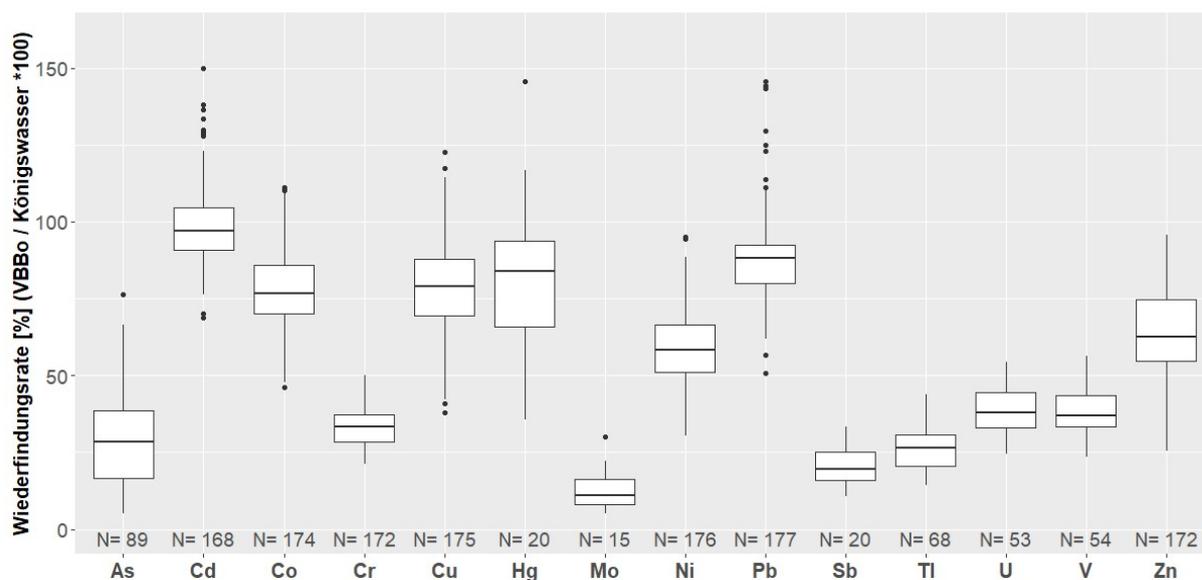


Abbildung 3: Die Boxplots (25 %-Quantil, Median, 75 %-Quantil) zeigen die Wiederfindung in % der verschiedenen Metalle (VBBo/ Königswasser *100) bzw. den prozentualen Anteil der gemessenen Metallbelastung durch VBBo-Aufschluss im Vergleich zum Königswasser-Aufschluss

Die lineare Regressionsanalyse zeigt, dass für die meisten Metalle ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Aufschlussmethoden besteht. Exemplarisch für andere Metalle ist die lineare Regression für Arsen, Cadmium und Blei in Abbildung 4 dargestellt. Es wurde jedoch kein oder ein nur sehr schwacher Zusammenhang zwischen VBBo- und Königswasser-Aufschluss in Bezug auf Quecksilber, Molybdän

und Antimon beobachtet (Abbildung 4). Für die letztgenannten Elemente ist die Datenbasis mit 15-20 oberhalb der Bestimmungsgrenze liegenden Datenpunkten allerdings auch sehr gering. Für Antimon ist ausserdem bekannt, dass es die bei einer Extraktion nach VBBo die Zugabe von Zitronensäure braucht, um das Antimon zu komplexieren («Variante Labor Spiez», s. Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich, BAFU 2017). Auch für die Analyse von Hg und Mo braucht es in der Regel Komplexbildner (z.B. Cl⁻), um die Elemente in Lösung zu stabilisieren. Daher ist bei Verwendung der VBBo-Methode nicht mit verlässlichen Zahlen für diese drei Elemente zu rechnen und es erfolgte keine Umrechnung für diese Elemente.

Weder der pH-Wert noch der Gehalt an organischem Material oder das Ausgangsgestein haben einen Einfluss auf die Wiederfindungsrate. In Abbildung 5 ist die fehlende Abhängigkeit zwischen der Wiederfindungsrate und pH-Wert für Arsen, Cadmium und Blei als Beispiele angefügt ($p > 0.01$ und $R^2 < 0.04$).

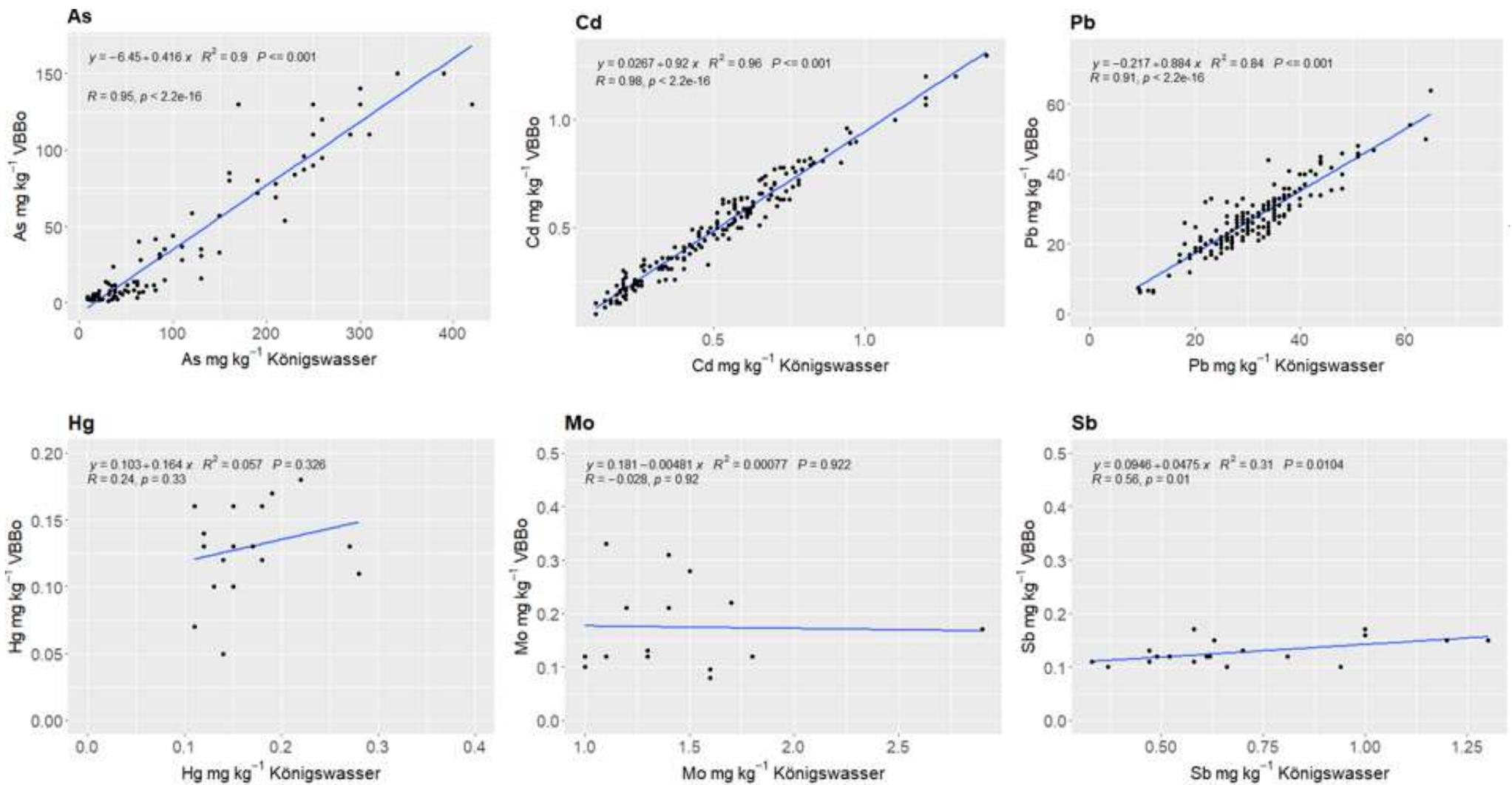


Abbildung 4: Einfache Regressionsanalyse zwischen Salpetersäure- und Königswasser-Aufschluss für Arsen (As), Cadmium (Cd), Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Molybdän (Mo) und Antimon (Sb).

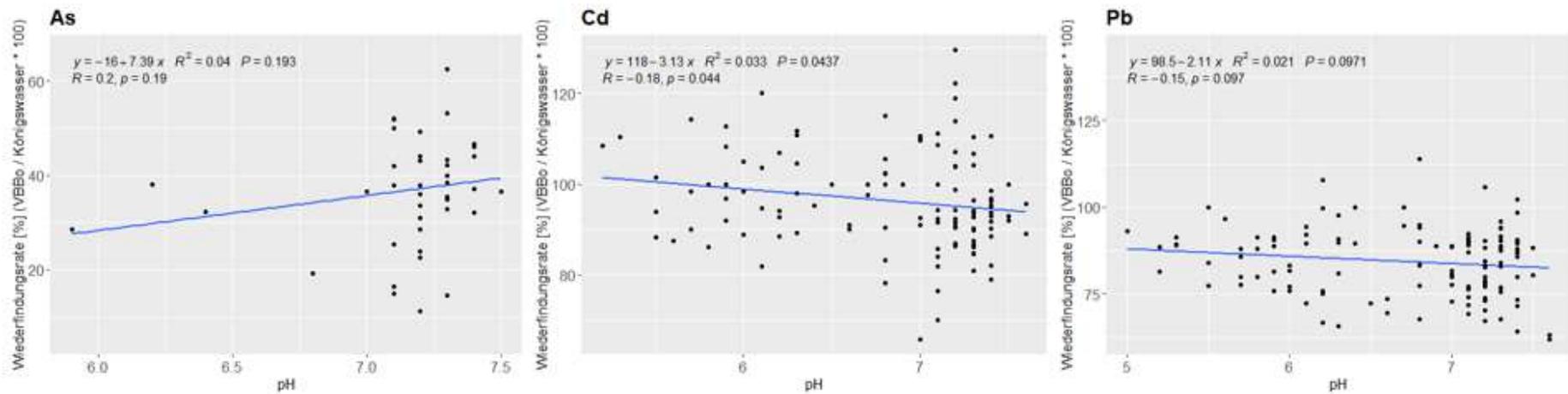


Abbildung 5: Einfache Regressionsanalyse zwischen der Wiederfindungsrate (Salpetersäure- und Königswasser-Aufschluss) und pH für Arsen (As), Cadmium (Cd) und Blei (Pb).

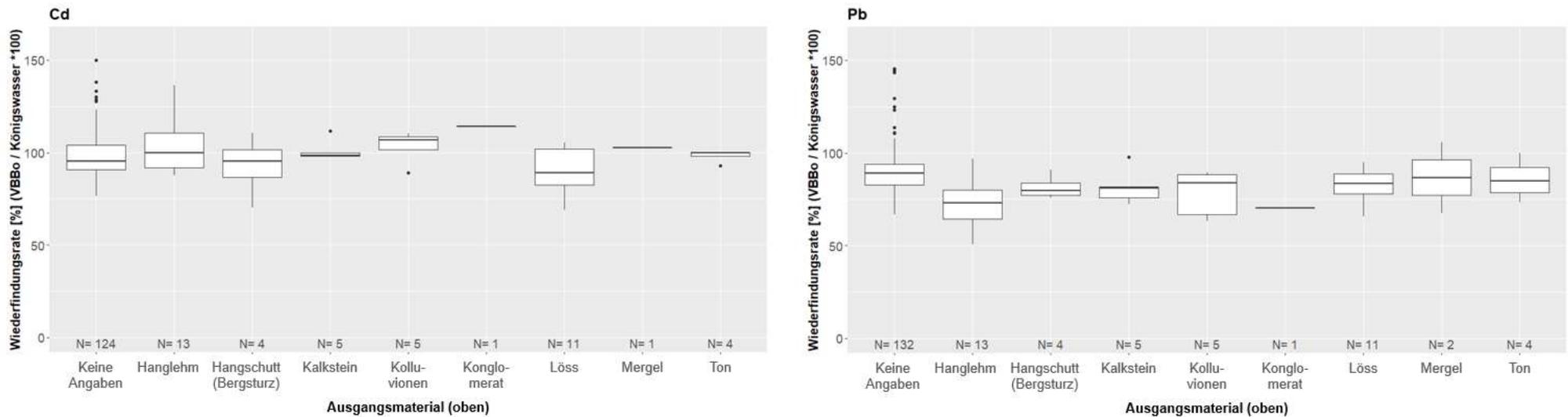


Abbildung 6: Die Boxplots (25 %-Quantil, Median, 75 %-Quantil) zeigen die Wiederfindung in % (Salpetersäure-/ Königswasser-Aufschluss *100) und dem Ausgangsgestein für Cadmium (Cd) und Blei (Pb).

Die verfügbaren Daten für den organischen Kohlenstoff Gehalt und das Ausgangsgestein (Abbildung 6) sind nur begrenzt vorhanden. Cadmium und Blei wurden als Beispiele aufgeführt, da für diese Elemente relativ viele Daten vorhanden sind. Allerdings ist weitere statistische Auswertung problematisch, da nur wenige Datenpunkte pro Kategorie enthalten sind.

Zusätzlich wurden die mit dem VBBö-Aufschlusses (total) erhaltenen Metallkonzentrationen mit der nicht-destruktiven XRF-Messmethode (Labormessgerät) verglichen. Von den mit dem XRF gemessenen Bodenproben wurden nur die mit einem XRF-Laborgerät analysierten Proben berücksichtigt, nicht die mit dem XRF-Feldgerät analysierten. An 414 Standorten im Kanton Zürich wurden insgesamt 6144 Datenpunkte mit der VBBö- und XRF-Messmethode (Labormessgerät) ermittelt. Eine Messung sowohl mit dem VBBö-Aufschluss als auch mit der XRF-Messmethode war für folgende Elemente vorhanden: Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink.

Abbildung 7 gibt eine Übersicht über die prozentuale Wiederfindungsrate zwischen VBBö und XRF für die einzelnen Metalle. Mit Ausnahme von Cadmium liegt die prozentuale Wiederfindungsrate deutlich unter 100 % und die Streuung der prozentualen Wiederfindungsrate ist mit Ausnahme von Cadmium gering. Die kleinste prozentuale Wiederfindungsrate zeigt Chrom (~30%). Diese geringe prozentuale Wiederfindung zwischen Säureaufschluss und XRF für Chrom wurde in zwei Studien mit unterschiedlichen Aufschlussmethoden bestätigt (Yamasaki et al., 2016; Congiu et al., 2013). Mehrere Gründe können eine Rolle spielen, wie beispielsweise die Belastungsquelle, der Tongehalt oder Messinterferenzen während der XRF-Messung, die zu einer überschätzten Chromkonzentration führen. Insgesamt ist Chrom im Boden und in Gesteinen sehr fest gebunden und daher wird vergleichsweise wenig Chrom mit 2M Salpetersäure extrahiert.

Die lineare Regressionsanalyse belegt, dass für alle Metalle ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Aufschluss- bzw. Messmethoden vorliegt. Als Beispiel für andere Metalle ist die lineare Regression für Cadmium und Chrom in Abbildung 8 dargestellt. Die Parameter der Regressionsanalyse zwischen VBBö- und Königswasser-Aufschluss und XRF sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Für Quecksilber, Molybdän und Antimon konnte aufgrund einer geringen Datenbasis kein Korrekturfaktor von Königswasser zu VBBö-Aufschluss ermittelt werden.

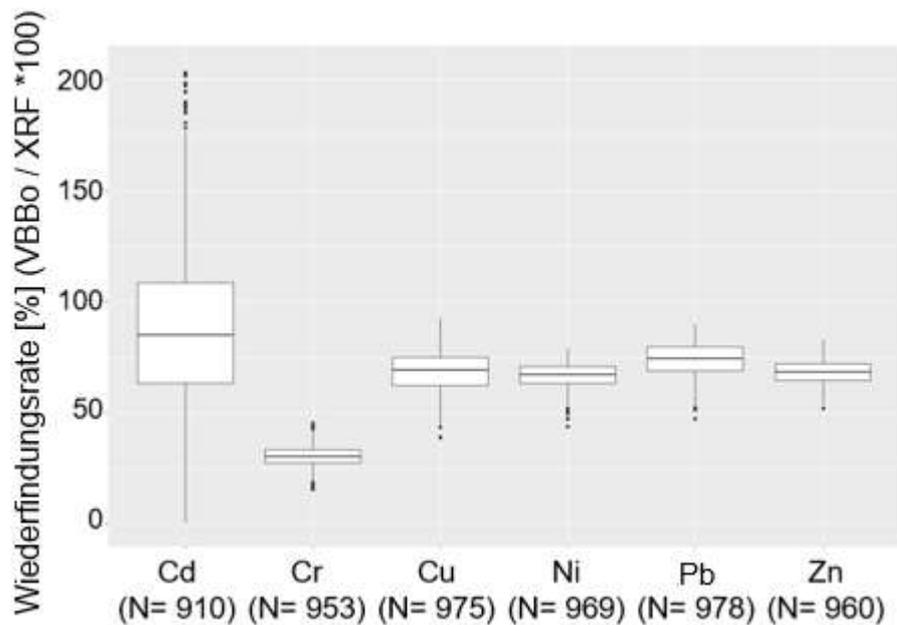


Abbildung 7: Die Boxplots (25 %-Quantil, Median, 75 %-Quantil) zeigen die Wiederfindung in % der verschiedenen Metalle (Salpetersäure: XRF) bzw. den prozentualen Anteil der gemessenen Metallbelastung durch VBBo-Auflösung im Vergleich zu XRF.

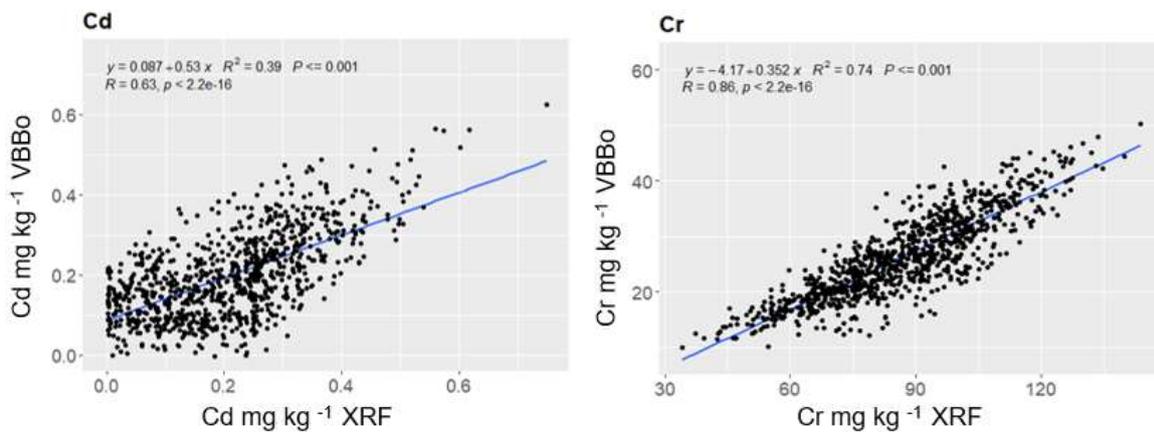


Abbildung 8: Einfache Regressionsanalyse zwischen Salpetersäureauflösung und XRF für Cadmium (Cd) und Chrom (Cr).

Tabelle 4: Zusammenfassung der Parameter der Regressionsanalyse zwischen 2 M Salpetersäure (VBBo total)- und Königswasser-Aufschluss (KW) und XRF

Regressionsparameter: zwischen 2 M Salpetersäure (VBBo total)- und Königswasser-Aufschluss (KW)						Regressionsparameter: 2 M Salpetersäure (VBBo total)-Aufschluss und XRF				
Metall	N	R ²	R	[Element] _{VBBo}	95% Vorhersage-interval in %	N	R ²	R	[Element] _{VBBo} =	95% Vorhersage-interval in %
As	89	0.90	0.95	0.416 [As] _{KW} + (-6.45)	7.1					
Cd	168	0.96	0.98	0.920 [Cd] _{KW} + 0.267	3.1	910	0.39	0.63	0.530 [Cd] _{XRF} + 0.087	7.9
Co	174	0.74	0.86	0.795 [Co] _{KW} + (-0.170)	8.8					
Cr	172	0.58	0.76	0.325 [Cr] _{KW} + 0.571	13	953	0.74	0.86	0.352 [Cr] _{XRF} + (-4.17)	3.4
Cu	175	0.87	0.93	0.854 [Cu] _{KW} + (-1.25)	6.0	975	0.94	0.97	0.841 [Cu] _{XRF} + (-2.92)	1.4
*Hg	20	0.01	0.24							
*Mo	15	0.00	0.00							
Ni	176	0.54	0.74	0.507[Ni] _{KW} + 3.09	14	969	0.97	0.99	0.776 [Ni] _{XRF} + (-4.13)	1.0
Pb	176	0.84	0.91	0.884 [Pb] _{KW} + (-0.217)	5.1	978	0.97	0.99	0.956 [Pb] _{XRF} + (-4.99)	1.1
*Sb	20	0.31	0.56							
Tl	68	0.88	0.94	0.318 [Tl] _{KW} + (-0.035)	9.1					
U	53	0.62	0.79	0.333 [U] _{KW} + 0.061	22					
V	54	0.79	0.89	0.465 [V] _{KW} + (-6.06)	14					
Zn	172	0.70	0.84	0.636 [Zn] _{KW} + 0.162	10	960	0.92	0.96	0.813 [Zn] _{XRF} + (-8.09)	1.7

*Hg, Mo und Sb p nicht signifikant (p > 0.01) in Regressionsanalyse

N = Anzahl Datenpunkte, R² = Determinationskoeffizient, R = Korrelationskoeffizient, β= Regressionskoeffizient

3.2 Geogene Bodenbelastungen

Einen Überblick über die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Gehalte der aufgenommenen Bodendatenpunkte gibt die Tabelle 5. Fehlende Messwerte wurden ausgeschlossen. War ein Messwert unterhalb der Quantifizierungsgrenze, wurde die Hälfte der Quantifizierungsgrenze verwendet, falls vorhanden.

Zusätzlich wird in Tabelle 5 die Anzahl der Datenpunkte pro Metall aufgeführt, die den Richtwert, den Prüfwert oder den Sanierungswert überschreiten. Im Anhang sind die berücksichtigten Richtwerte, Prüfwerte und Sanierungswerte pro Metall aufgeführt (Tabelle 8). Für die Schadstoffe, für die in der VBBo kein Richt-, Prüf- oder Sanierungswert vorgeschrieben ist, kamen die Orientierungswerte nach Eikman et al. (1999) zur Anwendung. Die Grenzwerte nach Eikmann beziehen sich allerdings auf den Königswasser-Aufschluss. Um einen Vergleich der Methoden zu ermöglichen, wurden jedoch jeweils die Grenzwertüberschreitungen mit beiden Methoden dargestellt und die massgeblichen Werte hervorgehoben (Tabelle 5).

Zusätzlich befindet sich im Anhang (Tabelle 9) eine tabellarische Übersicht über die Anzahl der Datenpunkte (aller Analysenmaterialien) pro Metall über alle Aufschluss- und Messmethoden hinweg.

Eine relative grosse Anzahl von Datenpunkten für Arsen, Nickel, Antimon und Thallium liegen oberhalb des Sanierungswertes. In Bezug auf Kupfer liegen die meisten Datenpunkte im Vergleich zu den anderen Elementen über dem Richtwert, aber keiner über dem Sanierungswert.

Tabelle 5: Anzahl, Spanne, Mittelwerte und Anzahl der Standorte, an denen Richt-, Prüf- und Sanierungswerte überschritten werden. Zu jedem Element gibt es zwei Zeilen. Die obere Zeile zeigt Werte nach VBBo, oder darauf umgerechnete Werte. Die untere Zeile zeigt Werte nach Königswasser-Aufschluss oder darauf umgerechnete Werte. Es ist jeweils die relevante Zeile hervorgehoben, je nachdem ob sich die Werte auf die VBBo oder auf Eikmann et al. (1999) beziehen. Für die nicht umgerechneten Werte (Ba, Hg, Mo, Sb, Sn) unterscheiden sich die Anzahl der Datenpunkte stark und sind nicht vergleichbar, da sie von unterschiedlichen Proben stammen.

Element	N	Min. mg kg ⁻¹	Max. mg kg ⁻¹	Mittelwert mg kg ⁻¹	Median mg kg ⁻¹	N > Richtwert	N > Prüfwert	N > Sanierungswert
As	1'034 (1'034)	0.390 (0.937)	3'244 (7'800)	60.6 (145)	9.36 (25.0)	308* (556)*	215* (380)*	156* (244)*
Ba	203 (67)	96.0 (19.0)	10'423 (280)	436 (147)	345 (140)	201* (56)*	127* (0)*	3* (0)*
Cd	10'130 (10'087)	0.000 (0.000)	31.0 (33.7)	0.419 (0.457)	0.220 (0.239)	821** (946)**	221** (258)**	1** (1)**
Co	8'289 (8'215)	0.000 (0.000)	403 (507)	7.72 (9.77)	7.07 (8.93)	11* (17)*	4* (4)*	0* (0)*
Cr	10'120 (10'106)	0.000 (0.000)	1'430 (4'400)	24.7 (75.9)	21.2 (65.5)	377** (7'287)*	14* (186)*	5* (39)*
Cu	10'374 (10'360)	0.000 (0.000)	910 (1'066)	21.0 (24.5)	14.8 (17.3)	691** (1'016)*	98** (111)*	0** (1)*
Hg	5'408 (561)	0.000 (0.025)	42.4 (1.10)	0.100 (0.078)	0.060 (0.050)	51** (1)*	3* (0)*	0* (0)*
Mo	3'398 (553)	0.000 (0.050)	20.0 (550)	0.527 (2.01)	0.250 (0.500)	12** (10)*	0* (1)*	0* (1)*
Ni	10'187 (10'179)	0.000 (0.000)	928 (1'830)	26.7 (52.5)	22.1 (43.4)	655** (3'914)*	154* (644)*	15* (147)*
Pb	10'559 (10'532)	0.000 (0.000)	1'310 (1'482)	23.2 (26.3)	19.2 (21.7)	443** (635)*	19** (28)**	0** (0)**
Sb	111 (494)	0.50 (0.050)	79.0 (9.10)	8.21 (0.499)	0.100 (0.500)	21* (8)*	18* (1)*	17* (0)*
Sn	74 (255)	1.00 (0.270)	231 (14.0)	48.1 (2.69)	44.0 (2.30)	31* (0)*	3* (0)*	0* (0)*
Tl	3'035 (3'013)	0.000 (0.000)	795 (2'500)	5.31 (16.4)	0.100 (0.314)	277* (848)*	193* (262)*	154* (177)*
U	565 (565)	0.037 (0.11)	91.0 (273)	0.689 (2.05)	0.490 (1.40)	2* (2)*	2* (2)*	1* (2)*
V	1'342 (1'342)	1.07 (2.3)	402 (865)	32.5 (70.5)	27.0 (59.3)	237* (793)*	8* (260)*	1* (3)*
Zn	10'594 (10'584)	0.000 (0.000)	2'850 (4'481)	56.1 (88.2)	48.9 (76.9)	148** (851)*	28** (73)*	1** (2)*

* > als BWI-III nach Eikmann et al. (1999), ** > als die Richt-, Prüf-, und Sanierungswerte nach VBBo

3.3 Visualisierung der potentiellen geogenen Bodenbelastung

In den nächsten Unterkapiteln werden die grafischen Darstellungen von ausgesuchten Metallen des gesamten Analysematerials aufgeführt. Das Analysematerial Gestein wurde in den Karten differenziert dargestellt. Für die Erstellung der Visualisierungen wurden sämtliche Bodentiefen herangezogen. Es wurden nur einzelne Elemente visuell in Kartenform dargestellt. Die Gesamtheit der untersuchten Metalle ist in dem entsprechenden Datensatz verfügbar.

Zur besseren Identifizierung von lokal erhöhten Belastungen wurden alle Aufschluss- und Messmethoden berücksichtigt. Die VBBo-Werte (O), die transformierten VBBo-Werte (⊙) und andere Aufschluss- bzw. Messmethoden (Δ) sind in den Karten unterschiedlich gekennzeichnet. Eine Umwandlung in VBBo-Werten war nicht für alle Metalle möglich, siehe Tabelle 4 und 5. Für Bodendatenpunkte, die zweimal gemessen wurden (d. h. VBBo und Königswasser-Aufschluss oder VBBo und XRF-Labormessgerät), wurde nur der VBBo-Wert berücksichtigt.

In den geografischen Visualisierungen mit ArcMap wurden drei verschiedene Layer verwendet, wobei die Datenpunkte bzw. Messwerte in der folgenden Reihenfolge geordnet wurden: VBBo-Aufschluss, in VBBo umgerechnete Werte (falls vorhanden), andere Aufschlüsse und Messmethoden (z.B. XRF-Messmethode). Die farbliche Zuordnung der Metallkonzentration erfolgte anhand der Kennwerte nach VBBo oder nach Eikmann et al. (1999) (Tabelle 8).

Die grau dargestellten Werte sind Werte, die kleiner als der Richtwert sind (<RW), gelbe Werte sind grösser als der Richtwert aber kleiner als der Prüfwert (RW-PW), orange Werte sind höher als der Prüfwert aber kleiner als der Sanierungswert (PW-SW) und rote Werte sind über dem Sanierungswert (>SW).

Visualisierung der potentiell geogenen Bodenbelastung wurden für die folgenden Elemente erstellt: Arsen, Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Blei, Antimon, Thallium und Zink. Diese Elemente wurden auf der Grundlage der verfügbaren Anzahl Datenpunkte in der Datenbank und der Anzahl der Überschreitungen des Prüf- und Sanierungswertes bestimmt (Tabelle 5).

3.3.1 Arsen (As)

Eine gute Datenverfügbarkeit für Arsen gibt es in den Kantonen Basel-Landschaft und Zürich (Abbildung 9). Insgesamt sind für die gesamte Schweiz wenig As Daten verfügbar. Punktuelle Messungen von Arsen zeigen oft sehr hohe Konzentrationen, was darauf hindeutet, dass Messungen dort vorgenommen worden sind, wo hohe Konzentrationen zumindest vermutet wurden (z.B. Kanton Graubünden und Tessin). Diese einzelnen sehr hohen Messungen finden sich oft im nördlichen Alpenraum, wo kristallines Gestein vorherrschend ist. Auch im Basler Jura sind Datenpunkte oberhalb des Sanierungswertes erkennbar.

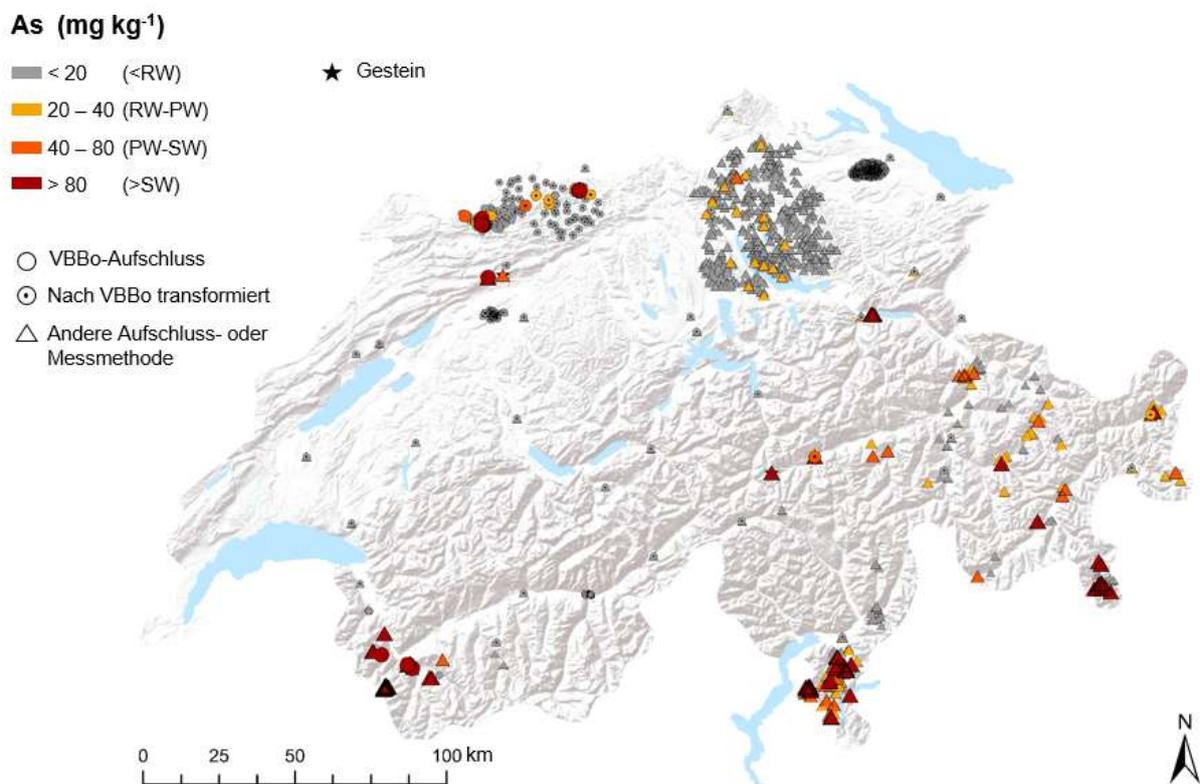


Abbildung 9: Untersuchungsstandorte für Arsen (As).

3.3.2 Cadmium (Cd)

Für Cadmium finden sich Standorte mit erhöhten Konzentrationen in der ganzen Schweiz (Abbildung 10). Konzentrationen über dem Richtwert finden sich vor allem im Jura und in der Alpenregion, mit offenbar höheren Werten im kristallinen Teil der Alpen. Auffallend sind auch die häufigen Überschreitungen des Richtwerts. Es kommt auch über die ganze Schweiz verteilt fast überall vereinzelt zu Überschreitungen des Prüfwertes.

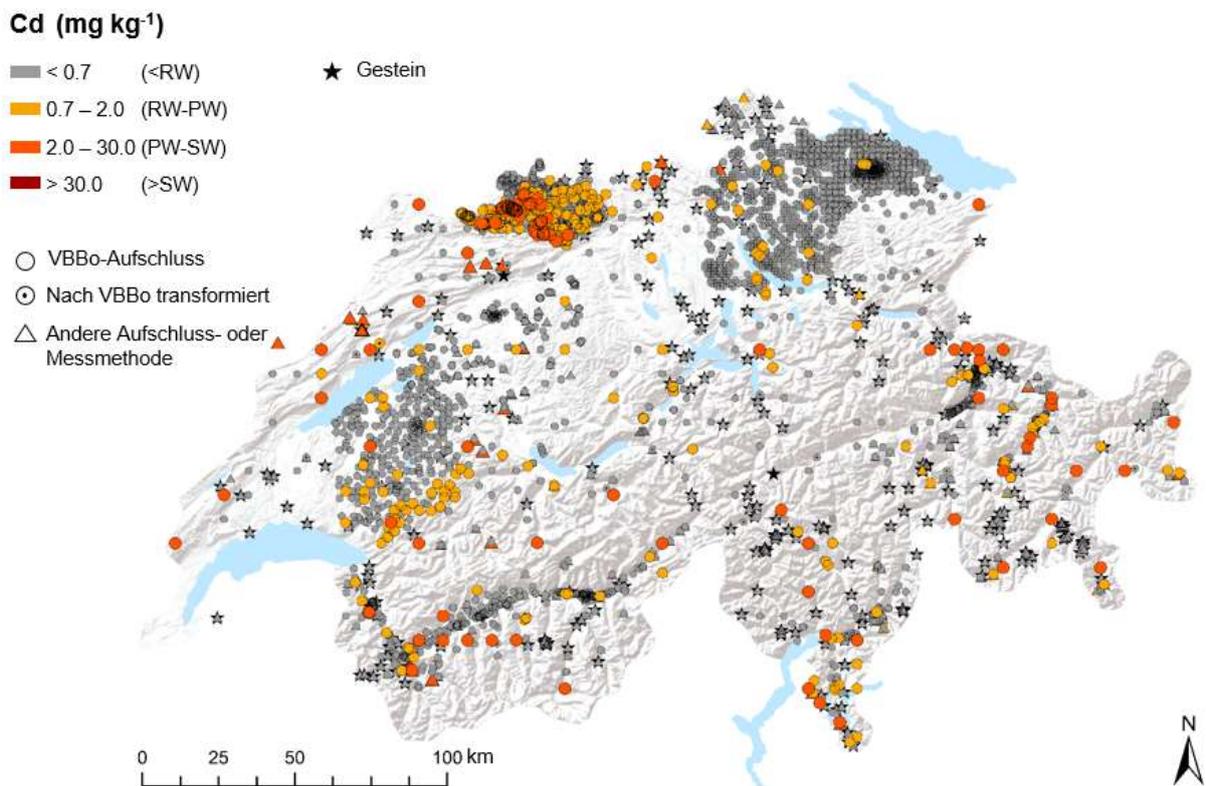


Abbildung 10: Untersuchungsstandorte für Cadmium (Cd).

3.3.3 Kobalt (Co)

Die Kobaltkonzentrationen liegen überwiegend unterhalb des Richtwerts für die VBBo-Aufschlussmethode (Abbildung 11). Vereinzelt gibt es jedoch Standorte mit Konzentrationen oberhalb des Prüfwertes. Diese befinden sich hauptsächlich im kristallinen Bereich der Alpen in Graubünden und im westlichen Wallis.

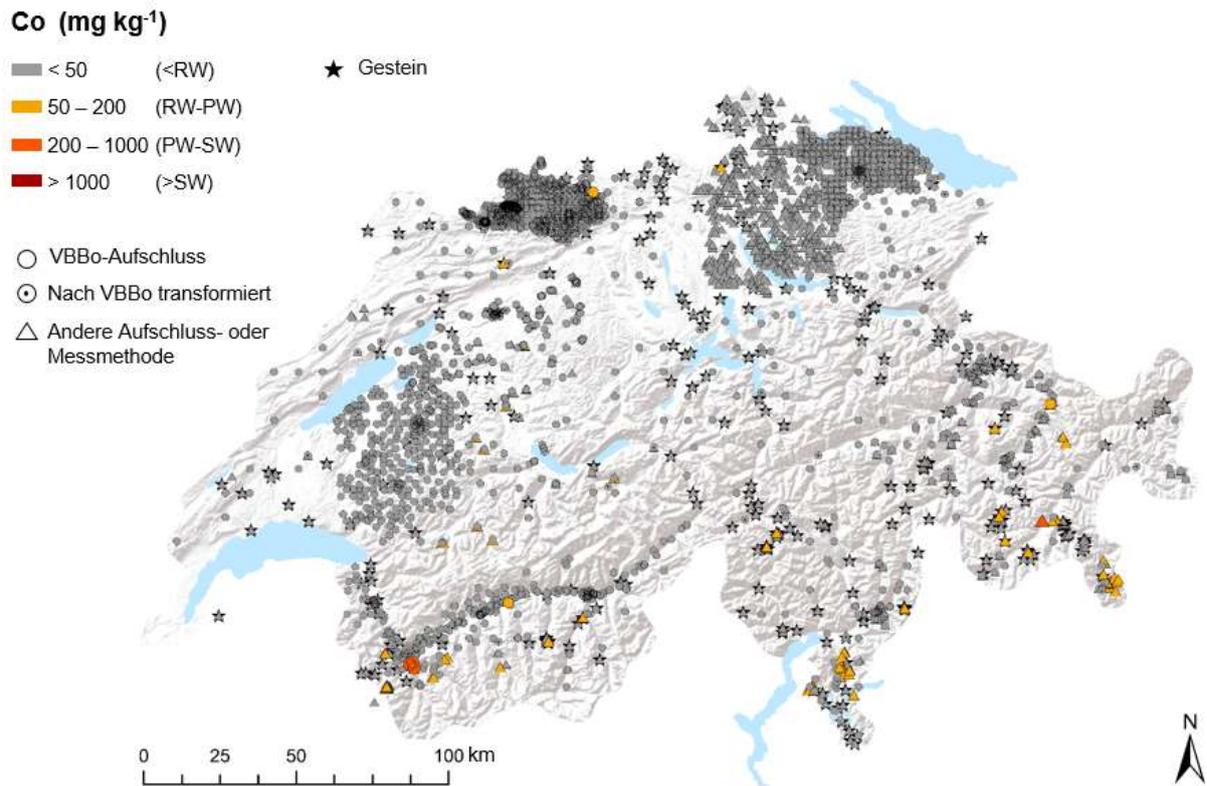


Abbildung 11: Untersuchungsstandorte für Kobalt (Co).

3.3.4 Chrom (Cr)

Die Chromkonzentrationen in der Schweiz liegen meist unter dem Richtwert (Abbildung 12). Allerdings kommt es in der ganzen Schweiz auch zur Überschreitung des Richtwertes. Konzentrationen oberhalb des Prüf- und Sanierungswertes treten vor allem im kristallinen Teil der Alpen aber auch vereinzelt in den Kantonen Zürich und Fribourg auf.

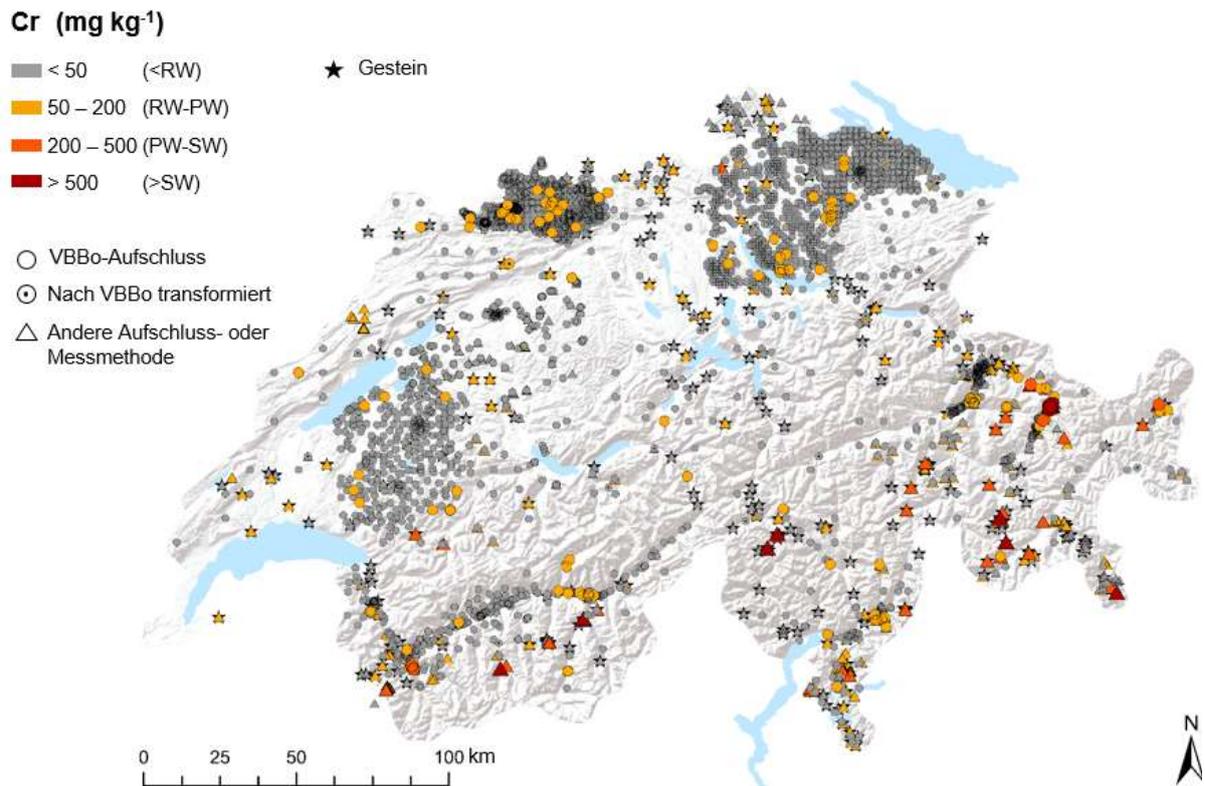


Abbildung 12: Untersuchungsstandorte für Chrom (Cr).

3.3.5 Kupfer (Cu)

Wie in Abbildung 12 ersichtlich, finden sich in zahlreichen Regionen der Schweiz Kupferkonzentrationen über dem Richtwert und vereinzelt auch über dem Prüfwert. Das grossflächige Auftreten von Werten oberhalb des Prüfwertes ist hauptsächlich im Kanton Wallis zu beobachten.

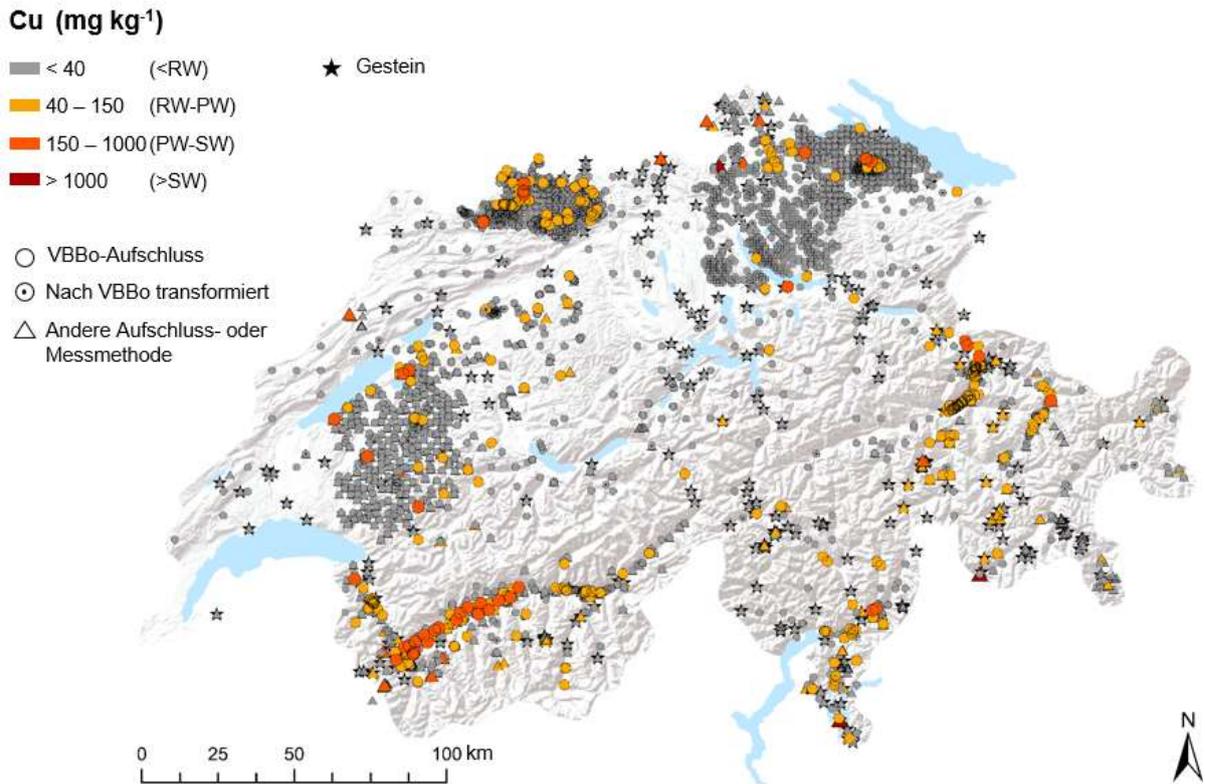


Abbildung 13: Untersuchungsstandorte für Kupfer (Cu).

3.3.6 Quecksilber (Hg)

Für Quecksilber unterschreiten die Konzentrationen den Richtwert in der Mehrheit der Fälle (Abbildung 14). Datenpunkte, die den Richtwert überschreiten, finden sich vereinzelt in den Kantonen Basel-Landschaft, Graubünden und Wallis. Das Rhonetal weist einzelne Datenpunkte mit Quecksilberkonzentrationen oberhalb des Prüfwertes auf. Allerdings sind im Rhonetal keine geogenen Hg Quellen bekannt, während es teilweise hohe anthropogene Einträge von Hg hat. Daher ist eine anthropogene Herkunft von Quecksilber in dieser Region wahrscheinlich.

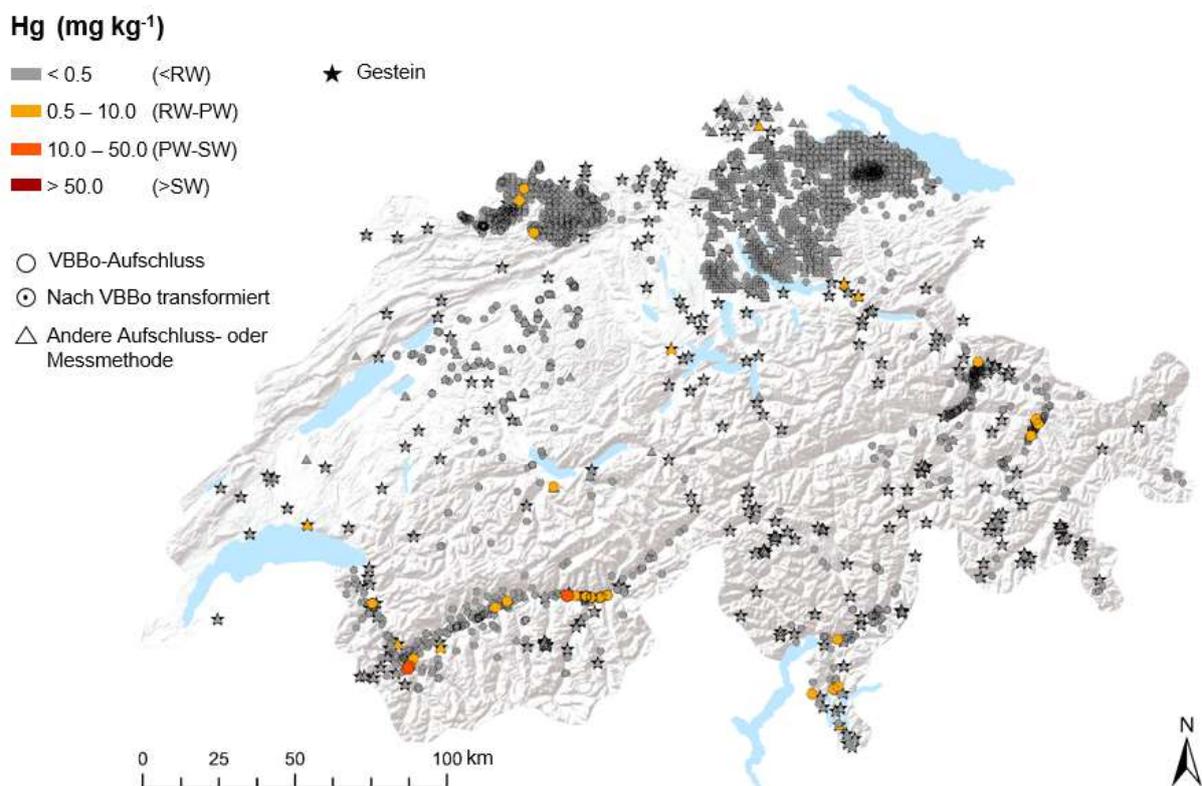


Abbildung 14: Untersuchungsstandorte für Quecksilber (Hg).

3.3.7 Nickel (Ni)

In Bezug auf Nickel sind Standorte mit Konzentrationen über dem Prüfwert und dem Sanierungswert in der ganzen Schweiz zu beobachten (Abbildung 15). Standorte mit Konzentrationen über dem Sanierungswert sind vor allem im kristallinen Teil der Alpen zu verzeichnen. Punktuelle Standorte mit Überschreitungen des Sanierungswertes befinden sich auch in der Nähe des Bielersees und in Basel-Land.

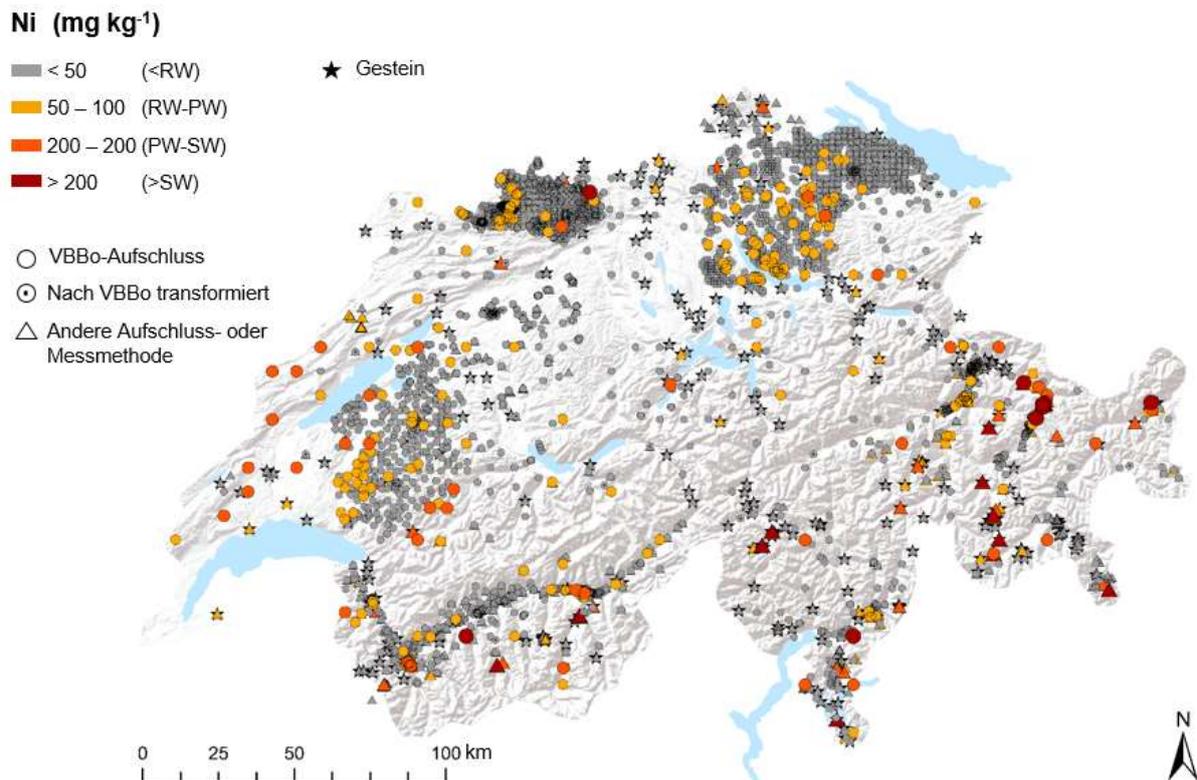


Abbildung 15: Untersuchungsstandorte für Nickel (Ni).

3.3.8 Blei (Pb)

Konzentrationen von Blei oberhalb der Richt- und Prüfwerte treten ebenfalls in der ganzen Schweiz auf (Abbildung 16). Auffällige Häufungen von Datenpunkten über dem Richt- oder Prüfwert und einzelne Überschreitungen der Sanierungswerte, liegen vor allem im Wallis und Südtessin vor.

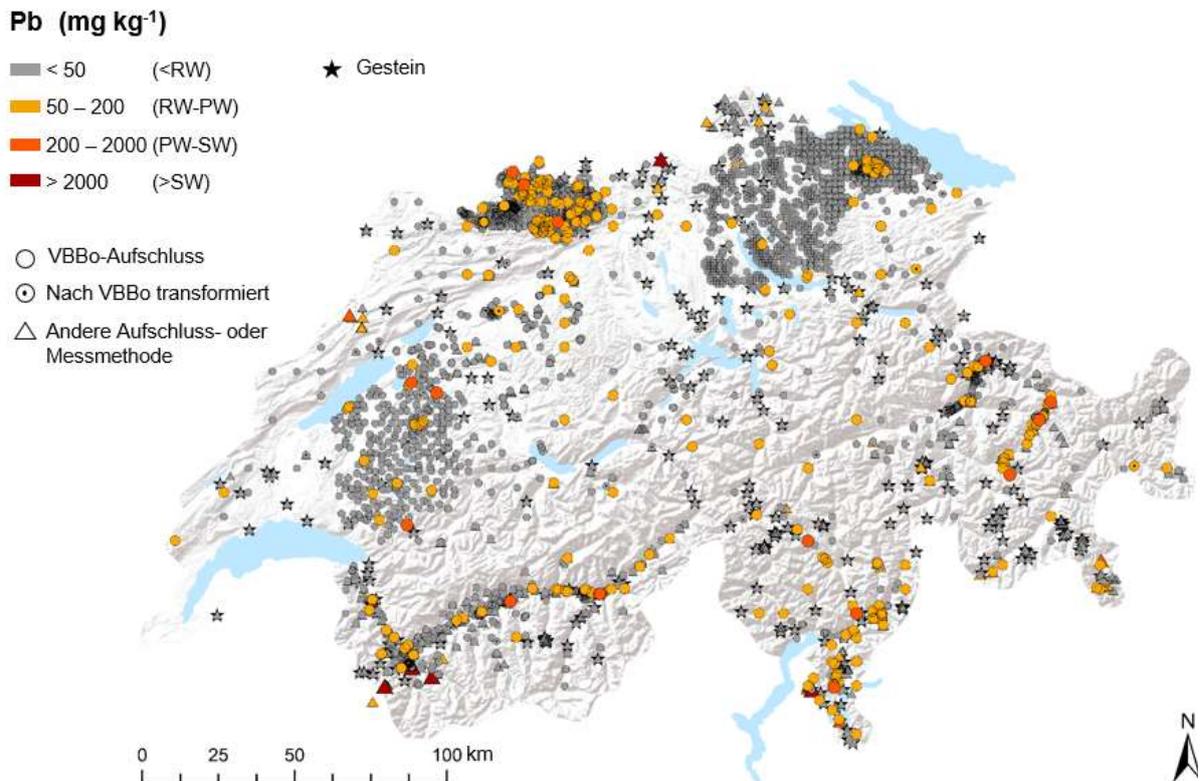


Abbildung 16: Untersuchungsstandorte für Blei (Pb).

3.3.9 Antimon (Sb)

Für Antimon ist ein differenziertes Bild aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit nur schwer zu ermitteln (Abbildung 17). Während im Kanton Basel-Landschaft die Konzentrationen fast überall unter dem Richtwert liegen, sind die Konzentrationen im Kanton Zürich in vielen Fällen über dem Richtwert. An den wenigen Messstellen in den Kantonen Graubünden, Tessin und Wallis liegen die meisten Datenpunkte über dem Richtwert. Einzelne Datenpunkte im Kanton Wallis und Tessin überschreiten den Sanierungswert

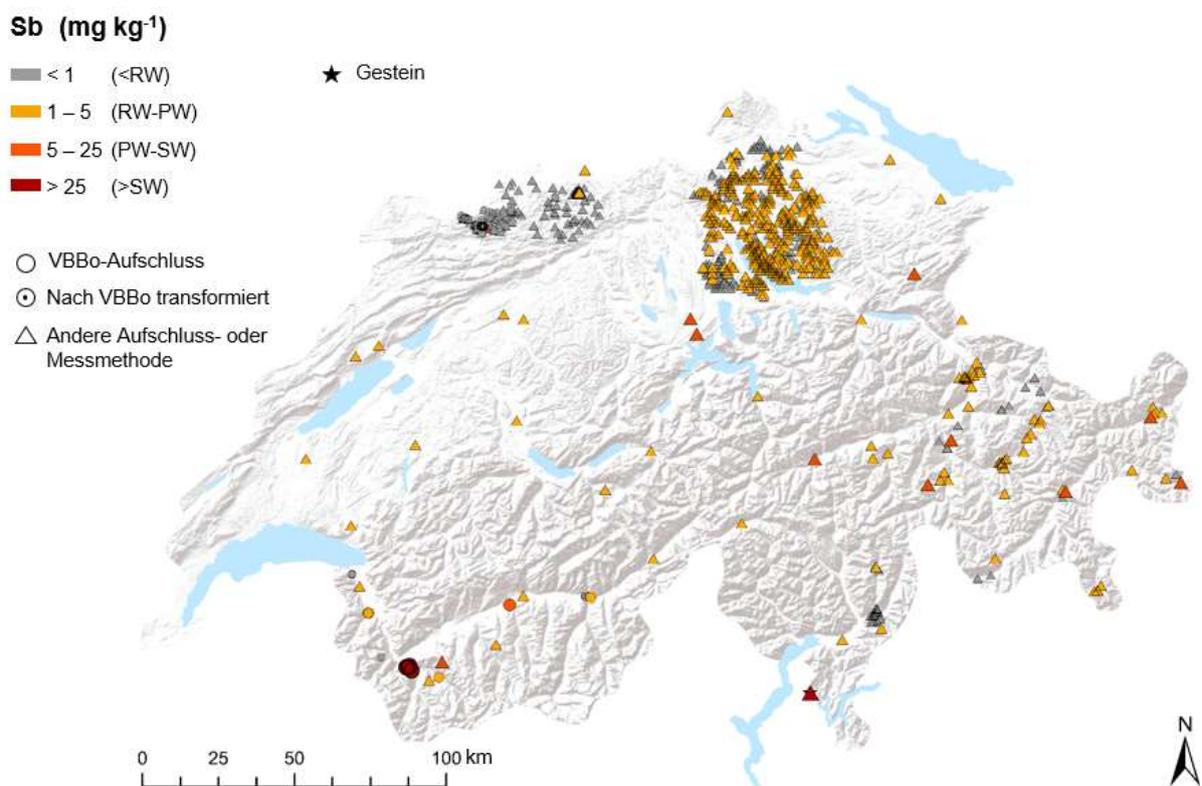


Abbildung 17: Untersuchungsstandorte für Antimon (Sb).

3.3.10 Thallium (Tl)

Die Thalliumkonzentrationen in Schweizer Böden liegen meist unter dem Richtwert oder unter dem Sanierungswert (Abbildung 18). In Graubünden finden sich jedoch viele Datenpunkte mit Thalliumkonzentrationen oberhalb des Sanierungswertes. Ob sich die hohen Tl Konzentrationen in Graubünden wirklich durch geogene Quellen erklären sind oder einen anderen Ursprung haben ist nicht klar. Einzelne Datenpunkte mit Thalliumkonzentrationen oberhalb des Sanierungswertes zeigen sich ausserdem im Kanton Basel-Landschaft und im Kanton Tessin.

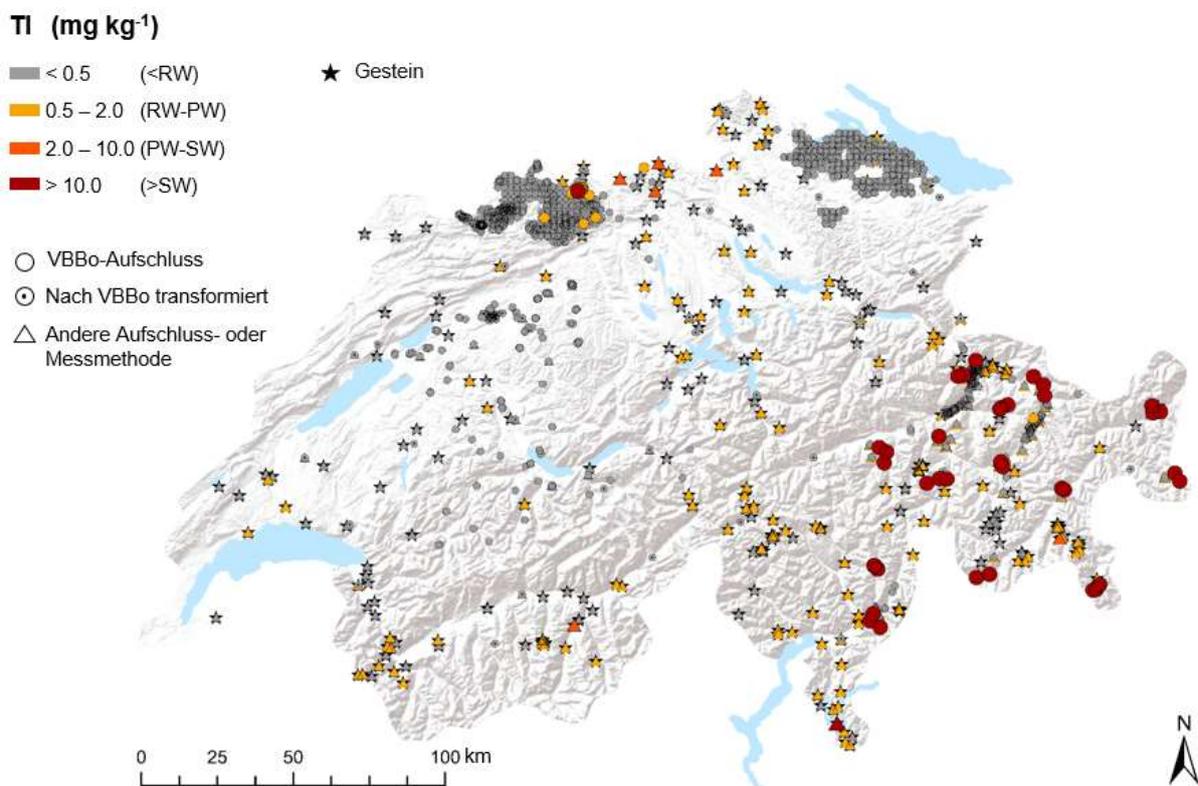


Abbildung 18: Untersuchungsstandorte für Thallium (Tl).

3.3.11 Zink (Zn)

Wie in der Abbildung 19 ersichtlich, bewegen sich in der Schweiz die Zinkkonzentrationen meist unterhalb des Richtwertes und unterhalb des Sanierungswertes. Erhöhte Konzentrationen treten im Jura und im kristallinen Teil der Alpen auf. Eine auffällige Häufung von Konzentrationen oberhalb des Prüfwertes und des Sanierungswertes findet sich im Unterwallis.

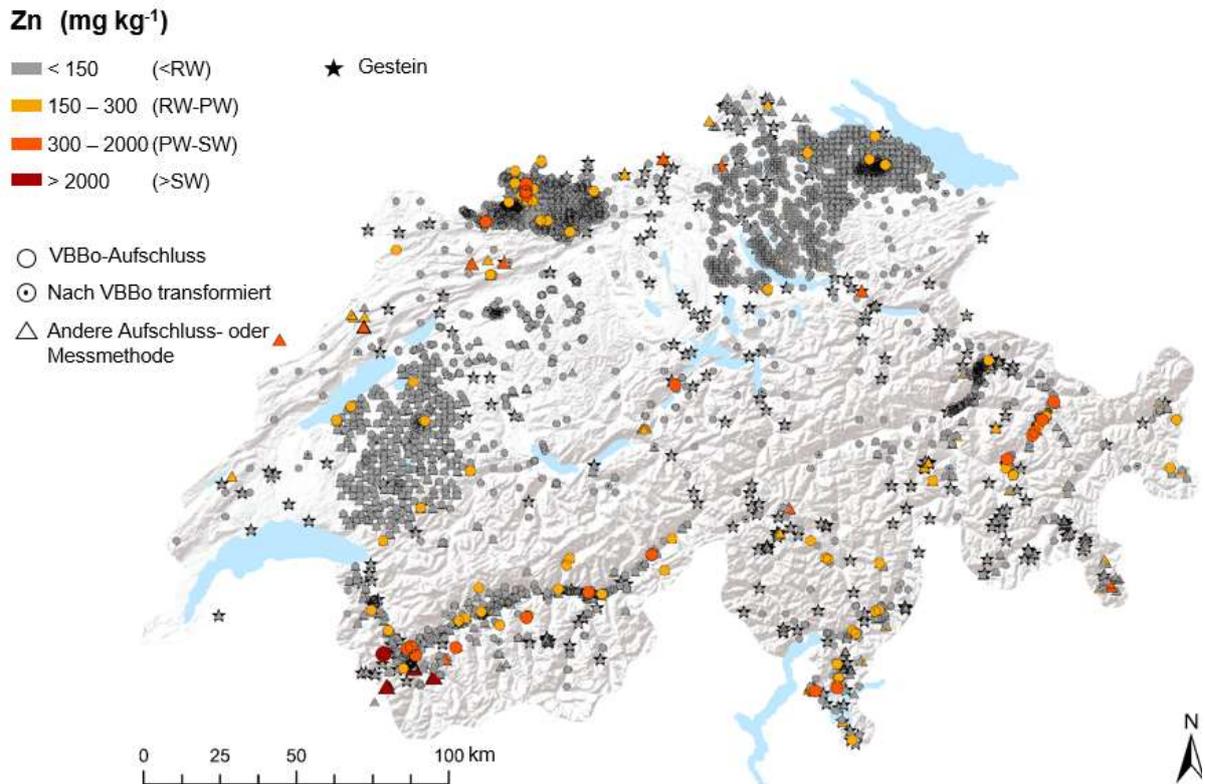


Abbildung 19: Untersuchungsstandorte für Zink (Zn).

3.3.12 Fazit zur Visualisierung der potentiellen geogenen Bodenbelastung

Anhand der Abbildungen 9-19 wurde deutlich, dass bestimmte Regionen eine erhöhte Bodenbelastung mit Metallen aufweisen. Für Cadmium, Kobalt, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink ist die Datenverfügbarkeit ausreichend und für Arsen, Antimon und Quecksilber eingeschränkt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass räumliche und geologische Muster bei ausreichender Datenlage durchaus erkannt werden können. Über die ganze Schweiz gesehen, sind vor allem im kristallinen Teil der Alpen hohe geogene Metallbelastungen zu beobachten. Diese treten vor allem im Unterwallis (Region um Martigny), im Südtessin und in Graubünden auf. Aber auch im Jura (Arsen und Cadmium) gibt es erhöhte Konzentrationen einzelner Elemente. Erhöhte Konzentrationen im Boden lassen sich örtlich mit dem Vorkommen von Gesteinen mit generell hohen Metallgehalten erklären (Tuchs Schmid, 1995). Allerdings erklären die Ausgangsgesteine alleine meist nicht die hohen oder sehr hohen Konzentrationen, sondern es kommen oft noch weitere lokale Faktoren (lokale Anreicherungen, Verwitterung etc.) hinzu.

In weiten Teilen der Schweiz ist die Datenverfügbarkeit noch sehr begrenzt, so dass es schwierig ist, sich dort ein differenziertes Bild der geogenen Belastung zu machen. Bei erhöhten Metallkonzentrationen im Boden ist nicht immer klar, ob die Belastung aus geogenen oder anthropogenen Quellen stammt. Um anthropogene Einflüsse möglichst auszuschliessen wurde bei der Datenanfrage bei den Kantonen explizit nach Daten zu geogenen Bodenbelastungen gefragt. Bei der Datenerhebung aus den wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurden gezielt nur geogene Belastungen aufgenommen. Trotzdem kann an einzelnen Standorten ein anthropogener Einfluss aus anthropogenen Quellen nicht vollständig ausgeschlossen werden. So werden z.B. auch diffuse anthropogene Kontaminationen bei Rasterbeprobungen aufgenommen, auch wenn es bei den Flächen keinen direkten Hinweis auf anthropogene Kontaminationen gibt. Mögliche Fälle wo anthropogene Belastungen erfasst worden sind, sind z.B. Quecksilberbelastungen in der Region Visp (Industrielle Kontamination) oder Kupferbelastungen in der Region Weinfelden (Einsatz von Cu Fungiziden im Weinbau).

Bei der Darstellung der Werte ist wiederum zu beachten, dass die entsprechenden Aufschlussmethoden, nicht immer zu den verwendeten Grenzwerten passen. So

werden z.B. auch Daten, die nach der VBBo-Methode erhoben wurden auf einer Karte dargestellt, in der die farbliche Kennzeichnung nach Bodenwerten erfolgt, die auf einen Königswasser-Aufschluss bezogen sind, d.h. die Konzentrationen im Boden werden im Vergleich zum Grenzwert eher unterschätzt. Der umgekehrte Fall tritt eher selten auf. Die Karten dienen also der Visualisierung der Datenverfügbarkeit und der Metallkonzentrationen in der Schweiz, sollten aber nicht zum direkten Abgleich mit Grenzwerten dienen.

3.4 Verhältnis Ober- zu Unterboden

Starke Anreicherungen von Elementen im Oberboden können ein Hinweis auf einen anthropogenen Eintrag sein. Die Abbildungen 20 und 21 zeigen exemplarisch das Verhältnis der Arsen- und Cadmiumkonzentrationen von Oberboden zu Unterboden. Es wurde alle Aufschluss- und Analysemethoden berücksichtigt. Innerhalb eines Bodenprofils wurden die kleinste und die maximale Tiefe verwendet, wobei Datenpunkte von Streu, Skelett und Gestein ausgeschlossen wurden, um den Vergleich zu vereinheitlichen (nur an wenigen Standorten waren dazu Daten vorhanden, Tabelle 2) und die Untersuchung auf Mineralboden zu beschränken.

Standorte mit erhöhtem Arsen-Verhältnis von Oberboden zu Unterboden (> 3) umfassen allerdings auch oft Standorte, die bekannt dafür sind, dass sie erhöhte geogene Arsenkonzentrationen aufweisen (Abbildung 20). Dazu gehören beispielweise das Jura-Gebirge, das Mont-Blanc-Massiv im Wallis und das Engadin (z. B. Pfeifer et al., 2011; Tisserand et al., 2014).

In Abbildung 21 weisen vor allem das Juragebirge und grosse Teile des Kantons Zürich einen erhöhten Quotienten für Cadmium auf. Quezada-Hinojosa et al. (2009) zufolge sind oolithische Karbonate, die zur Rogenstein-Hauptformation des Bajozioms (Mitteljura) gehören, im gesamten Jura ungewöhnlich stark mit Cadmium angereichert. Böden, die mit dieser Art von Gesteinssubstrat verbunden sind, können in Bezug auf Cadmium natürlich belastet sein. Diese Böden sind also klar geogen belastet, zeigen aber starke oberflächliche Anreicherungen, da sich das Cd bei der Verwitterung anreichert. Im Gegensatz dazu könnten z.B. andere Standorte auch durch anthropogene Quellen beeinflusst sein. Nach Bigalke et al. (2017) ist z.B. die Anreicherung von Cadmium in Ackeroberböden im Vergleich zu Unterböden oft auf mineralische Phosphat-Düngung, atmosphärische Deposition und in einigen Fällen auf

die historische Ausbringung von Klärschlamm zurückzuführen.

As: Quotient von Ober- zu Unterboden

- Keine Daten
- < 1.5
- 1.5 – 3.0
- > 3.0

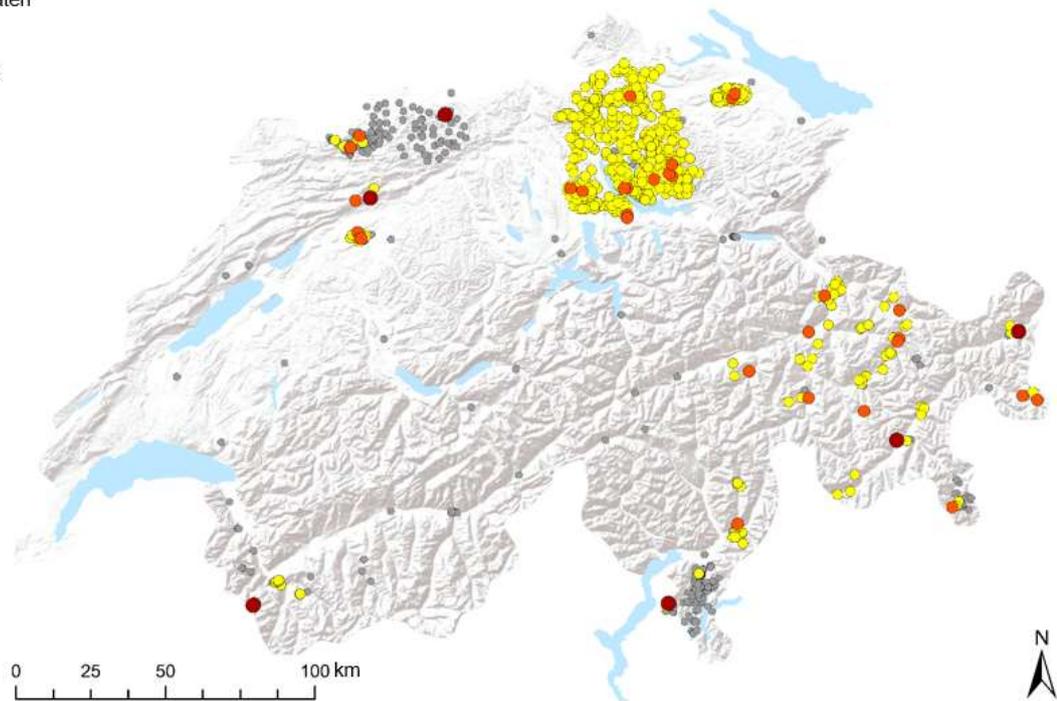


Abbildung 20: Verhältnis von Ober- zu Unterboden für Arsen (As).

Cd: Quotient von Ober- zu Unterboden

- Keine Daten
- < 1.5
- 1.5 – 3.0
- > 3.0

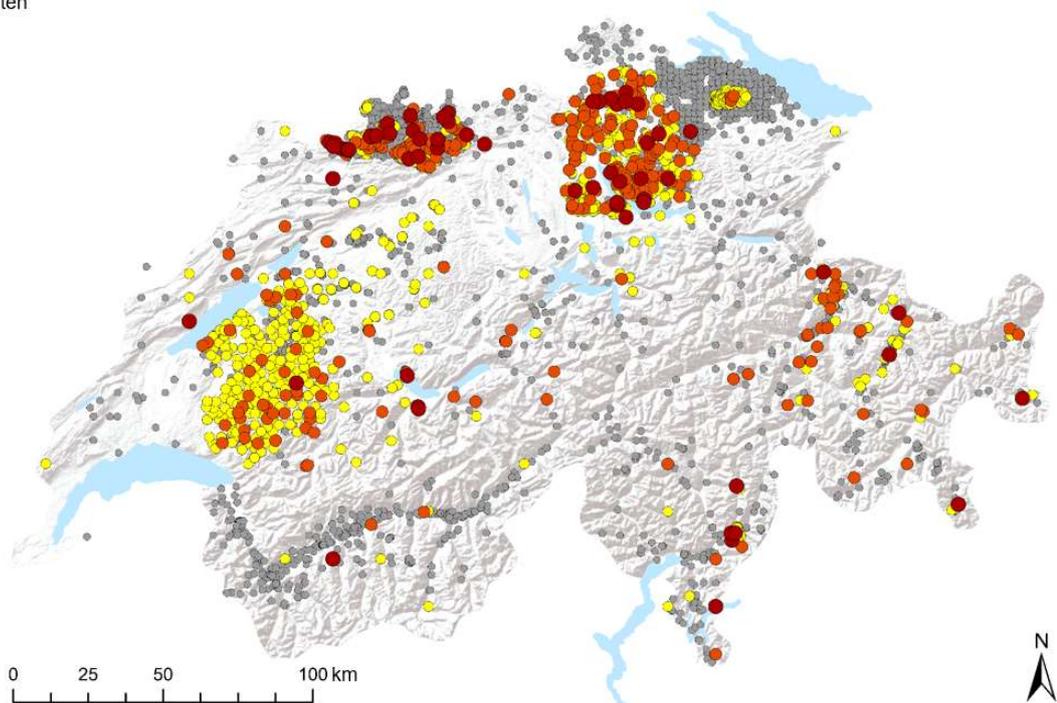


Abbildung 21: Verhältnis von Ober- zu Unterboden für Cadmium (Cd, ohne XRF).

Daher eignen sich diese Quotienten nicht, um zu unterscheiden, ob die Metalle aus einer geogenen oder anthropogenen Quelle stammen. Allerdings können die Verhältnisse in Einzelfällen hilfreich sein, um die Art der Belastung zu beschreiben. Die Verhältnisse von allen Metallen im Ober- zu Unterboden werden hier aus Platzgründen und wegen der beschränkten Aussagekraft nicht dargestellt, sind aber als separate Zeile in dem Datensatz aufgenommen.

3.5 Vergleich der Daten zu Metallkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser und in den Böden/Gestein

Der Vergleich mit Grund- und Trinkwasserdaten wurde für die Elemente durchgeführt, für die bereits die Datenpunkte räumlich dargestellt wurden (Abbildungen 9-19). Es lagen jedoch keine Wasserdaten für Quecksilber vor.

In den geografischen Visualisierungen mit ArcMap wurden drei verschiedene Layer verwendet, wobei die Datenpunkte bzw. Messwerte in der folgenden Reihenfolge dargestellt wurden: Trinkwasser- (BLV), Grundwasser- (NAQUA), Boden-/Gesteinsdatenpunkte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in den Visualisierungen der Boden-/Gesteinsdaten alle Aufschluss- und Messverfahren, alle Analysematerialien und Bodentiefen und nur Datenpunkte oberhalb des Prüfwertes in einem Layer in ArcMap zusammengefasst.

Bei der Kategorisierung der Wasserdaten war das Ziel, die Streuung der Konzentrationen für einzelne Elemente zu erfassen. Die erhöhten Zink-, Kupfer- oder auch Bleikonzentrationen in den Proben geben nicht unbedingt Hinweis auf erhöhte Konzentrationen im ursprünglichen Wasser. Analyseergebnisse können durch verzinkte Installationen und/oder kupfer- bzw. bleihaltige Leitungen in den Messstellen verfälscht sein.

3.5.1 Arsen (As)

Der visuelle Vergleich mit den Wasserdaten zeigt eine gewisse Übereinstimmung mit den in dieser Untersuchung eingespeisten Datenpunkten für Arsen (Abbildung 22). Insbesondere im unteren Rhonetal, wo hohe Arsenkonzentrationen im Boden gefunden wurden, zeigt auch das Wasser erhöhte Konzentrationen auf. Ein ähnliches Bild ergibt sich für das südliche Tessin, den Basler Jura und für das Alpenrheintal. Für einen Vergleich zwischen Boden- und Wasserdaten sind für den Kanton Graubünden nicht genügend Wasserdaten verfügbar. An einzelnen Standorten finden sich erhöhte Konzentrationen im Wasser (z.B. im Engadin), bei denen auch im Boden erhöhte Arsenkonzentrationen gefunden wurden.

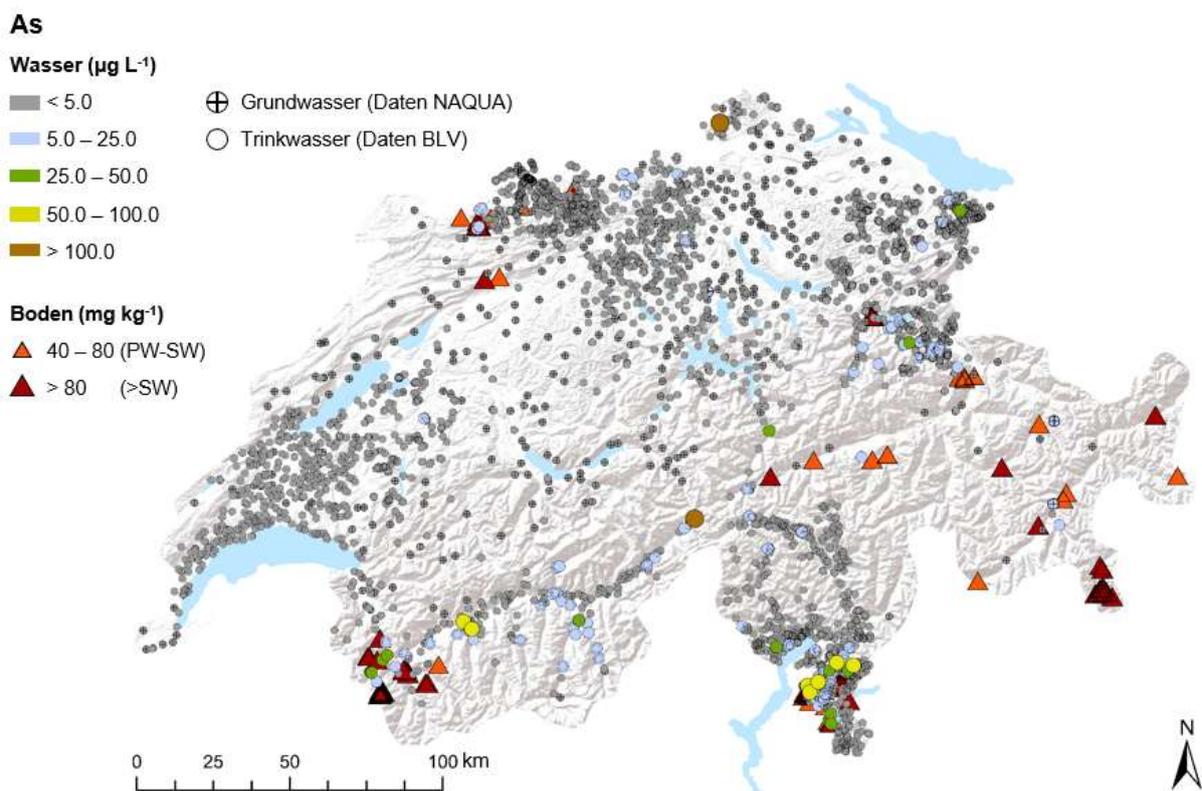


Abbildung 22: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Arsen (As).

3.5.2 Cadmium (Cd)

Für Cadmium finden sich in der ganzen Schweiz Standorte mit erhöhten Konzentrationen im Wasser (Abbildung 23). Im Rhonetal und Südtessin kann eine teilweise Übereinstimmung zwischen den Wasserkonzentrationen und den Bodenkonzentrationen beobachtet werden. Ähnlich ist die Situation im Basler Jura. Vereinzelt gibt es zudem Standorte oder Regionen, die sowohl (isoliert) erhöhte Boden- als auch Wasserkonzentrationen aufweisen. Erhöhte Cadmiumkonzentrationen im Wasser sind in der Südwestschweiz zu beobachten; in den Kantonen Waadt, Freiburg und Neuenburg. Nur wenige Bodendatenpunkte wurden in dieser Region erfasst, wodurch ein direkter Vergleich nicht möglich ist.

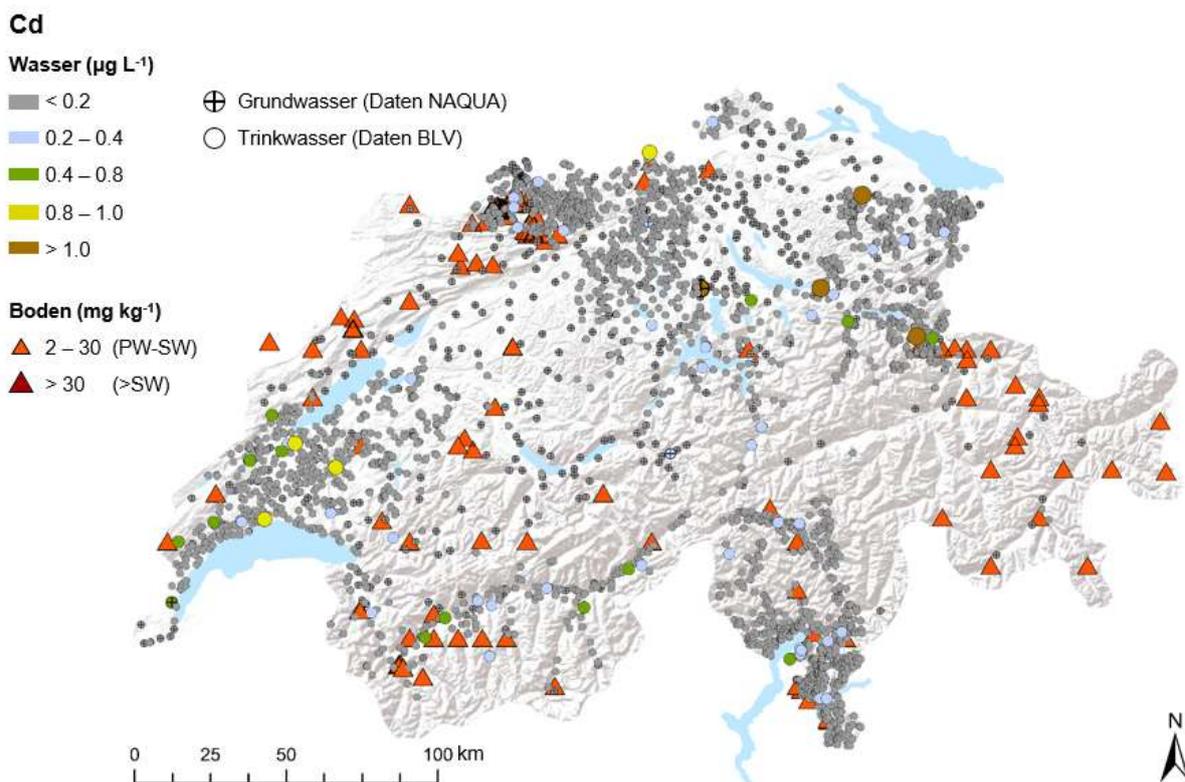


Abbildung 23: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Cadmium (Cd).

3.5.3 Kobalt (Co)

Die Konzentrationen von Kobalt im Wasser sind schweizweit gering (Abbildung 24). Auch die Konzentrationen im Boden liegen meist unter dem Richtwert (Abbildung 11).

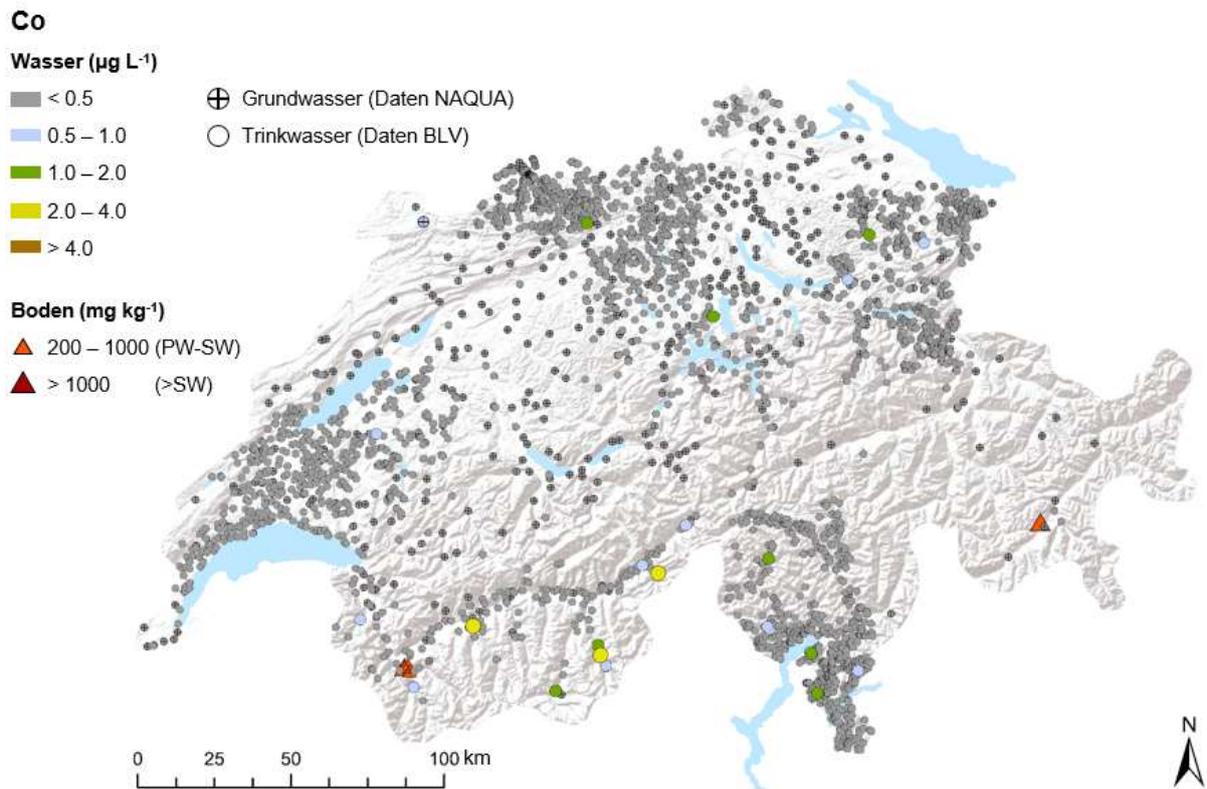


Abbildung 24: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Kobalt (Co).

3.5.4 Chrom (Cr)

Eine Übereinstimmung zwischen den Chromkonzentrationen im Wasser und im Boden findet sich teilweise im Kanton Wallis (z.B. im Eringer Tal). Eine Wechselbeziehung ist auch im südlichen Teil des Kantons Tessin zu erkennen. Im Kanton Graubünden, wo zahlreiche Bodendatenpunkte mit Konzentrationen oberhalb des Prüfwertes liegen, sind nicht genügend Wasserdaten vorhanden.

Erhöhte Chromkonzentrationen im Wasser finden sich flächendeckend in den Kantonen Waadt, Freiburg und Neuenburg sowie in den Kantonen Luzern, Aargau und Zürich. Ebenfalls erhöhte Chromkonzentrationen im Wasser weisen die Kantone St.Gallen und Appenzell (Innerrhoden sowie Ausserrhoden) auf. Für diese genannten Regionen gibt es keine oder nur vereinzelte Bodendatenpunkte oberhalb des Richtwertes.

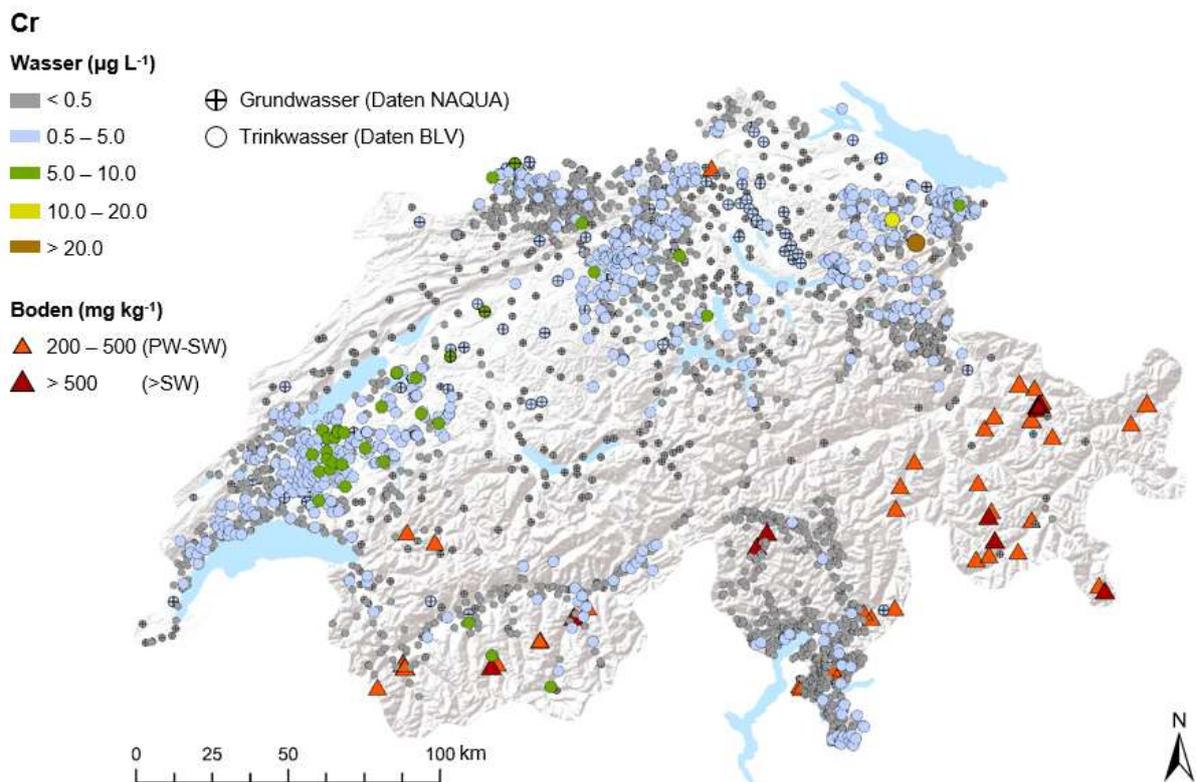


Abbildung 25: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Chrom (Cr).

3.5.5 Kupfer (Cu)

Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Kupferkonzentrationen im Wasser und im Boden finden sich im Basler Jura und im Rhonetal (Abbildung 26). Erhöhte Kupferkonzentrationen im Wasser finden sich in den Kantonen Waadt, Neuenburg, Freiburg, Luzern, Aargau, St. Gallen, Appenzell Innerrhoden und Appenzell Ausserrhoden.

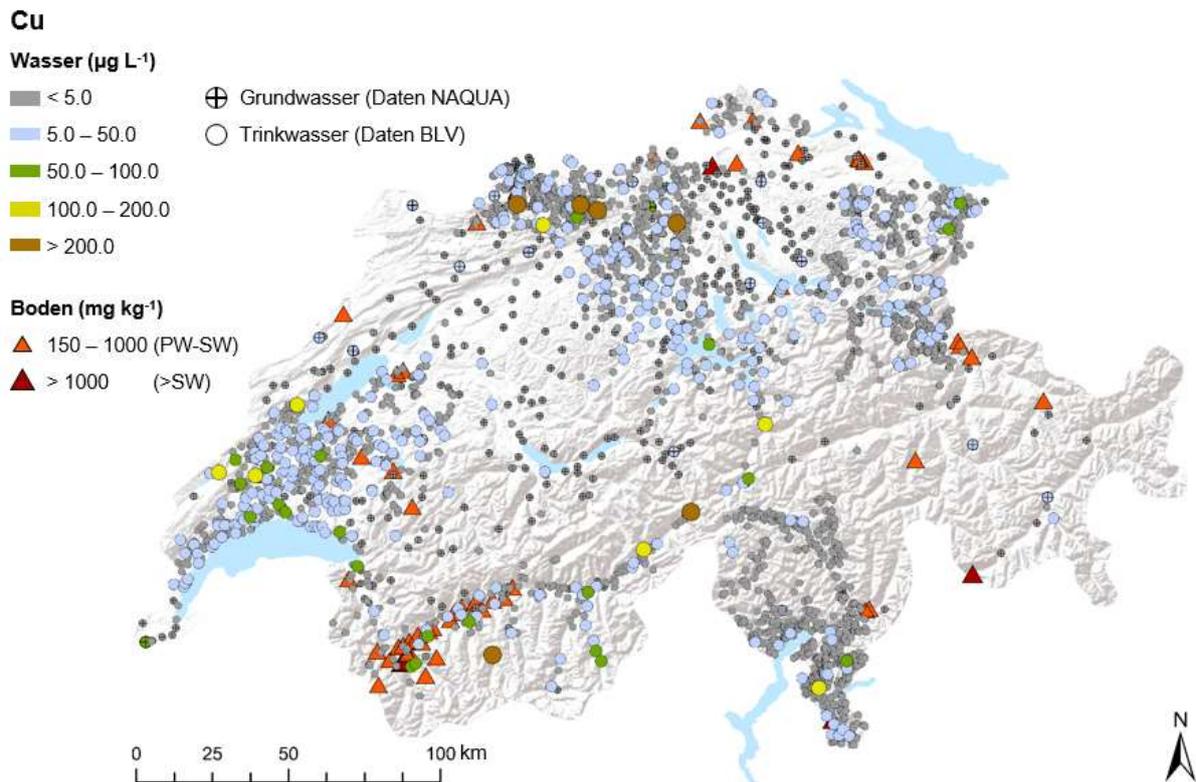


Abbildung 26: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Kupfer (Cu).

3.5.6 Nickel (Ni)

Eine Übereinstimmung zwischen den Nickelkonzentrationen im Wasser und im Boden (Abbildung 27) findet sich vor allem im Kanton Wallis (z.B. rund im Visp und Zermatt). Eine Wechselbeziehung ist auch im südlichen Teil des Kantons Tessin zu erkennen. Im Kanton Graubünden, wo zahlreiche Bodendatenpunkte mit Konzentrationen oberhalb des Prüfwertes liegen, sind nicht genügend Wasserdaten vorhanden.

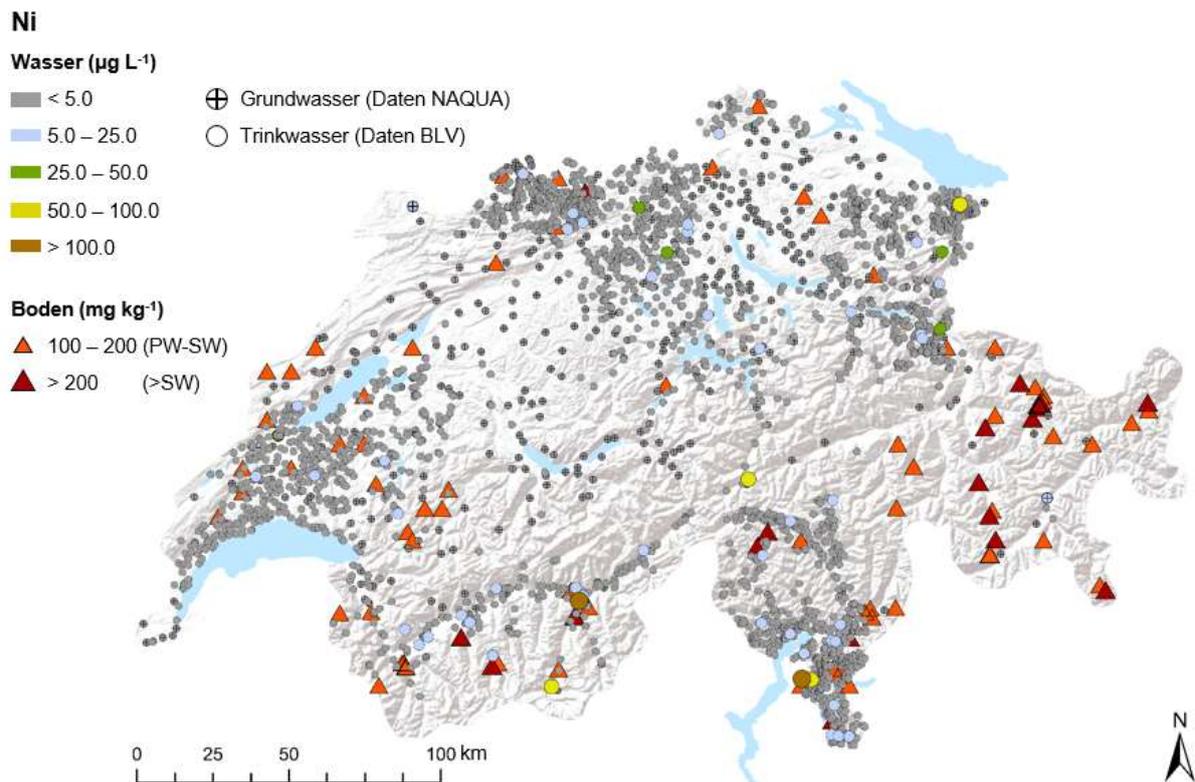


Abbildung 27: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Nickel (Ni).

13.5.7 Blei (Pb)

Abbildung 28 zeigt, dass der visuelle Vergleich mit den Wasserdaten eine teilweise Übereinstimmung mit den Bodendaten für Blei aufweist. Besonders im unteren Rhonetal, wo hohe Bleikonzentrationen im Boden gefunden wurden, weist auch das Wasser erhöhte Konzentrationen auf. Ein ähnliches Bild ergibt sich für das südliche Tessin und das Basler Juragebirge.

In den Kantonen Waadt, Freiburg und Neuenburg sowie in den Kantonen Nidwalden, Luzern und Aargau finden sich verbreitet erhöhte Bleikonzentrationen im Wasser. In diesen Regionen zeigen die verfügbaren Bodendaten keine oder nur einzelne Datenpunkte oberhalb des Richtwertes. Allerdings ist die Bodendatenlage besonders für die Kantone Waadt, Luzern und Aargau gering.

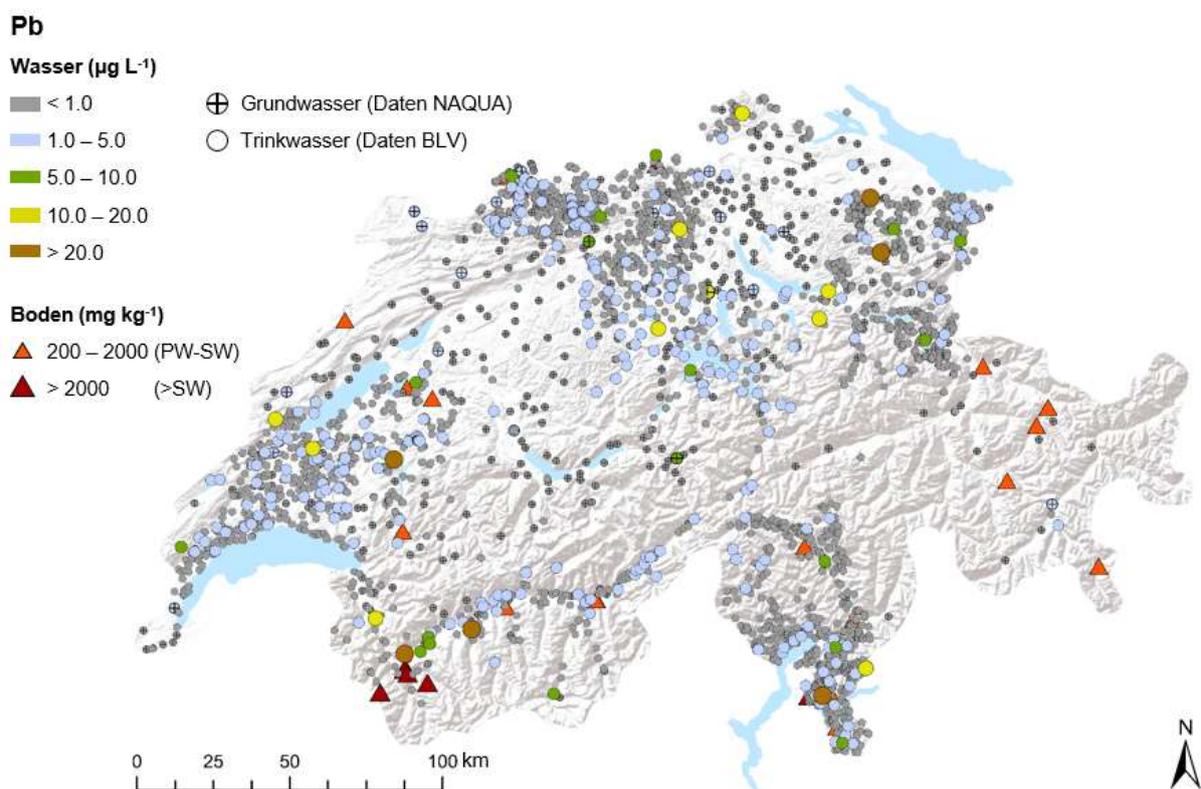


Abbildung 28: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Blei (Pb).

3.5.8 Antimon (Sb)

Die Konzentrationen von Antimon im Grund- und Trinkwasser sind in der gesamten Schweiz niedrig (Abbildung 29). Im Südtessin gibt es vereinzelt erhöhte Antimonwerte im Wasser sowie eine Bodenprobe, die den Sanierungswert überschreitet. Die Verfügbarkeit von Daten für den Boden ist jedoch zu gering, um den Zusammenhang beurteilen zu können.

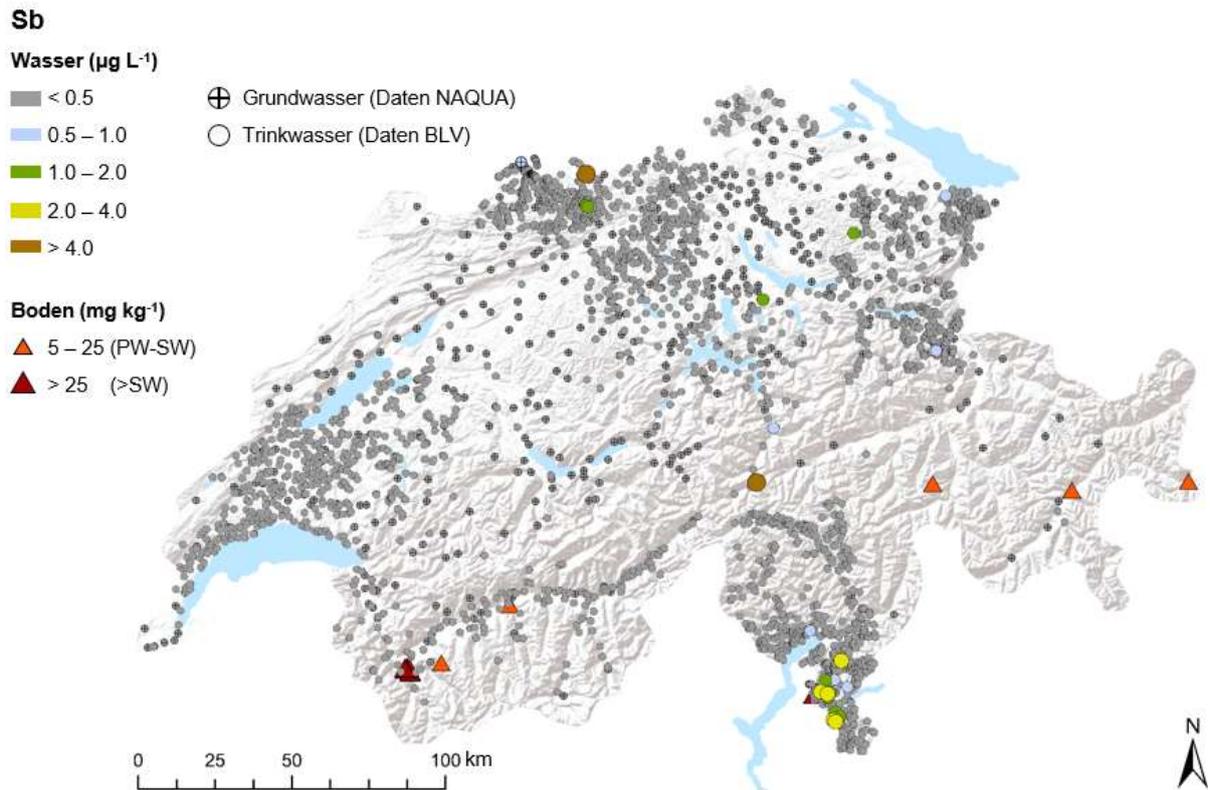


Abbildung 29: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Antimon (Sb).

3.5.9 Thallium (Tl)

Bei den Wasserdaten zeigt der visuelle Vergleich eine gewisse Übereinstimmung mit den Bodendaten für Thallium, obwohl die Wasserkonzentrationen schweizweit sehr niedrig sind (Abbildung 30). Besonders im Juragebirge (Kanton Basel-Landschaft und Aargau), wo hohe Thalliumkonzentrationen im Boden gefunden wurden, weist auch das Wasser erhöhte Konzentrationen auf. Im Kanton Graubünden, mit einer auffälligen Anzahl von Bodendatenpunkten oberhalb des Sanierungswertes, sind nicht genügend Wasserdaten für einen Vergleich verfügbar.

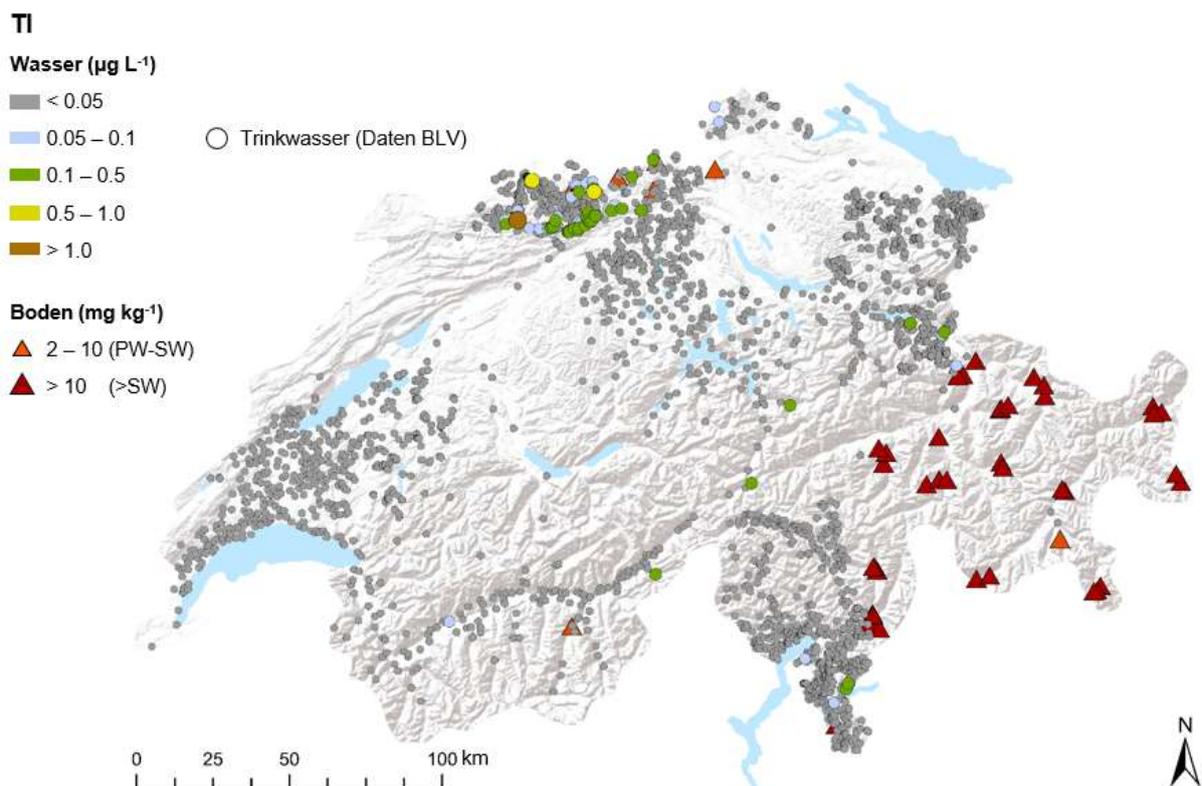


Abbildung 30: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Thallium (Tl).

3.5.10 Zink (Zn)

Erhöhte Zinkkonzentrationen im Wasser sind besonders im Kanton Waadt zu beobachten (Abbildung 31). Dort sind allerdings nur wenige Daten zu Konzentrationen im Boden vorhanden, so dass ein Zusammenhang hier nicht überprüft werden kann. Einen Zusammenhang zwischen den Zinkkonzentrationen im Grund- sowie Trinkwasser und im Boden findet sich teilweise im Basler Jura sowie im Kanton Wallis (südwestlich) und im Tessin.

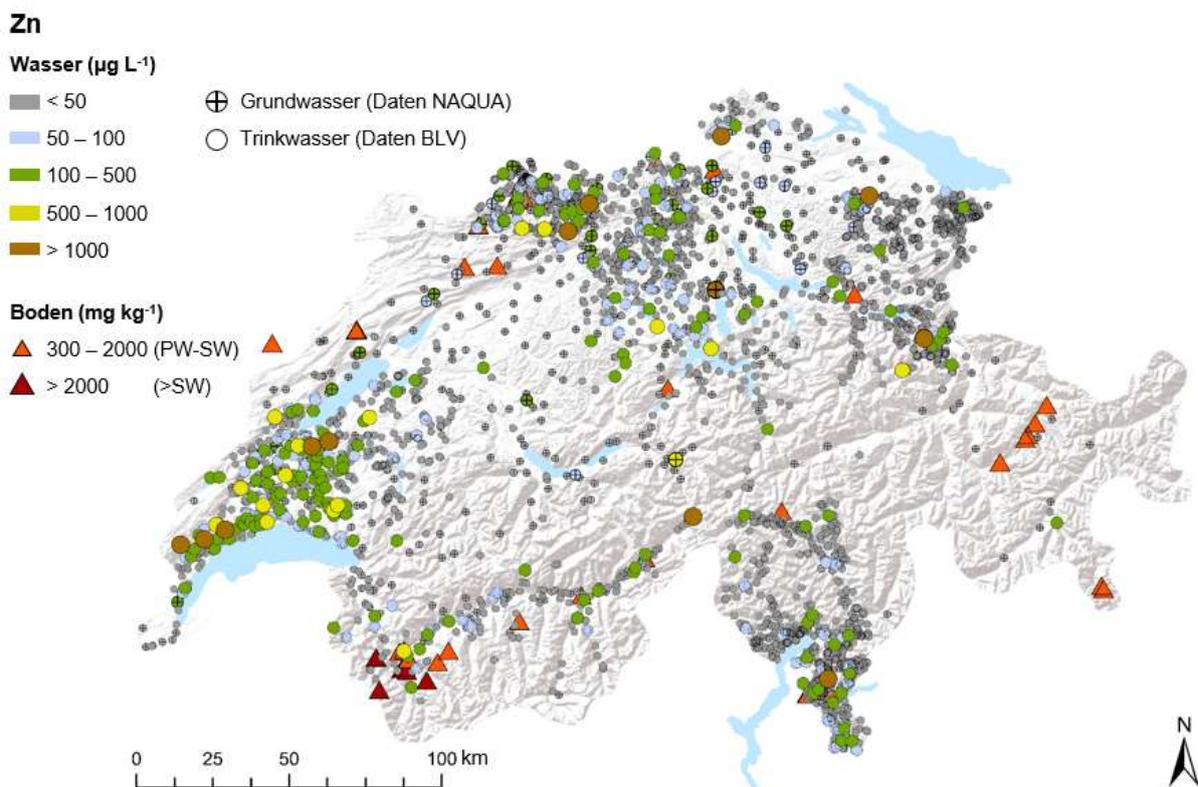


Abbildung 31: Vergleich Boden- und Wasserkonzentrationen für Zink (Zn).

3.5.11 Fazit zum Vergleich der Daten zu Metallkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser und in den Böden/Gestein

Basierend auf den Abbildungen 22-31 wurde deutlich, dass für einzelne Regionen ein Zusammenhang zwischen Boden- und Wasserbelastungen bestehen könnte. Diese Übereinstimmung konnte insbesondere für das untere Rhonetal, den Basler Jura und das südliche Tessin festgestellt werden. Einzelne Elemente wie Kupfer und Zink waren im Wasser in einigen Regionen flächendeckend höher als in anderen Regionen. Allerdings können bei diesen Elementen auch Kontaminationen durch Metallteile in den Förderbrunnen etc. vorliegen.

Es finden sich allerdings bei vielen Orten mit erhöhten Wasser-/Bodengehalten keine direkten Zusammenhänge. Das Fehlen von Zusammenhängen ist wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass das Grundwasser tiefer liegt und auch durch andere geologische Schichten beeinflusst werden kann als der Boden.

4. Schlussfolgerung

Insgesamt wurden 152'212 Datenpunkte in die Datenbank eingespeist und ausgewertet. Diese kamen zu einem grossen Teil von NABODAT, aus den einzelnen Kantonen, von der WSL und aus 41 Publikationen und Berichten.

Im Rahmen, dieser Studie wurden die Daten erstmals homogenisiert und zusammengefasst. Die Daten der drei häufigsten Aufschluss- und Analysemethoden wurden über Regressionsmodelle in einander umgerechnet, um eine vergleichbare Datengrundlage zu schaffen. Damit ergibt sich der bisher grösste verfügbare Datensatz über geogene Bodenbelastungen in der Schweiz. Dieser Datensatz steht nun den Kantonen und dem Bund zum weiteren Gebrauch zur Verfügung. Des Weiteren, werden die Daten in einem anschliessenden Projekt verwendet, um einen geochemischen Atlas der Schweiz zu erstellen.

Der Aufschluss- bzw. Methodenvergleich zeigte, dass der VBBo-Aufschluss für die meisten Metalle im Vergleich zu Königswasser-Aufschluss und XRF eine deutlich geringere Extraktionseffizienz aufweist. Vor allem für Arsen, Chrom, Thallium, Uran und Vanadium liegt die Wiederfindungsrate unter 50 %.

Die Studie lässt Rückschlüsse auf die unterschiedliche Datenverfügbarkeit in den Kantonen und Hotspots für (potentielle) geogene Bodenbelastungen zu. Die räumliche Darstellung der Metallkonzentrationen zeigte, dass verschiedene Metalle (d.h. Arsen, Chrom, Nickel und Zink) lokal angereichert sind und teilweise über den Richt-, Prüf- oder sogar Sanierungswerten liegen.

Durch den Vergleich von Bodendaten und Wasserdaten konnte für einzelne Regionen und Elemente eine Wechselbeziehung festgestellt werden. Einzelne Elemente wie Chrom, Kupfer und Zink waren im Wasser in einigen Regionen flächendeckend höher als in anderen Regionen. Bei diesen Elementen ist aber auch eine Kontamination durch Metallinstallationen nicht auszuschliessen. Der Zusammenhang von erhöhten Metallkonzentrationen im Boden und Grund- und Trinkwasser ist daher anhand der Datengrundlage schwierig zu beurteilen.

5. Literatur

- Bigalke, M., Ulrich, A., Rehmus, A., & Keller, A. (2017). Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland. *Environmental pollution*, 221, 85-93.
- Bundesamt für Statistik, (2020). Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP).
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2017). *Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich - Stand 2017*. Bern, Umwelt-Vollzug Nr.1715.
- Congiu, A., Perucchini, S., & Cesti, P. (2013). *Trace metal contaminants in sediments and soils: comparison between ICP and XRF quantitative determination*. In E3S Web of Conferences (Vol. 1, p. 09004). EDP Sciences.
- Eikmann, T., Heinrich, U., Heinzow, B., & Konietzka, R. (1999). *Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen: Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basiswerte und ihrer Bewertung*. Erich Schmidt, Berlin.
- Pfeifer, H. R., Häussermann, A., Lavanchy, J. C., & Halter, W. (2007). Distribution and behavior of arsenic in soils and waters in the vicinity of the former gold-arsenic mine of Salanfe, Western Switzerland. *Journal of Geochemical Exploration*, 93(3), 121-134.
- Pfeifer, H. R., Hassouna, M., & Plata, N. (2011). Arsenic in the different environmental compartments of Switzerland: an updated inventory. *Metals and Related Substances in Drinking Water*, 250.
- Quezada-Hinojosa, R. P., Matera, V., Adatte, T., Rambeau, C., & Föllmi, K. B. (2009). Cadmium distribution in soils covering Jurassic oolitic limestone with high Cd contents in the Swiss Jura. *Geoderma*, 150(3-4), 287-301.
- Tisserand, D., Pili, E., Hellmann, R., Boullier, A. M., & Charlet, L. (2014). Geogenic arsenic in groundwaters in the western Alps. *J. Hydrology*, 518, 317-325.
- Tuschmid, M.P. (1995) *Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Yamasaki, S. I., Takeda, A., Kimura, K., & Tsuchiya, N. (2016). Underestimation of chromium and zirconium in soils by hydrofluoric acid digestion and inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Soil Science and Plant Nutrition*, 62(2),

121-126.

6. Anhang

Tabelle 6: Beschreibung der Spalten und Attribute der Datenbank.

Spalte	Bedeutung	Datentyp
Standort.ID	Eindeutiger Name des Standortes	CHAR
Projektname	Projektname	CHAR
Projektstatus.Beschreibung	Projektstatus: aktiv, archiviert (Projekt beendet), archiviert (Projekt stillgelegt)	CODE
Untersuchungstyp.Beschreibung	Art der Untersuchung	CODE
ProjektDatum.Von	Projektbeginn Datum	DATE
ProjektDatum.Bis	Projektende Datum	DATE
Kurzinfo	Kurzinfo über Projekt	CHAR
Inhalt	Inhalt des Projekt	CHAR
Anlass	Anlass des Projekts	CHAR
ProjektMandant	Zuordnung eines Standortes zu einem Mandant des NABODAT-Verbundes	CHAR
StaoKoordinate.X.Ost	Schweizer Landeskoordinaten mit CH1903+ (LV95)	INT
StaoKoordinate.Y.Nord	Schweizer Landeskoordinaten mit CH1903+ (LV95)	INT
Aufnahmedatum	Datum der Standortaufnahme	DATE
Kanton	Name des Kantons, in welchem sich der Standort befindet	CODE
BFS.Nummer.aktuell		
Gemeinde.aktuell	Aktuelle Gemeinde	CODE
Anonymisierte.Koordinaten.	Anonymisierung der Standortangaben für andere Mandanten	BOOLEAN
StaoBemerkung	Standortbemerkung	CHAR
Vegetation.Beschreibung	Beschreibung der Vegetation	CHAR
Ausgangsmaterial.oben.Beschreibung	Ausgangsmaterial im Oberboden am Standort	CODE
Eiszeit.oben.Beschreibung	Einfluss der Eiszeit am Standort	CODE
Ausgangsmaterial.unten.Beschreibung	Ausgangsmaterial im Unterboden am Standort	CODE
Eiszeit.unten.Beschreibung	Einfluss der Eiszeit am Standort	CODE
Erhebungs.Nr	Nummer der Erhebung; pro Erhebung können n-Profile (mit der gleichen Erhebungs-art) und 1 Probenahme angelegt	INT

	werden	
Datum.Erhebung	Datum der Erhebung	DATE
Erhebungsart.Beschreibung	Art der Erhebung (Profilart oder Probenahme)	CODE
Probe.Nr	Nummer der Probe; eindeutig innerhalb einer Erhebung	INT
Analysematerial.Beschreibung	Spezifizierung des beprobten Bodenmaterials (Streu, Mineralboden, etc.)	CODE
Beprobungsart.Beschreibung	Entnahmeort des Probematerials (z.B. Profil, Fläche etc.)	CODE
Probentyp.Beschreibung	Art der entnommenen Probe	CODE
ProbeTiefe.Von._cm_	Tiefe-von der Probe [cm]	INT
ProbeTiefe.Bis._cm_	Tiefe-bis der Probe [cm]	INT
Flaeche._m2_...Laenge._m_		
Einstiche		
Geraet.Beschreibung	Verwendetes Gerät bei Probenahme	CODE
Dimension._l.bzw..kg_	Dimension der Probe	DEC
ProbeBemerkung	Bemerkung der Probe	CHAR
Untersuchungskampagne	Kennzahl der Untersuchungskampagne	INT
Wiederholung	Anzahl Messwiederholung	INT
SM	Metall/ Element	CODE
SM_Bestimmungs.Nr	Nummer der Bestimmungen (bei Mehrfachbestimmungen) der gleichen Probe (Metall)	INT
SM_MessungDatum	Datum der Messung (Metall)	DATE
SM_Messwert	Metall Messwert	DEC
SM_Einheit	Masseinheit des Messwertes (Metall)	CODE
SM_Messwert.unterhalb.Bestimmungsgrenze	Wenn der Messwert unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt (1/0; 1 für unterhalb Bestimmungsgrenze) (Metall)	INT
SM_Bestimmungsgrenze	Bestimmungsgrenze der Messung (Metall)	DEC
SM_Referenzmethode	Referenzmethode (Metall)	CODE
SM_Nachweisgrenze	Nachweisgrenze der Messung (Metall)	DEC
SM_Methode.Aufschluss.Beschreibung	Beschreibung der Aufschlussmethode (Metall)	CODE
SM_Referenzmethode.Aufschluss	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (Metall)	CODE

SM_Methode.Messung.Beschreibung	Beschreibung Messmethode (Metall)	CODE
SM_Referenzmethode.Messung	Referenzmethode zur Messmethode (Metall)	CODE
SM_Methode.Aufbereitung.Beschreibung	Beschreibung Aufbereitungsmethode (Metall)	CODE
SM_Methode.Aufbereitung.Ergänzung	Ergänzung Aufbereitungsmethode (Metall)	CODE
SM_Referenzmethode.Aufbereitung	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (Metall)	CODE
SM_MessungBemerkung	Bemerkung zur Messung (Metall)	CODE
SM_Labor	Labor	CHAR
pH_Messwert	pH Messwert	DEC
pH_Methode.Aufschluss.Beschreibung	Beschreibung der Aufschlussmethode (pH)	CODE
pH_Referenzmethode.Aufschluss	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (pH)	CODE
pH_Methode.Messung.Beschreibung	Beschreibung Messmethode (pH)	CODE
pH_Referenzmethode.Messung	Referenzmethode zur Messmethode (pH)	CODE
pH_Methode.Aufbereitung.Beschreibung	Beschreibung Aufbereitungsmethode (pH)	CODE
pH_Methode.Aufbereitung.Ergänzung	Ergänzung Aufbereitungsmethode (pH)	CODE
pH_Referenzmethode.Aufbereitung	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (pH)	CODE
pH_MessungBemerkung	Bemerkung zur Messung (pH)	CODE
Unique.Pt		
humus_Messwert	Humus Messwert	DEC
humus_Einheit	Masseinheit des Messwertes (humus)	CODE
humus_Methode.Aufschluss.Beschreibung	Beschreibung der Aufschlussmethode (Humus)	CODE
humus_Referenzmethode.Aufschluss	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (Humus)	CODE
humus_Methode.Messung.Beschreibung	Beschreibung Messmethode (Humus)	CODE
humus_Referenzmethode.Messung	Referenzmethode zur Messmethode (Humus)	CODE
humus_Methode.Aufbereitung.Be	Beschreibung Aufbereitungsmethode	CODE

schreibung	(Humus)	
humus_Methode.Aufbereitung.Ergaenzung	Ergänzung Aufbereitungsmethode (Humus)	CODE
humus_Referenzmethode.Aufbereitung	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (Humus)	CODE
humus_MessungBemerkung	Bemerkung zur Messung (Humus)	CODE
corg_Messwert	Organischer Gehalt Messwert	DEC
corg_Einheit	Masseinheit des Messwertes (Organischer Gehalt)	CODE
corg_Methode.Aufschluss.Beschreibung	Beschreibung der Aufschlussmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_Referenzmethode.Aufschluss	Referenzmethode zur Aufschlussmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_Methode.Messung.Beschreibung	Beschreibung Messmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_Referenzmethode.Messung	Referenzmethode zur Messmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_Methode.Aufbereitung.Beschreibung	Beschreibung Aufbereitungsmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_Methode.Aufbereitung.Ergaenzung	Ergänzung Aufbereitungsmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_Referenzmethode.Aufbereitung	Referenzmethode zur Aufbereitungsmethode (organischer Kohlenstoff)	CODE
corg_MessungBemerkung	Bemerkung zur Messung (organischer Kohlenstoff)	CODE
Bemerkung.Datenaufnahme.Publikation	Bemerkung zur Datenaufnahme	CODE
Name.Publikation.Bericht	Name der Publikation, Master- oder Diplomarbeit oder des amtliches Berichts	CHAR
Nach.VBBo.transformiert	Nach VBBo transformierter Wert	DEC
Verhaeltnis.Bodenprofil	Quotient zwischen Ober- und Unterboden	DEC

Tabelle 7: Anzahl aller aufgenommenen Datenpunkte pro Kanton.

Kanton	Anzahl Datenpunkte	Kanton	Anzahl Datenpunkte
AG	2'042	NW	57
AI	35	OW	515
AR	42	SG	920
BE	13'917	SH	571
BL	22'007	SO	1'664
BS	120	SZ	455
FR	20'594	TG	6'287
GE	11	TI	4'294
GL	190	UR	335
GL/SG	9	VD	710
GR	36'257	VS	13'105
IT	33	ZG	82
JU	439	ZH	26'314
LU	510	Keine Angaben	209
NE	488		

Tabelle 8: Regelungswerten nach VBBo und Eikmann et al. 1999 (gemäss Anhang. 8, Handbuch Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden, BUWAL 2005).

Metall	Richt- bzw. Basiswert mg kg⁻¹	Prüfwert mg kg⁻¹	Sanierungs- bzw. Eingreifwert mg kg⁻¹
As	20 ^a	40 ^c	80 ^e
Ba	100 ^a	300 ^c	1'500 ^e
Cd	0.8 ^b	2 ^d	30 ^f
Co	50 ^a	200 ^c	1'000 ^e
Cr	50 ^b	200 ^c	500 ^e
Cu	40 ^b	150 ^d	1'000 ^f
Hg	0.5 ^b	10 ^c	50 ^e
Mo	5 ^b	20 ^c	100 ^e
Ni	50 ^b	100 ^c	200 ^e
Pb	50 ^b	200 ^d	2'000 ^f
Sb	1 ^a	5 ^c	25 ^e
Sn	50 ^a	100 ^c	500 ^e
Tl	0.5 ^a	2 ^c	10 ^e
U	5 ^a	10 ^c	50 ^e
V	50 ^a	100 ^c	400 ^e
Zn	150 ^b	300 ^c	2'000 ^f

^a Basiswert nach Eikmann et al. 1999; vergleichbar mit Richtwert (Totalgehalt) nach VBBo. Nutzung: Multifunktional

^b Richtwerte (Totalgehalt) nach VBBo (mg/kg TS für Böden bis 15 % Humus)

^c Prüfwert nach Eikmann et al. 1999; vergleichbar mit Prüfwert (Totalgehalt) nach VBBo. Nutzung: Landwirtschaftliche Nutzflächen, Obst- und Gemüsebau

^d Prüfwert (Totalgehalt) nach VBBo. Nutzung: Futterpflanzenanbau (mg/kg TS für Böden bis 15 % Humus)

^e Eingreifwert nach Eikmann et al. 1999; vergleichbar mit Sanierungswert (Totalgehalt) nach VBBo. Nutzung: Landwirtschaftliche Nutzflächen, Obst- und Gemüsebau

^f Sanierungswert (Totalgehalt) nach VBBo. Nutzung: Landwirtschaft und Gartenbau (mg/kg TS für Böden bis 15 % Humus)

Tabelle 9: Anzahl aller aufgenommenen Datenpunkte pro Metall

Metall	Anzahl Datenpunkte	Metall	Anzahl Datenpunkte
Ag	66	Mo	6'593
Al	120	Na	76
As	4'210	Nb	145
Au	51	Ni	14'341
B	66	P	55
Ba	1'591	Pb	14'874
Be	102	Pd	51
Bi	145	Pr	17
Br	1'035	Pt	51
Ca	105	Rb	390
Cd	14'255	Re	34
Ce	235	S	163
Co	12'110	Sb	2'306
Cr	14'028	Sc	163
Cs	148	Se	67
Cu	16'397	Si	11
Dy	17	Sm	23
Er	17	Sn	1'421
Eu	17	Sr	529
F	4'090	Ta	85
Fe	379	Tb	17
Ga	1'176	Te	98
Gd	17	Th	202
Ge	45	Ti	311
Hf	106	Tl	5'519
Hg	8'183	U	2'025
In	51	V	4'202
K	302	W	96
La	163	Y	78
Li	66	Yb	17
Mg	113	Zn	16'743
Mn	369	Zr	1'638

Eingespeiste Daten aus Publikationen

- Amt für Landwirtschaft und Umwelt Obwalden (2005). Schadstoffbelastung der Böden im Kanton Obwalden – Resultate der Untersuchungskampagnen von 1992 und 2002.
- Amt für Lebensmittelkontrolle und Umweltschutz Schaffhausen (2000). Schwermetallbelastung der Böden im Kanton Schaffhausen - Resultate der Zweitbeprobung 1999 (KABO2) und Vergleich mit der Erstbeprobung (KABO1) 1989.
- Amt für Umweltschutz und Energie (2015). Geogene Hintergrundbelastungen in den Oberböden im Kanton Basel-Landschaft.
- Andermatt Sedrun Sport AG (2016). Ablagerung geogen-arsenhaltiges Aushub- und Ausbruchmaterial - Gefährdungsabschätzung geogenes Arsen.
- Atteia, O., Thélin, P., Pfeifer, H. R., Dubois, J. P., & Hunziker, J. C. (1995). A search for the origin of cadmium in the soil of the Swiss Jura. *Geoderma*, 68(3), 149-172.
- Baize, D., & Sterckeman, T. (2001). Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. *Science of the Total Environment*, 264(1-2), 127-139.
- Bayon, R.C, (n.d). The effects of earthworm activities (*Aporrectodea giardi*) on the distribution of geogenic arsenic and soil nutrients. Dissertation, Institute of Biology Laboratory Soil & Vegetation, Université de Neuchâtel.
- Blanc, N., (2010). Contamination naturelle de l'environnement par l'arsenic en milieu alpin. Le cas des *Petoudes*, Val de Trient (VS). Master thesis, Fac. Geosci. Env., University of Lausanne.
- Chawla, F., Steinmann, P., Pfeifer, H. R., & Froidevaux, P. (2010). Atmospheric deposition and migration of artificial radionuclides in Alpine soils (Val Piora, Switzerland) compared to the distribution of selected major and trace elements. *Science of the total environment*, 408(16), 3292-3302.
- Chiandussi, L. (2010). L'arsenic et ses interactions avec les communautés microbiennes dans une zone marécageuse de la Haute-Engadine, Grisons. Master thesis, Fac. Geosci. Env., University of Lausanne.

- Degen, C., (2005). Etude de l'impact des lombriciens sur la dynamique de l'arsenic (disponibilité, transfert) dans les sols naturellement enrichis. Master thesis, Université Neuchâtel.
- Diana, F. (2013). *Caractérisation de la matière organique et relation avec l'arsenic des sols de la région de Sessa-Astano (Malcantone/ Ticino)*. Master thesis, Fac. Geosci. Env., University of Lausanne.
- Donzel, P.-Y. (2001). Arsenic dans les roches et les sols du Haut-Jura suisse : distribution générale sur la chaîne et étude détaillée dans la région du Weissenstein (SO). Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Lausanne.
- Dubois, J. P., Okopnik, F., Benitez, N., & Védy, J. C. (1998). Origin and spatial variability of cadmium in some soils of the Swiss Jura. In *Proceedings of the 16th World Congress on Soil Science, Montpellier, France*.
- Egli, M., Berger, A., Kündig, R., Krebs, R., de Castro Portes, R., Berger, R., & Widmer, R. (2017). The long-term interaction of mine tailings with soils and the wider environment: Examples from Mont Chemin, Switzerland. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 53-69.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (2019). Risikoanalyse geogenes Arsen Gefährdungsabschätzung bzgl. Ablagerung von mit geogenem Arsen belasteten Ausbruchmaterial.
- École polytechnique fédérale de Lausanne (1993). Teneur en cadmium des sols de la région de La Chaux-De-Fonds - Rapport préliminaire sur l'état actuel de la question.
- Fournier, C. (2004). L'Arsenic en Valais: Association entre Anomalies et Formations Géologiques et Etude de la Contamination par le Gisement de la Rasse. Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Lausanne.
- Gasser, U. G., Juchler, S. J., Sticher, H., & Hobson, W. A. (1995). The fate of chromium and nickel in subalpine soils derived from serpentinite. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(2), 187-195.
- Greppin, R. (1997). *Spéciation des métaux issus d'une minéralisation d'arsénopyrite dans les sols et les eaux d'un pâturage alpin (Bruson, Valais)*. Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Lausanne.

- Henry, G. (2003). *Etude des dispersions de métaux traces autour des minéralisations du Col des Mines*. Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Lausanne.
- Hofer, Leu & Schwarz (2016). Förderprogramm Boden Kanton Bern, Schlussbericht 2016.
- Holinger AG (2018). *Untersuchung des Untergrunds auf geogen bedingte Arsenbelastung in Laufen: Mischwasserbecken Herz-Jesu-Kirche, Parz.1872*.
- Holinger AG (2018). *Untersuchung des Untergrunds auf geogen bedingte Arsenbelastung in Laufen: «wohne.birs.laufen», Parzelle Nr. 70, Baselstrasse 70*.
- Jacquat, O., Voegelin, A., Juillot, F., & Kretzschmar, R. (2009). Changes in Zn speciation during soil formation from Zn-rich limestones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(19), 5554-5571.
- Le Bayon, R. C., Matera, V., Kohler-Milleret, R., Degen, C., & Gobat, J. M. (2011). Earthworm activity alters geogenic arsenic and soil nutrient dynamics. *Pedobiologia*, 54, S193-S201.
- Loup, E. (2016). Uranium accumulation in the soils of the Dischma valley (Switzerland): Origins and behavior of uranium in wetlands. Master thesis, Fac. Geosci. Env., University of Lausanne.
- Martini, R. & Pillet, M. (1996). *Etude biogéochimique comparée des bassins versants de la Breggia et de la Magliasina, Tessin*. Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Lausanne.
- Maurer-Troxler C., Chervet A., Sturny W. & Zimmermann S. (2009). *Schwermetallbelastung und Versauerungszustand von Waldböden im Kanton Bern*. Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, Zollikofen.
- Nardini. Y. (2003). *Etude pédologique du Val Piora TI; influences des facteurs géologie, climat, végétation et topographie sur l'évolution des sols*. Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Genève.
- Pfeifer, H. R., Derron, M. H., Rey, D., Schlegel, C., Atteia, O., Dalla Piazza, R., ... & Mandia, Y. (2000). Natural trace element input to the soil-sediment-water-plant system: examples of background and contaminated situations in Switzerland, Eastern France and Northern Italy. In *Trace metals in the environment* (Vol. 4,

pp. 33-86). Elsevier.

- Pfeifer, H. R., Gueye-Girardet, A., Reymond, D., Schlegel, C., Temgoua, E., Hesterberg, D. L., & Chou, J. W. (2004). Dispersion of natural arsenic in the Malcantone watershed, Southern Switzerland: field evidence for repeated sorption–desorption and oxidation–reduction processes. *Geoderma*, *122*(2-4), 205-234.
- Pfeifer, H. R., Häussermann, A., Lavanchy, J. C., & Halter, W. (2007). Distribution and behavior of arsenic in soils and waters in the vicinity of the former gold-arsenic mine of Salanfe, Western Switzerland. *Journal of Geochemical Exploration*, *93*(3), 121-134.
- Pfeifer, H. R., Vust, M., Meisser, N., Doppenberg, R., & Torti, R. C. (1994). Uranium-enrichment in soils and plants in the vicinity of a pitchblende vein at La Creusaz/Les Marecottes (W of Martigny, Valais, Switzerland). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, *87*(2), 491-501.
- Quezada-Hinojosa, R. P., Föllmi, K. B., Verrecchia, E., Adatte, T., & Matera, V. (2015). Speciation and multivariable analyses of geogenic cadmium in soils at Le Gurnigel, Swiss Jura Mountains. *Catena*, *125*, 10-32.
- Quezada-Hinojosa, R. P., Matera, V., Adatte, T., Rambeau, C., & Föllmi, K. B. (2009). Cadmium distribution in soils covering Jurassic oolitic limestone with high Cd contents in the Swiss Jura. *Geoderma*, *150*(3-4), 287-301.
- Quezada-Hinojosa, R., Föllmi, K. B., Gillet, F., & Matera, V. (2015). Cadmium accumulation in six common plant species associated with soils containing high geogenic cadmium concentrations at Le Gurnigel, Swiss Jura Mountains. *Catena*, *124*, 85-96.
- Regenspurg, S., Margot-Roquier, C., Harfouche, M., Froidevaux, P., Steinmann, P., Junier, P., & Bernier-Latmani, R. (2010). Speciation of naturally-accumulated uranium in an organic-rich soil of an alpine region (Switzerland). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *74*(7), 2082-2098.
- Rey, D. (2006). *Arsenic dans les sols et eaux d'Astano (TI)*. Diploma thesis, Institut de Minéralogie et de Gèologie, Université de Lausanne.
- Scheder, M. & Streiff, A. (1997). *Etude biogéochimique du bassin verant de la Borgne (Val d'Hérens, Valais Suisse)*. Diploma thesis, Geosci. Env., University of

Lausanne.

Schmit, V. (2000). L'arsenic entre le Val Colla et le Val d'Isone (TI). Etude hydrogéologique et pédologique. Master thesis, Fac. Geosci. Env., University of Lausanne.

Temgoua, E. & Pfeifer, H.-R- (2015). Toposequence distribution of arsenic in soils at southern Switzerland: evidence of complex weathering and re-deposition processes. Unpublished manuscript, Centre d'Analyse Minérale, Université de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

Tuchs Schmid, M.P., (1995). Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehaltenbodenbildender Gesteine der Schweiz. Umweltmaterialien 32, BUWAL, Bern.

Voirol, J-M. (2006). Étude sur l'origine et la relation de l'arsenic avec les contaminants radiogéniques naturels dans les eaux du Val Poschiavo Les Grisons, GR. Master thesis, Fac. Geosci. Env., University of Lausanne.