



## *Geogene Bodenbelastung im Kanton Solothurn*

*Probenahmekampagne 2022 (Schlussbericht)*



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1	Fachberichte	1
2.2	Geologische Grundlagen	1
2.3	Gesetzliche Grundlagen	1
<b>3</b>	<b>Auswahl Probestandorte</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Hypothesen</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Methode</b>	<b>5</b>
5.1	Probenahme	5
5.2	Labor	7
5.3	Bodenkennwerte	8
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>8</b>
6.1	Gemessene Parameter und Anzahl Überschreitungen	8
6.2	Räumliche Übersicht	10
6.3	Anteil der Überschreitungen nach geologischen Schichten	11
6.4	Statistische Analysen	13
6.4.1	Hypothese 1	13
6.4.2	Hypothese 2	14
6.4.3	Korrelation der Parameter	17
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>18</b>
7.1	Vergleich mit den Resultaten aus dem Bericht Pfirter	18
7.2	Hypothese 1	20
7.3	Hypothese 2	21
7.4	Unterscheidung anthropogene versus geogene Bodenbelastung	21
7.4.1	Mögliche Ursachen für anthropogene Belastung	22
7.4.2	Mögliche Ursachen für geogene Belastung	23
7.4.3	Waldflächen vs. Landwirtschaftsflächen	24
7.4.4	Cadmiumgehalte	25
<b>8</b>	<b>Fazit / Ausblick</b>	<b>27</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>29</b>

<b>Anhang A</b>	<b>Standorte Probenahme</b>	<b>A-1</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Kartografische Auswertung</b>	<b>B-1</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Parametergehalte in den verschiedenen Schichten</b>	<b>C-1</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Pearson-Korrelation</b>	<b>D-1</b>
<b>Anhang E</b> E-1	<b>Statistische Auswertung zum Parametergehalt Oberboden/Ausgangsmaterial</b>	

# 1 Einleitung

Im Auftrag vom Amt für Umwelt (AfU) des Kantons Solothurn wurde durch das Büro Gasche-Bodengutachten in den Jahren 2021 und 2022 eine Untersuchung zur geogenen Bodenbelastung im Kanton Solothurn durchgeführt.

Die Untersuchung beinhaltet die Standortauswahl, die Probenahme sowie die Auswertung der Laboranalysen und die Zusammenfassung der Resultate im vorliegenden Schlussbericht.

Die Untersuchung basiert auf dem Vorwissen der Berichte «Geogene Bodenbelastung im Kanton Solothurn» von Dominik Zahner (AfU) und «Geogene Belastungen mit Schwermetallen/ Halbmetallen im Kanton SO, Geologischer Kurzbericht» von Urs Pfirter (Pfirter, 2021; Zahner, 2020).

## 2 Grundlagen

### 2.1 Fachberichte

Der Bericht von Dominik Zahner fasst die drei Beprobungskampagnen in den Regionen Bucheggberg und Laufental (2015 – 2019) sowie weitere Voruntersuchungen im Kanton Solothurn zusammen. Aufgrund dieses Berichts erfolgte die Beprobung von spezifischen geologischen Schichten und darauf basierend der Bericht von Dr. Urs Pfirter. In diesem wird dargelegt, welche Gesteinsformationen im Verdacht stehen, geogene Belastungen mit Schwer- und Halbmetallen zu verursachen. Zudem macht er Aussagen dazu, wie die verdächtigen Schichten im Bezug zur Oberfläche liegen müssen, um als relevant zu gelten.

### 2.2 Geologische Grundlagen

Als Kartengrundlage wurde die geologische Karte des Kantons Solothurns verwendet (sogis, Layer «Geologie»). Zusätzlich wurde auch der Geologische Atlas 1:25'000 von swisstopo konsultiert.

Die Schichtneigung wurde der geologischen Karte des Kt. Solothurn entnommen (Attribut: midwinkel) und zusammen mit der Hangneigung verschnitten. Dadurch konnte festgestellt werden, in welchem Winkel die jeweilige Schicht- und Geländeneigung zueinanderstehen.

### 2.3 Gesetzliche Grundlagen

Wo vorhanden, wurden für die untersuchten Parameter die Richt-, Prüf- und Sanierungswerte der Verordnung über Belastungen des Bodens verwendet (SR 814.12 - VBBo, 2016). Ansonsten wurde auf die Werte von Eikmann und Kloke zurückgegriffen, wie im Handbuch zur Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft empfohlen wird (Eikmann & Kloke, 1993; Mailänder & Hämmann, 2005).

Für die Auswertung wurden folgende Werte verwendet:

- VBBo: für den Prüfwert wurden die Gehalte für Futterpflanzenanbau verwendet und für die Sanierungswerte diejenigen für Landwirtschaft und Gartenbau.
- Eikmann und Kloke: für Prüf- und Sanierungswert wurden die Gehalte für landwirtschaftliche Nutzflächen, Obst- und Gemüsebau verwendet.

In Tabelle 1 sind für die untersuchten Parameter, welche über Anforderungswerte verfügen, die jeweiligen Richt-, Prüf-, und Sanierungswerte abgebildet. Die für die Auswertung verwendeten sind fettgedruckt.

Zu beachten gilt, dass die Proben in diesem Bericht anhand der XRF-Methode (Totalgehalte) analysiert worden sind. Somit kann streng genommen kein direkter Vergleich mit den Richt-, Prüf- und Sanierungswerten der VBBo gemacht werden. Die Messwerte mit der XRF-Methode sind in der Regel höher als nach VBBo-Methodik. Zudem wurden im vorliegenden Projekt die Proben nicht nur in einer Tiefe von 0 – 20 cm, sondern auch im Ausgangsmaterial entnommen.

Für die Werte von Eikmann und Kloke gibt es ebenfalls Abweichungen, die zu berücksichtigen sind. Der Aufschluss von Schwermetallen erfolgte bei Eikmann und Kloke nach der Königswassermethode.

Tabelle 1. Anforderungswerte der untersuchten Parameter, welche über einen Anforderungswert verfügen. Die verwendeten Richt-, Prüf- und Sanierungswerte sind fettgedruckt (E. u. K. = Eikmann und Kloke)

Parameter	Quelle	Bestimmungsgrenze [mg / kg TS]	Richtwert [mg / kg TS]	Prüfwert [mg / kg TS]	Sanierungswert [mg / kg TS]
Arsen	E. u. K.	2	<b>20</b>	20 / 40 / <b>40</b> *	50 / 80 / <b>80</b> *
Barium	E. u. K.	100	<b>100</b>	100 / 200 / <b>300</b> *	500 / 1000 / <b>1500</b> *
Blei	VBBo	5	<b>50</b>	200	1000 / <b>2000</b> **
Brom	E. u. K.	2	<b>10</b>	10 / 20 / <b>30</b> *	50 / 100 / <b>150</b> *
Cadmium	VBBo	0.5	<b>0.8</b>	<b>2</b>	20 / <b>30</b> **
Chrom	VBBo	10	<b>50</b>	200	-
Chrom	E. u. K.	10	-	100 / 100 / <b>200</b> *	250 / 350 / <b>500</b> *
Gallium	E. u. K.	2	<b>10</b>	10 / 20 / <b>40</b> *	50 / 100 / <b>200</b> *
Kobalt	E. u. K.	30	<b>30</b>	30 / 100 / <b>200</b> *	150 / 400 / <b>1000</b> *
Kupfer	VBBo	5	<b>40</b>	150	<b>1000</b> ***
Molybdän	VBBo	10	<b>5</b>	-	-
Molybdän	E. u. K.	10	-	10 / 10 / <b>20</b> *	25 / 50 / <b>100</b> *
Nickel	VBBo	2	<b>50</b>	100	
Nickel	E. u. K.	2		100 / 80 / <b>100</b> *	200 / 200 / <b>200</b> *
Quecksilber	VBBo	0.1	<b>0.5</b>	-	-
Quecksilber	E. u. K.	0.1	-	- / 2 / <b>10</b> *	10 / 20 / <b>50</b> *
Selen	E. u. K.	2	<b>1</b>	5 / 5 / <b>5</b> *	20 / 10 / <b>10</b> *
Thallium	E. u. K.	2	<b>0.5</b>	0.5 / 2 / <b>2</b> *	10 / 20 / <b>10</b> *
Uran	E. u. K.	10	<b>2</b>	2 / 5 / <b>10</b> *	10 / 20 / <b>50</b> *
Vanadium	E. u. K.	5	<b>50</b>	50 / 100 / <b>100</b> *	200 / 400 / <b>400</b> *
Zink	VBBo	2	<b>150</b>	<b>300</b>	<b>2000</b> ***
Zinn	E. u. K.	2	50	50 / 100 / <b>100</b>	250 / 500 / <b>500</b> *

\* Kinderspielplätze / Haus- und Kleingärten / Landwirtschaft

\*\* Kinderspielplätze / Landwirtschaft

\*\*\* nur Landwirtschaft

### 3 Auswahl Probestandorte

Abgestützt auf die zwei Berichte von Zahner (2020) und Pfirter (2021) wurden die in Tabelle 2 ersichtlichen geologischen Schichten als relevant herauskristallisiert. Die fraglichen Schichten liegen allesamt im Jurabogen. Ihnen gemeinsam ist, dass sie im Verdacht stehen, Schwer- und Halbmetalle zu enthalten. Ein Großteil der Probenahmestandorte wurde folglich in diese Schichten gelegt.

Nebst der geologischen Schicht wurde auch die Lage des Permokarbons trogs berücksichtigt. Es wurden spezifisch Standorte an der Grenze des Trogs ausgewählt.

Zusätzlich zu den relevanten geologischen Schichten, wurden auch solche, die auf rote Erde hindeuten, untersucht. So wurden Standorte aufgrund des (Flur)Namens (*Röti / Rötiacker / Rötelacker / Rotacker / Rötelenfeld / Rotenrain*) ausgewählt. Auch diese Flurnamen sind vorwiegend im Jurabogen verbreitet, als einzige Ausnahme wurde eine Probe in der Gemeinde Steinhof (*Rötelacker*) auf Molasse mit Moräneüberdeckung entnommen.

Für die definitive Platzierung der Probestandorte wurden im Weiteren noch folgende Kriterien berücksichtigt:

- die Geländeneigung und die geologische Schichtneigung sollten nach Möglichkeit parallel liegen, da so, wie von U. Pfirter beschrieben, der Einfluss der geologischen Schicht auf die Bodenbildung und somit auch auf den Schadstoffgehalt maximal ist. Liegt die Schicht nicht parallel zur Geländeneigung (im Extremfall 90° zum Gelände), reicht nur ein kleiner Teil an die Oberfläche, wodurch der Einfluss auf den Boden vermindert ist.
- Bei der Geländeform wurde darauf geachtet, dass sie nach Möglichkeit konvex ist. Somit konnten kolluviale Überschüttungen ausgeschlossen werden und die Chance, dass das geologische Ausgangsmaterial innerhalb eines Meters erbohrbar ist, wurde deutlich erhöht.
- Es wurde darauf geachtet, dass die zu beprobenden Standorte keine bekannten anthropogenen Belastungen aufweisen. Dies wurde anhand der kantonalen SO-GIS-Layer «Kataster der belasteten Standorte» und dem «Prüfperimeter Bodenabtrag» (Verzeichnis schadstoffbelasteter Böden) überprüft. Zusätzlich wurde im Archiv des Amts für Umwelt des Kantons Solothurn nach bekannten Terrainveränderungen gesucht. An solchen Orten wurde keine Probe entnommen, um einen anthropogenen Einfluss möglichst auszuschliessen.
- Die Zugänglichkeit der Standorte sollte gegeben sein. Einerseits von der Geländeneigung und andererseits von der Erreichbarkeit her.

Insgesamt wurden **131 Standorte** ausgewählt. Davon wurden während der Probenahme 5 verworfen, weil die Bohrbarkeit aufgrund des Skelettgehalts nicht gegeben war oder die geologische Schicht nicht die geplante war. Ein zusätzlicher Standort wurde aufgrund seiner rötlichen Farbe beprobt. Insgesamt wurden somit **127 Standorte** beprobt. Drei davon wurden in der statistischen Auswertung nicht miteinbezogen, da mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht die beabsichtigte Schicht erbohrt wurde.

Tabelle 2. Relevante geologische Schichten nach den Berichten von D. Zahner (2020) und U. Pfirter (2021). Die Lage der Standorte und die Anzahl Beprobungen für jede geologische Schicht sind im Anhang A, resp. Tabelle 3 ersichtlich.

<b>Serie</b>	<b>Formation</b>	<b>Schicht</b>	<b>Bemerkung</b>	<b>Relevanter Bericht</b>
Oligozän	Untere Raurachische Molasse	Elsässer Molasse		Pfirter, Zahner
Eozän	Siderolithikum	Bohnerz		Pfirter, Zahner
Malm	Balsthal	Verena		Zahner
Malm	Birmenstorf	Birmenstorf		Zahner
Malm	Reuchenette	Kimmeridge-Kalke		Zahner
Malm	St. Ursanne	Liesberg		Zahner
Malm	St. Ursanne	Rauracien-Korallenkalke		Zahner
Malm	Villigen-Formation	Geissberg		Zahner
Dogger	Callovien	Anceps Athleta	Callovien = ehemals Ifenthal. Anceps Athleta: gehört zum Herznach Member	Pfirter
Dogger	Callovien	Callovien-Tone	Callovien = ehemals Ifenthal. Callovien-Tone: gehört zum Schellenloch Member	Pfirter
Dogger	Callovien	Varians	Callovien = ehemals Ifenthal. Varians = Schellenloch Member	Pfirter, Zahner
Dogger	Hauptrogenstein	Unterer Hauptrogenstein		Pfirter
Dogger	Hauptrogenstein	Oberer Hauptrogenstein		Pfirter
Dogger	Opalinus-Ton	Opalinus-Ton		(Pfirter)
Dogger	Passwang	Rothenfluh		Pfirter
Dogger	Passwang	Sissach		Pfirter
Dogger	Passwang	Humphriesi*	Entspricht Brüggli-Member ohne Sauzei-Schichten	Pfirter
Dogger	Passwang	Sauzei-Schichten*	Brüggli ohne Humphriesi	Pfirter
Lias	Staffelegg	Staffelegg**		Pfirter

\* = weder auf dem geologischen Atlas noch auf der geologischen Karte des Kantons Solothurns vorhanden und deshalb nicht beprobt. Hirnichopf-MB aus dem Bericht von Pfirter gehört zur Passwang Formation. Zu welcher Schicht ist aber nicht bekannt.

\*\* = nur auf dem geologischen Atlas vorhanden, nicht aber im sogis.

## 4 Hypothesen

Aufgrund des Berichts von U. Pfirter (2021) wurden zwei Hypothesen formuliert:

- **Hypothese 1:** «Es gibt geologische Schichten, welche bezüglich einzelner Parameter (Schwer- und Halbmetalle gemäss Tab. 1) stärkere Belastungen aufweisen als andere».
- **Hypothese 2:** «An der Grenze des Permokarbons weisen die Proben durch aufsteigendes Tiefenwasser höhere Belastungen auf».

Diese Hypothesen wurden in der vorliegenden Arbeit statistisch untersucht. Die Ergebnisse sind im Kapitel 6.3 dargelegt und werden in den Kapiteln 7.2 und 7.3 diskutiert.

## 5 Methode

### 5.1 Probenahme

Eine kartografische Übersicht der Standorte ist im Anhang B ersichtlich. In Tabelle 3 sind die beprobten Schichten sowie die Anzahl entnommener Proben für jede Schicht aufgelistet.

Pro Standort wurden zwei Proben entnommen:

- **Probe A:** Oberboden 0 – 20 cm
- **Probe C:** Ausgangsmaterial: Gesuchte geologische Schicht, sofern sie innerhalb eines Meters erbohrbar, ansonsten die tiefst möglich erbohrbare Schicht.

Die Probenahme erfolgte, wenn möglich, mit dem Edelmanbohrer. Da die Standorte häufig stark skeletthaltig waren, musste – zumindest für die Entnahme der C-Probe – grösstenteils mit dem Pürckhauer gearbeitet werden. Vorgesehen war die Entnahme einer Einzelbohrung. Wegen der erschwerten Bohrbarkeit (Skelett) waren jedoch an den meisten Standorten ca. 5 – 8 Bohrungen nötig, um genügend Probematerial zu erhalten. War die Bohrbarkeit nicht gegeben, jedoch ein Aufschluss in der Nähe vorhanden, wurde teilweise auf diesen zurückgegriffen (vgl. Abbildung 1).



Tabelle 3. Übersicht Anzahl entnommener Proben für jede geologische Schicht

<b>Geologische Schicht</b>	<b>Anzahl Standorte</b>	<b>Anzahl Proben*</b>
Basiskonglomerat / Muschelsandstein	1	2
Birmenstorf	3	6
Bohnerz	19	41
Callovien-Tone	8	18
Elsässer Molasse	3	7
Geissberg	2	4
Kimmeridge-Kalke	4	8
Liesberg bis Rauracien Korallenkalke	9	18
Opalinus-Ton	14	28
Rauracien-Korallenkalke	1	2
Sissach	1	2
Sissach bis Rothenfluh	25	49
Staffelegg	10	20
Unterer Hauptrogenstein	3	5
Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith	3	6
Varians	7	14
Varians bis Anceps Athleta	1	3
Varians bis Callovien-Tone	11	20
Varians bis Dalle nacrée	1	2
Verena	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>127</b>	<b>256</b>

\*Zahlen beinhalten A- und C-Proben einzeln

## 5.2 Labor

Die entnommenen Proben wurden durch das Labor Bachema AG analysiert. Insgesamt wurden 41 Parameter untersucht. Die verwendete Methode ist die XRF-Methode, ausser bei Quecksilber, dieses wurde nach der AAS-Amalgammethode analysiert. Bei Chrom wurde der Gehalt auf den Säureaufschluss nach VVEA umgerechnet (Faktor 0.5). Die analysierten Parameter sind in der Tabelle 4 (Kapitel 6.1) ersichtlich.

### 5.3 Bodenkennwerte

Neben der Probenahme erfolgte an jedem Standort auch eine Kurzaufnahme der Bodenverhältnisse. So wurden die wichtigsten Bodenhorizonte mit den zugehörigen Attributen (Körnung, Skelett, Kalkgehalt, pH, Vernässungsmerkmale) bestimmt. Zudem wurde der Bohrkern fotografisch festgehalten. Die Bodenkennwerte wurden digital im Nationalen Bodeninformationssystem NABODAT erfasst. Nebst diesem Bericht wurden die NABODAT Erfassungen und die Fotos der Bohrkern dem AfU übergeben.



Abbildung 2. Bohrkern vom Probestandort Nummer 4

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Gemessene Parameter und Anzahl Überschreitungen

In Tabelle 4 sind in der Spalte «Geprüfte Parameter» alle gemessenen Parameter ersichtlich. Für die späteren Auswertungen wurden diejenigen Parameter verwendet, die über einen Anforderungswert (VBBo oder Eikmann und Kloke) verfügten. Um den Aufwand in Grenzen halten zu können, wurden für gewisse Auswertungen nur die 7 Parameter mit den meisten Überschreitungen beigezogen. Dies sind **Arsen, Barium, Cadmium, Chrom, Gallium, Kobalt** und **Vanadium**.

Tabelle 4. Übersicht über die analysierten Parameter und die Anzahl Überschreitungen je Parameter. OB = Oberboden,-UG = Ausgangsmaterial; WA = Wald, LW = Landwirtschaftsflächen

Geprüfte Parameter	Parameter mit Anforderungswerten	Anzahl Überschreitungen (total 256 Messungen, davon 93 WA und 163 LW)
Antimon	-	-
Arsen	vorhanden	<b>150</b>
Blei	vorhanden	<b>29</b> (23 OB, 2 UG, 2 UG&OB, an 14 WA Standorten und an 13 LW Standorten)
Cadmium	vorhanden	<b>57</b> (16 nur OB, 3 nur UG, 19 OB&UG, an 21 WA Standorten und an 17 LW Standorten)
Chrom	vorhanden	<b>156</b>
Kobalt	vorhanden	<b>150</b>
Kupfer	vorhanden	<b>3</b> (immer OB, alles LW Flächen, 1x Weide, 2x Baumgarten)
Molybdän	vorhanden	<b>0</b>
Nickel	vorhanden	<b>45</b> (12 OB, 9 UG, 11 OB&UG, 16 davon WA und 16 LW) (2 Standorte mit 3 Proben)
Quecksilber	vorhanden	<b>0</b>
Thallium	vorhanden	<b>13</b> (6 nur OB, 3 nur UG, 2 beides, 5 Waldstandorte, 6 LW, Häxepfätz mit Abstand am höchsten)

Zink	vorhanden	<b>52</b> (31 nur OB, 3 nur UG, 9 OB&UG, davon 18 WA Standorte und 25 LW)
Zinn	vorhanden	<b>0</b>
Barium	vorhanden	<b>205</b>
Cäsium	-	-
Cer	-	-
Gallium	vorhanden	<b>182</b>
Germanium	-	-
Lanthan	-	-
Neodym	-	-
Niob	-	-
Rubidium	-	-
Selen	vorhanden	<b>4</b> (an 2 Standorten, beide WA und in Nunningen)
Silber	-	-
Strontium	-	-
Uran	vorhanden	<b>2</b> (an 2 versch. Standorten im UG)
Vanadium	vorhanden	<b>209</b>
Wolfram	-	-
Brom	vorhanden	<b>30</b> (28 davon im OB und bei den 2 im UG ist auch OB betroffen (11 WA, 17 LW))
Chlor	-	-
Jod	-	-
Schwefel	-	-
Aluminium	-	-
Calcium	-	-
Eisen	-	-
Kalium	-	-
Magnesium	-	-
Mangan	-	-
Phosphor	-	-
Silizium	-	-
Titan	-	-

## 6.2 Räumliche Übersicht

An dieser Stelle sollen die auffälligsten Resultate geografischen eingeordnet werden, in den nachfolgenden Kapiteln erfolgen diverse Auswertungen aufgrund geologischer Kriterien.

In Abbildung 3 ist für jeden Standort die, über alle gemessenen Parameter, höchste Überschreitung für den Oberboden und das Ausgangsmaterial eingefärbt. Die Karte zeigt, dass an 120 von 124 Standorten mindestens eine Überschreitung (Richt-, Prüf- oder Sanierungswert) vorliegt. Somit gibt es nur gerade 4 Standorte, an welchen kein einziger Parameter eine Überschreitung aufweist. An den meisten Standorten gibt es sowohl im Oberboden als auch im Ausgangsmaterial mindestens eine Überschreitung.

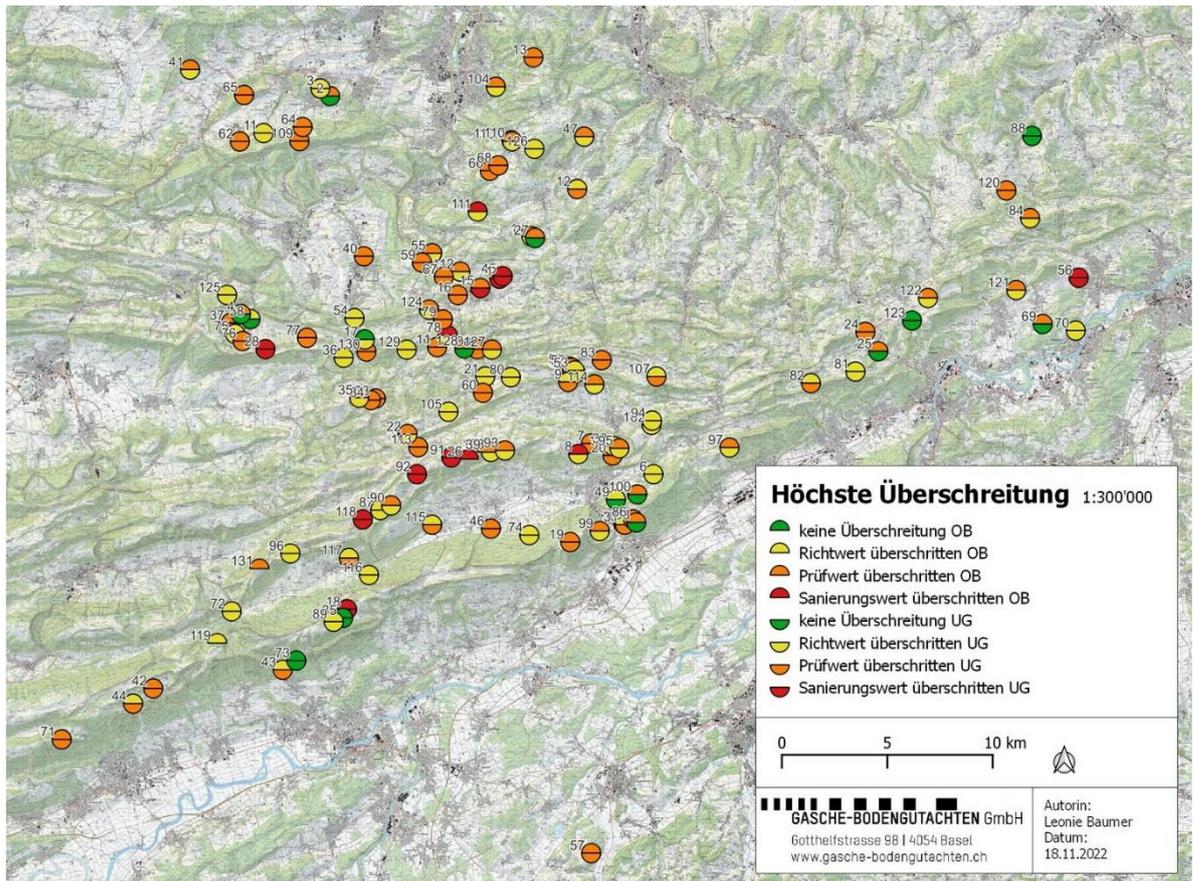


Abbildung 3. GIS-Karte mit den Probennahmestandorten sowie die Angabe der höchsten gemessenen Überschreitung je Standort. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial.

Neben der Auswertung mit allen Parametern wurde im GIS zusätzlich für jeden Parameter, der über einen Anforderungswert verfügt und mindestens eine Überschreitung aufweist, eine eigene Karte mit den Überschreitungen der angewendeten Richt-, Prüf- und Sanierungswerte erstellt. In Abbildung 4 ist die Karte für Arsen ersichtlich. Für die restlichen Parameter sind die Karten im Anhang B zu finden.

Betrachtet man die einzelnen Parameter, so liegen für Arsen die höchsten Überschreitungen vor. Von insgesamt 29 Sanierungswertüberschreitungen betreffen 21 Arsen, 6 Vanadium und 2 Thallium (Thallium beim Häxeplätz).

Geografisch zeigen sich für Arsen vor allem in der Region Nunningen - Meltingen und entlang der zweiten Jurakette oberhalb Herbetswil und Matzendorf eine Konzentration von hohen Überschreitungen. Ansonsten sind es eher solitäre Standorte, z. B. Nieder Fringeli, in Erlinsbach oder auf dem Oberbalmberg, welche hohe Werte aufweisen.

Vanadium, Barium, Gallium, Chrom und Kobalt weisen allesamt flächendeckend häufig Überschreitungen auf. Von der Menge und Höhe in der eben genannten Reihenfolge absteigend. Eine geographische Eingrenzung lässt sich nicht machen.

Für Cadmium hingegen ist eine geographische Eingrenzung möglich. Fast alle Prüfwertüberschreitungen liegen in den beiden nordwestlichen Bezirken des Kantons, insbesondere in den Gegenden rund um Hofstetten sowie Hochwald und Nunningen. Dies deckt sich mit der Untersuchung des Kantons Baselland, bei welcher im Laufental ebenfalls erhöhte Cadmiumwerte gefunden wurden (Amt für Umweltschutz und Energie, Basel-Landschaft, 2015). Weiter konzentrieren sich einige Richtwertüberschreitungen südlich und nördlich von Gänsbrunnen. Ein einzelner überschrittener Prüfwert befindet sich noch westlich des Grenchner Stierenbergs.

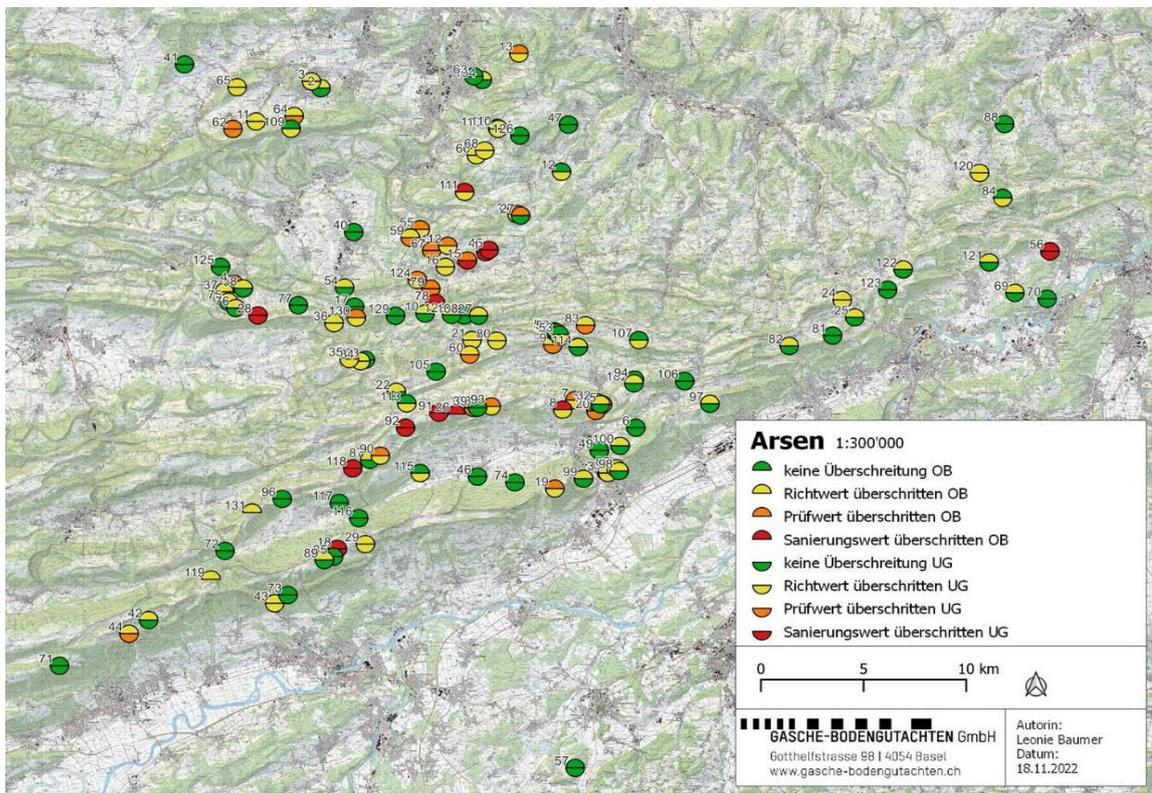


Abbildung 4. GIS-Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Arsen einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial.

### 6.3 Anteil der Überschreitungen nach geologischen Schichten

In Abbildung 5 ist die prozentuale Anzahl an Überschreitungen in jeder untersuchten Schicht dargestellt. Pro Probe wurden alle 18 Parameter, welche einen Anforderungswert besitzen, in die Auswertung miteinbezogen. Die Diagramme veranschaulichen somit die effektiv gemessenen Werte pro geologischer Schicht. Zu beachten ist indes, dass für die einzelnen Schichten eine stark unterschiedliche Anzahl an Probenahmen vorliegt (= Zahlen in Klammern).

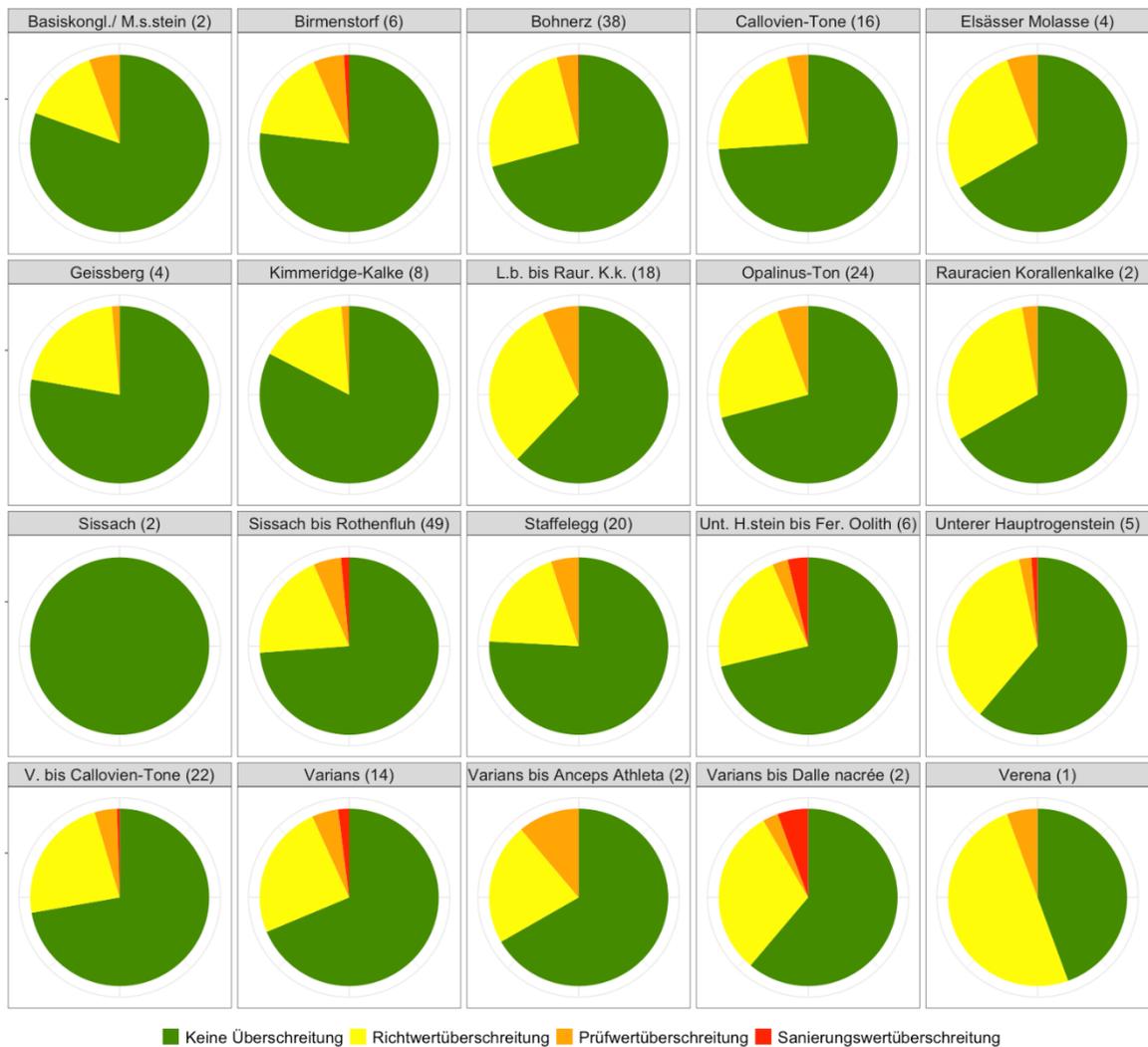


Abbildung 5. Prozentuale Anteile der Überschreitungen in den verschiedenen geologischen Schichten. Die Zahl in der Klammer in den Titeln gibt die Anzahl Proben je Schicht an.

Abkürzungen: Basiskongl. / M.s.stein = Basiskonglomerate / Muschelsandstein, L.b. bis Raur. K.k. = Liesberg bis Rauracien Korallenkalke, Unt. H.stein bis Fer. Oolith = Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith, V. bis Callovien-Tone = Varians bis Callovien-Tone.

Da bewusst nur Schichten beprobt wurden, bei welchen ein Verdacht auf erhöhten Halb- oder Schwermetallgehalte besteht, ist es nachvollziehbar, dass nur gerade eine Schicht (*Sissach*) heraussticht, bei welcher keine Überschreitungen festgestellt wurden. Nur geringe Überschreitungen wurden ausserdem in den *Kimmeridge-Kalken* sowie in der *Geissberg-Schicht* festgestellt.

Hingegen wurden in folgenden Schichten besonders starke (Prüf- und Sanierungswerte) und häufige Überschreitungen festgestellt: ***Birmenstorf***, ***Elsässer Molasse***, ***Liesberg bis Rauracien-Korallenkalke***, ***Opalinus-ton***, ***Rauracien Korallenkalke***, ***Sissach bis Rothenfluh***, ***Unterer Hauenstein bis Fe-Oolith***, ***Unt. Hauptrogenstein***, in sämtlichen untersuchten ***Varians-Schichten*** sowie in der ***Verena-Schicht***.

## 6.4 Statistische Analysen

Zur Beantwortung von gewissen Fragestellungen wurden statistische Auswertungen vorgenommen. Die verwendeten Tests sind in den jeweiligen Kapiteln angegeben.

### 6.4.1 Hypothese 1

Die Hypothese 1 «Es gibt geologische Schichten, welche bezüglich einzelner Parameter stärkere Belastungen aufweisen als andere» wurde statistisch mit dem Kruskal-Wallis Test und mit anschliessendem Dunn's Test überprüft. Dies, weil die Daten nicht normalverteilt sind (Shapiro Test).

Für die untersuchten Parameter zeigten sich für Arsen, Barium, Cadmium und Gallium einige geologische Schichten, die sich von anderen durch signifikant höhere, respektive tiefere Werte unterscheiden. Nachfolgend ist der Arsengehalt in den verschiedenen geol. Schichten dargestellt, sowie zusätzlich die p-Werte für diejenige Schichten, die sich von anderen signifikant unterscheiden. Dieselben Darstellungen sind für weitere untersuchten Parameter im Anhang C zu finden. Die Erklärungen und Schlussfolgerungen folgen im Kapitel 7.2.

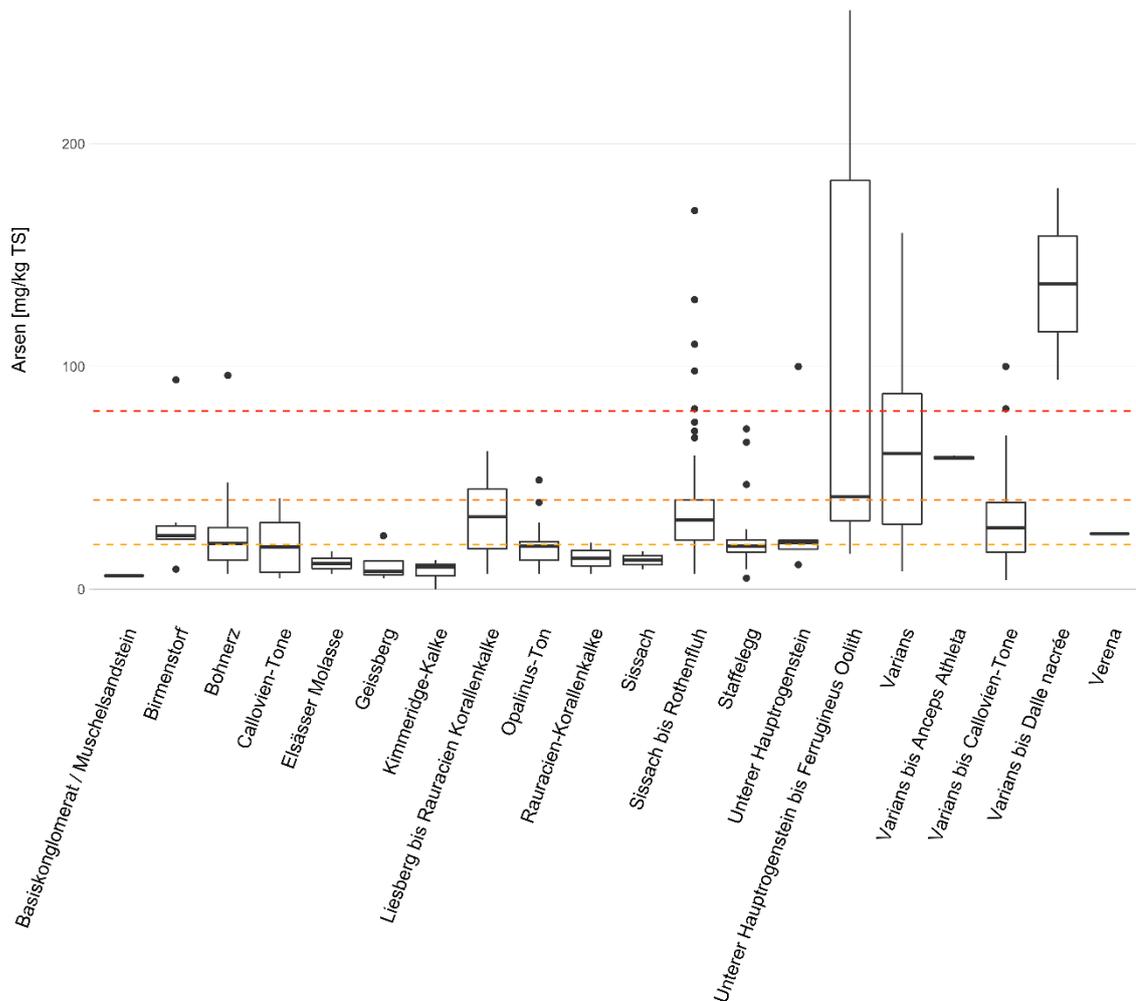


Abbildung 6. Arsengehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (20), orange Linie = Prüfwert (40), rote Linie = Sanierungswert (80)

Tabelle 5. Signifikante p-Werte (p-Wert < 0.05) aus der statistischen Analyse zur Hypothese, dass sich die geologischen Schichten im Arsengehalt unterscheiden (Hypothese 1).

Arsen	Kimmeridge Kalke	Sissach bis Rot- henfluh	Unterer Haupt- rogenstein bis Ferrugineus Oo- lith	Varians	Varians bis Anceps Ath- leta	Varians bis Dalle nacrée
Birmenstorf	0.042					
Bohnerz	0.030	0.042		0.023		
Liesberg bis Rauracien Korall- kalke	0.009					
Basiskonglome- rat / Muschelsan- dstein		0.040	0.026	0.023	0.034	0.022
Callovien-Tone		0.037	0.042	0.019		0.042
Elsässer Molasse		0.035	0.025	0.021	0.044	0.023
Geissberg		0.025	0.027	0.022	0.044	0.023
Kimmeridge- Kalke		6.0*10 <sup>-4</sup>	0.003	3.4*10 <sup>-4</sup>	0.020	0.007
Opalinus-Ton		0.023	0.043	0.013		0.043
Staffelegg	0.043			0.034		
Varians bis Callo- vien-Tone	0.008					

#### 6.4.2 Hypothese 2

Auch die Hypothese 2 («an der Grenze des Permokarbondrogs weisen die Proben, durch aufsteigendes Tiefenwasser höhere Belastungen auf») wurde statistisch untersucht. Dazu wurde ebenfalls der Kruskal-Wallis Test mit anschliessendem Dunn's Test angewendet. Ein Standort wurde als «nah an der Permokarbondrogengrenze» kategorisiert, wenn er sich nicht weiter als 600 m von der Grenze befindet. Andernfalls wurde er als «nicht an der Permokarbondrogengrenze» spezifiziert. Die Lage des Trogs beruht auf der NAGRA Karte (Leu, 2008). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6 und der Abbildung 8 und 8 dargestellt. Erklärungen und Schlussfolgerungen folgen im Kapitel 7.3.

Tabelle 6. Resultate des Kruskal-Wallis Test mit der Fragestellung, ob es einen signifikanten Unterschied vom Parametergehalt gibt, je nachdem ob der Standort an der Permokarbondroggenze liegt oder nicht. Liegt der p-Wert < 0.05, so ist der Unterschied signifikant.

<b>Parameter</b>	<b>Signifikanter Unterschied?</b>	<b>p-Wert</b>
Arsen	Nein	0.245
Barium	Nein	0.373
Cadmium	Nein	0.649
Chrom	Nein	0.836
Gallium	Ja	0.012
Kobalt	Nein	0.385
Vanadium	Nein	0.616

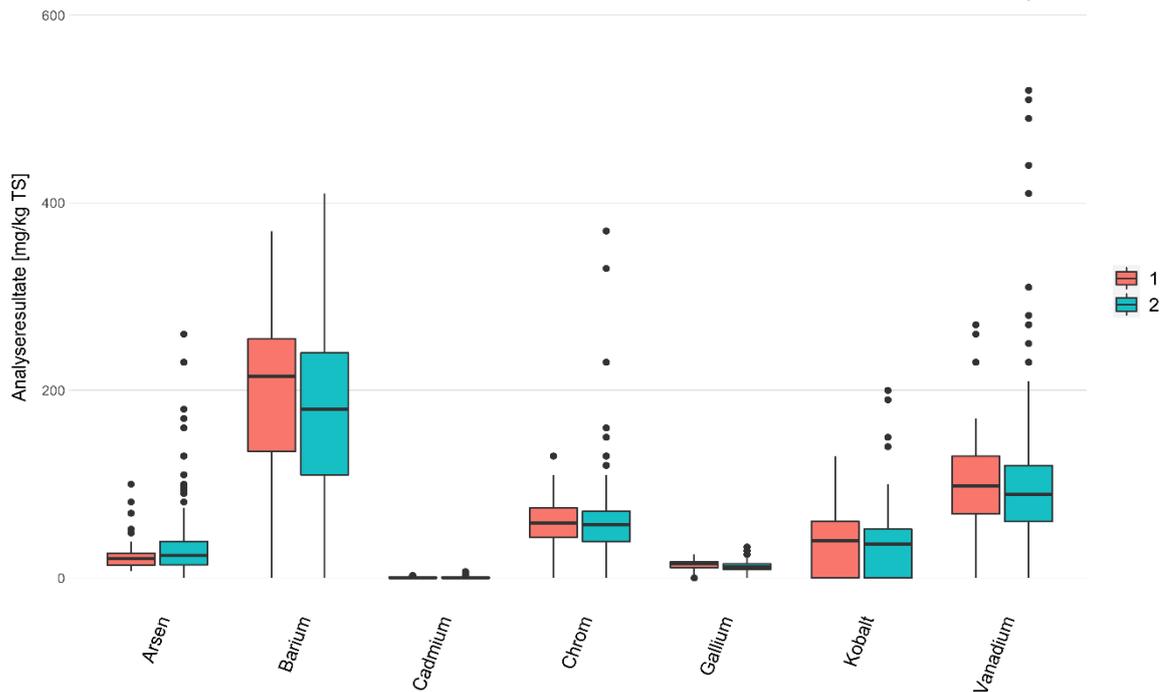


Abbildung 8. Übersicht der Parametergehalte aufgeteilt nach der Nähe zum Permokarbontrög. 1 = nah an der Permokarbontrögengrenze, 2 = nicht nah an der Permokarbontrögengrenze (> 600 m)

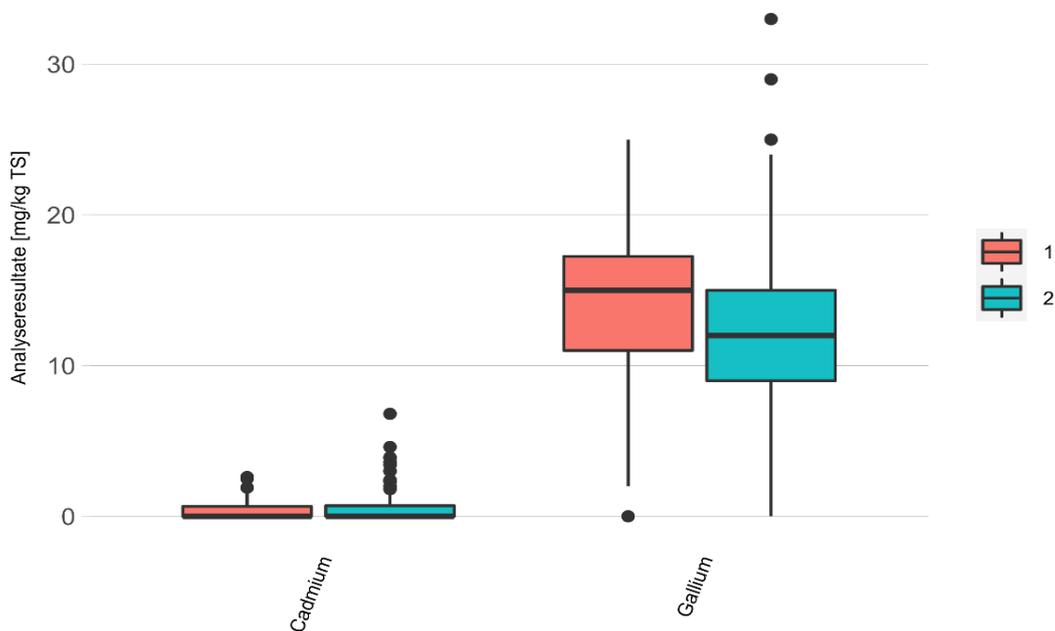


Abbildung 7. Ausschnitt aus Abbildung 8 (Parametergehalte aufgeteilt nach der Nähe zum Permokarbontrög) zur besseren Veranschaulichung von Cadmium und Gallium. 1 = nah an der Permokarbontrögengrenze, 2 = nicht nah an der Permokarbontrögengrenze (> 600 m)

Die Resultate zeigen, dass in der Nähe der Permokarbontrögengrenze keine signifikant höheren Parameterwerte gemessen wurden als ausserhalb dieser Zone. Einzig für Gallium sind die Analysewerte der Standorte nah an der Grenze signifikant leicht höher.

### 6.4.3 Korrelation der Parameter

Um zu untersuchen, ob eine Korrelation zwischen den Parametern vorliegt, wurde mit sieben ausgewählten Stoffen die Pearson Korrelation durchgeführt. Bei einer Korrelation von 1 liegt eine perfekte Korrelation vor, bei 0 gibt es keine Korrelation und bei -1 eine perfekt negative. Ab einem Wert von 0.4 – 0.7 liegt eine schwache Korrelation vor und ab einem Wert  $\geq 0.7$  eine starke Korrelation. In der Abbildung 9 sind die Korrelationen der relevanten Parameter und Calcium dargestellt. Calcium wurde zusätzlich gewählt, da im Kapitel 7.1.2 auf den Zusammenhang zwischen Kalkgehalt im Boden und Parametergehalt eingegangen wird. Im Anhang D ist dieselbe Abbildung mit allen gemessenen Parametern ersichtlich. In der Tabelle 7 sind die dazugehörigen Korrelationswerte aufgelistet.

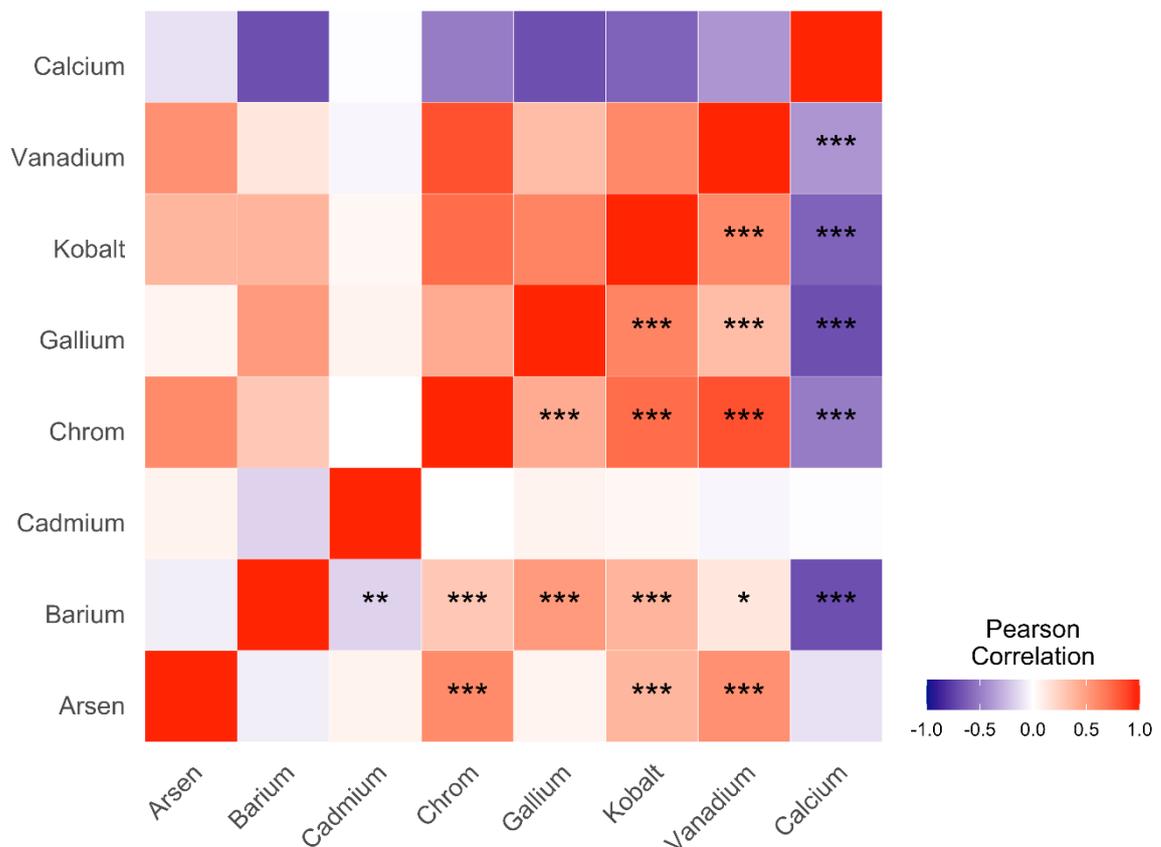


Abbildung 9. Pearson Korrelation der sieben gewählten Parameter. 0 = keine Korrelation,  $|0.4| - |0.7|$  = schwach Korrelation,  $\geq |0.7|$  = starke Korrelation. \*signifikant ( $p \leq 0.05$ ), \*\* sehr signifikant ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* hoch signifikant ( $p \leq 0.001$ )

Tabelle 7. Korrelationskoeffizienten der Pearson Korrelation der ausgewiesenen Parameter. 0 = keine Korrelation,  $|0.4| - |0.7|$  = schwach Korrelation,  $\geq |0.7|$  = starke Korrelation.

	As	Ba	Cd	Cr	Ga	Co	V	Ca
As	1	-0.067	0.068	0.587	0.058	0.389	0.568	-0.110
Ba	-0.067	1	-0.166	0.286	0.519	0.389	0.132	-0.689
Cd	0.068	-0.166	1	0.001	0.067	0.046	-0.035	-0.008
Cr	0.587	0.286	0.001	1	0.436	<b>0.729</b>	<b>0.839</b>	-0.505
Ga	0.058	0.519	0.067	0.436	1	0.627	0.348	-0.691
Co	0.380	0.389	0.046	<b>0.729</b>	0.627	1	0.601	-0.609
V	0.568	0.133	-0.035	<b>0.839</b>	0.348	0.601	1	-0.402
Ca	-0.110	-0.689	-0.008	-0.505	-0.692	-0.609	-0.402	1

Die Pearson Korrelation zeigt, dass zwischen Chrom und Kobalt, respektive Vanadium eine starke, positive Korrelation vorliegt. Cadmium korreliert mit keinem anderen Parameter. Weiter ist ersichtlich, dass Calcium mit den Parametern Barium, Chrom, Gallium, Kobalt und Vanadium eine schwach negative Korrelation aufweist.

## 7 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 6 aufgeführten Resultate diskutiert. Im ersten Abschnitt wird vorgängig ein Vergleich zwischen den Resultaten der vorliegenden Untersuchung mit derjenigen von Pfirter (2021) gezogen. Im letzten Abschnitt wird noch die Unterscheidung zwischen anthropogener und geogener Belastung diskutiert.

### 7.1 Vergleich mit den Resultaten aus dem Bericht Pfirter

Um die gemessenen Werte der einzelnen Schichten mit denjenigen aus der Untersuchung von Pfirter zu vergleichen, wurde sowohl für die Proben von Pfirter als auch für die C-Proben von Gasche pro geol. Schicht der Mittelwert für jeden Parameter berechnet. Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte ist in Abbildung 10 ersichtlich. Es gilt zu beachten, dass die Werte teilweise nur aus einer einzigen Probe stammen.

Vergleicht man die geologischen Schichten, so zeigen die beiden Untersuchungen relativ zueinander ähnlich Parameterwerte. Es lässt sich sagen, dass in den meisten Schichten, welche in der Untersuchung von Pfirter durch hohe Schadstoffwerte aufgefallen sind, ebenfalls in den C-Proben der vorliegenden Untersuchung erhöhte Schadstoffwerte gefunden wurden. Besonders auffällig ist die Parallelität in der **Elsässer Molasse**, dem **Opalinuston** und in der Schicht **Sissach bis Rothenfluh**. Wenig oder gar keine Übereinstimmung ist hingegen bei den beiden Schichten **Varians** und **Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith** festzustellen.

Dass die Ergebnisse der C-Proben von Gasche mit denjenigen von Pfirter gut übereinstimmen, lässt den Schluss zu, dass die Analysewerte, welche die Untersuchung Pfirter aufgrund von Probenahmen an 29 geol. Aufschlüssen ergab, durchaus auf die Fläche übertragbar sind. Es wurde aufgezeigt, dass die gemessenen Schadstoffkonzentrationen im bodennahen Ausgangsmaterial (C-Proben Gasche) gut mit den zugrundeliegenden geologischen Schichten korrespondieren. Somit wurde auch bestätigt, dass gewisse geol. Schichten mit bestimmten Schadstoffkonzentrationen in Verbindung stehen (vgl. Hypothese 1 in Kap. 6.4.1 und 7.2). Und dies unabhängig von der geografischen Lage.

Die beiden Probenahmen sind im Übrigen gut miteinander vergleichbar, da die Analytik in demselben Labor mit den gleichen Analyseverfahren durchgeführt wurde. Dass die Werte bei Pflirter in der Regel höher sind als bei Gasche, ist gut nachvollziehbar, da die C-Proben von Gasche teilweise bereits leicht verwittertes und mitunter vermischtes Material enthielten. Umso erstaunlicher ist die Tatsache, dass bei den *Kimmeridge-Kalken* und vor allem bei der *Varians bis Anceps-Athleta*-Schicht genau das gegenteilige Ergebnis resultierte. Hier sind die Werte der C-Proben fast durchwegs deutlich höher als in den gemessenen geologischen Schichten. Da letztgenannte Schicht nur zweimal beprobt wurde, kann dies zumindest für diese Schicht auch zufällig sein.

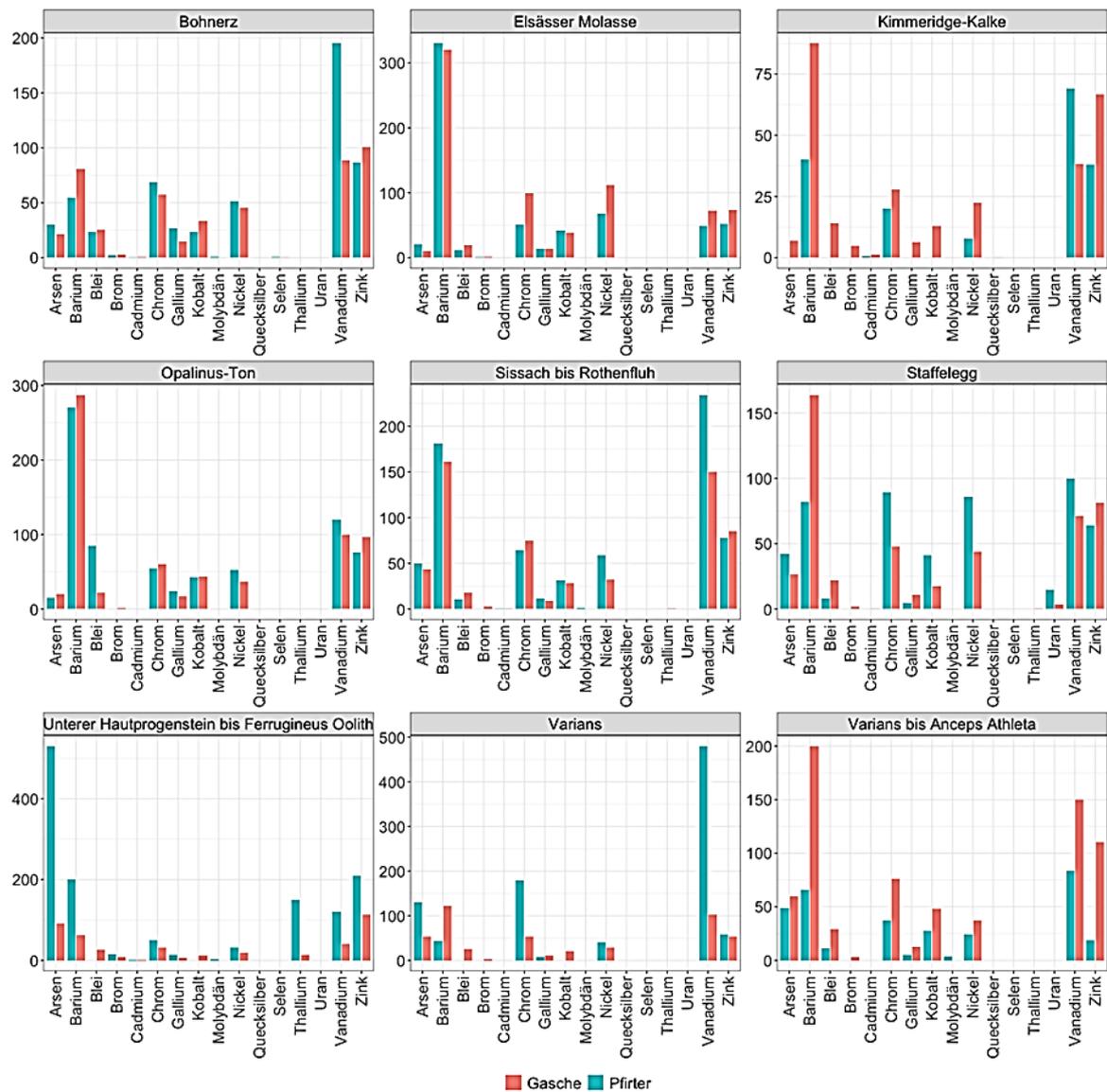


Abbildung 10. Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Proben aus den Untersuchungen von Pflirter und Gasche aufgeführt nach den verschiedenen geologischen Schichten.

## 7.2 Hypothese 1

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nicht eine bestimmte geologische Schicht ausgemacht werden kann, welche für **alle** Parameter signifikant höhere Werte zeigt. Es können jedoch durchaus Schichten genannt werden, welche bezogen auf einen bestimmten Parameter höhere oder tiefere Werte aufweisen als andere. So gibt es für die Parameter Arsen, Barium, Cadmium, Gallium, Nickel, Kupfer und Thallium geologische Schichten, die sich im Parametergehalt von anderen unterscheiden. Hingegen nicht oder kaum für die ebenfalls untersuchten Stoffe Chrom, Kobalt, Vanadium, Brom, Zink und Blei. An dieser Stelle sollen die Resultate (vgl. Anhang C) verdeutlicht werden:

Für **Arsen** kann gesagt werden, dass die Schichten **Liesberg bis Rauracien Korallenkalke** (18), **Sissach bis Rothenfluh** (49), **Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith** (6), **Varians** (14), **Varians bis Anceps Athleta** (2) und **Varians bis Dalle nacrée** (2) tendenziell höhere Werte aufweisen als die restlichen Schichten. Tendenzuell tiefere Werte weisen die Schichten **Basiskonglomerat / Muschelsandstein** (2), **Callovien-Tone** (22), **Elsässer Molasse** (4), **Geissberg** (4), **Kimmeridge-Kalke** (8) und **Opalinus-Ton** (24) auf. Die Zahlen in der Klammer benennen die Anzahl Proben, welche für die Schicht genommen wurde.

Betrachtet man die **Barium**gehalte für jede Schicht, so zeigt sich, dass die *Mediane der meisten Schichten* über dem Richtwert liegen. Signifikant höher als die meisten Schichten sind die Mediane der **Elsässer Molasse** (4) und des **Opalinus-Tones** (24). Im Vergleich zu anderen Schichten liegt auch der Median der Schicht **Basiskonglomerat / Muschelsandstein** (2) signifikant höher.

Im Vergleich zu den anderen Parametern gibt es für **Cadmium** einige Schichten, die nie bis vereinzelt Überschreitungen aufweisen. Signifikant tiefer als andere Schichten sind die **Callovien-Tone** (16), der **Opalinus-Ton** (24), **Staffelegg** (20), **Sissach bis Rothenfluh** (49, 2 Überschreitungen), **Varians** (14) und **Varians bis Callovien-Tone** (22, 2 Überschreitungen). Ebenfalls nie überschritten haben die Schichten **Basiskonglomerate / Muschelsandstein** (2), **Elsässer Molasse** (4), **Rauracien Korallenkalke** (2), **Sissach** (2) und **Varians bis Anceps Athleta** (2). Diese gelten aber nicht als signifikant tiefer, da es zu wenige Proben je Schicht gibt. Signifikant höher im Vergleich zu anderen sind hingegen die Messwerte in den Schichten **Kimmeridge-Kalke** (8), **Liesberg bis Rauracien Korallenkalke** (18), **Unterer Hauptrogenstein** (5), **Bohnerz** (38) sowie **Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith** (6).

Für **Chrom** liegen die meisten Medianwerte über dem Richtwert. Dabei hebt sich keine Schicht signifikant ab.

Bei **Gallium** liegen ebenfalls die meisten Medianwerte über dem Richtwert. Einzig für **Kimmeridge-Kalke** (8), **Sissach** (2) und **Unterer Hauptrogenstein und Ferrugineus Oolith** (6) liegen die Mediane darunter. Signifikant höher als in einigen andere Schichten liegen die Mediane der Schichten **Bohnerz** (38) und **Opalinus-Ton** (24).

Für **Kobalt** gibt es keine geologische Schicht, welche signifikant höhere oder tiefere Werte aufweist. Im Allgemeinen gibt es eine grosse Streuung der Werte. 13 von 20 Medianen liegen über dem Richtwert.

Für **Vanadium** zeigten die statistischen Tests ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Tendenzuell höhere Mediane weisen die Schichten **Birmenstorf** (6), **Bohnerz** (38), **Callovien-Tone** (16), **Elsässer Molasse** (4), **Opalinus-Ton** (24), **Sissach bis Rothenfluh** (49), **Varians** (14), **Varians bis Anceps Athleta** (2), **Varians bis Callovien-Tone** (22) und **Verena** (1) auf. Tendenzuell tiefere Werte haben **Kimmeridge-Kalke** (8), **Sissach** (2) und **Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith** (6).

**Nickel** und **Kupfer** (ohne Abbildung) zeigen ein vergleichbares Bild. Bei beiden weisen die Schichten **Elsässer Molasse**, **Opalinus-Ton** und **Varians bis Dalle nacrée** leicht erhöhte Werte auf.

Bei **Thallium** (ohne Abb.) zeigt sich ein grosser Ausschlag nach oben in der Schicht **Unt. Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith**. Ursache sind die hohen Werte am Standort beim Häxeplätz.

### 7.3 Hypothese 2

Die Hypothese 2 geht davon aus, dass an den Rändern des Permokarbondtroges in Urzeiten stark belastete Tiefenwässer an die Oberfläche aufgestiegen sind und es dort zu einer Krustenbildung gekommen ist. Die Überprüfung der Hypothese, ob ein Standort höhere Parameterwerte aufweist, wenn er sich näher am Permokarbondrog befindet, ist jedoch nicht einfach zu machen. Der Gründe dafür sind vielseitig. Einerseits ist die Grenze des Trogs nicht genau genug erforscht. Andererseits gibt es Versätze, welche in Nord-Süd Richtung verlaufen, an welchen ebenfalls Tiefenwässer aufsteigen konnten. Weiter sind die Tiefenwässer beim Aufsteigen ins Meer geflossen, wo sie der dort herrschenden Strömung unterlagen. Da diese weder in der Richtung noch in der Stärke konstant war, ist die Ausbreitung unbekannt. Als letztes hat auch die Bildung des Tafeljuras Einfluss auf die Standorte, da dieser u.a. am Permokarbondrog entstand.

Mit der verwendeten Methode zur statistischen Auswertung wurde das Problem eventuell zu stark vereinfacht, indem die Abgrenzung rein mit der Distanz zur Permokarbondroggrenze vorgenommen wurde. Somit kann die Hypothese weder verworfen noch bestätigt werden.

Zumindest für Arsen und Cadmium, welche ein räumliches Muster in den erhöhten Werten aufzeigen, könnte die Hypothese als mögliche Erklärung für alle oder einige Standorte dienen.

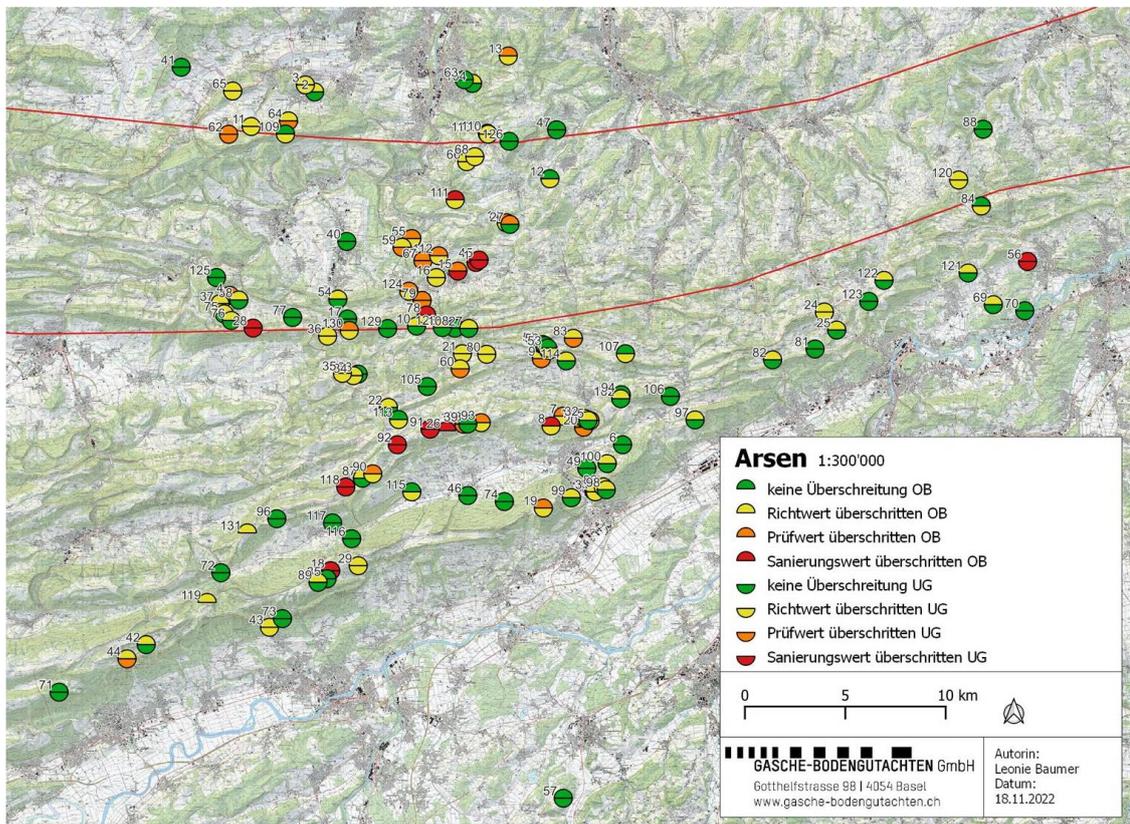


Abbildung 11. Analysewerte für Arsen mit farbig dargestellten Richt-, Prüf- oder Sanierungswertüberschreitungen. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial. **Rote Linie = Grenze des Permokarbondtrogs**

### 7.4 Unterscheidung anthropogene versus geogene Bodenbelastung

Obwohl im Vorfeld der Probenahmen die Standorte auf eine anthropogen bedingte Belastung überprüft wurden, kam aufgrund der Ergebnisse dennoch teilweise der Verdacht auf, dass zumindest gewisse Belastungen anthropogen verursacht wurden. Insbesondere der Umstand, dass die A-Proben (Oberboden) meist eine signifikant höhere Belastung aufwiesen als die C-Proben (Ausgangsmaterial), nährten diesen Verdacht. Die Mediane der Parametergehalte in Oberboden und Ausgangsmaterial sind in der Abbildung

12 dargestellt. Die p-Werte der statistischen Auswertung (Kruskal-Wallis Test) sind im Anhang E ersichtlich.

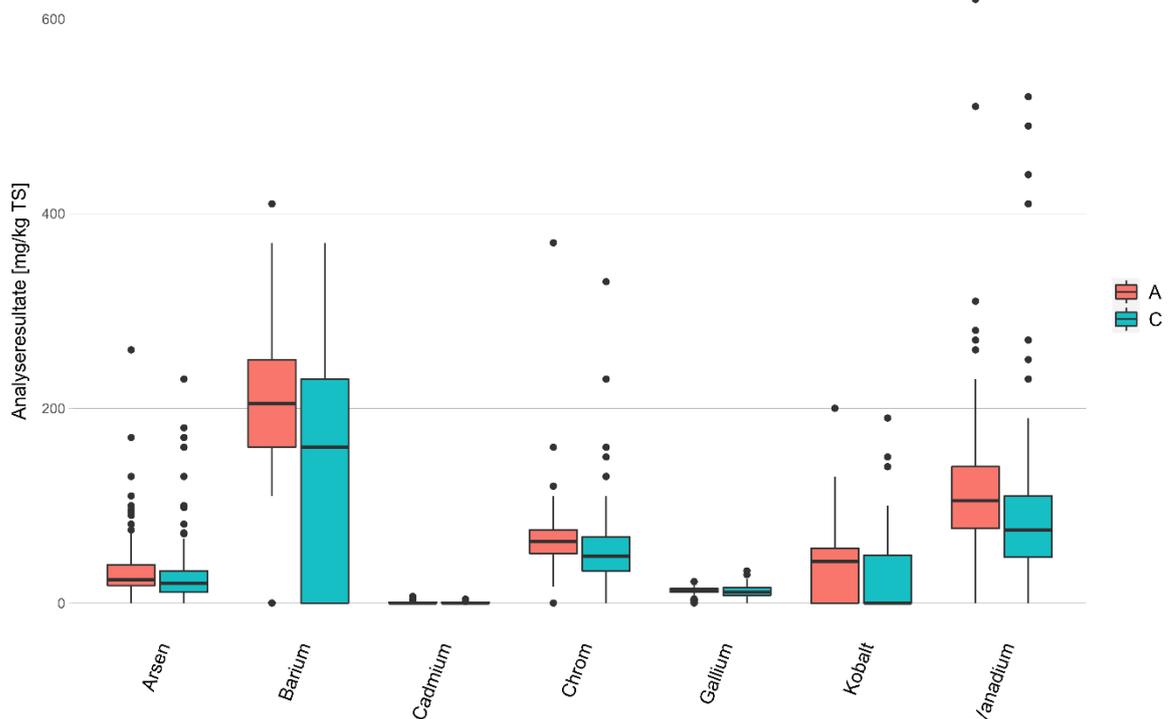


Abbildung 12. Übersicht der Parametergehalte aufgeteilt nach Oberboden (A) und Ausgangsmaterial (C)

### 7.4.1 Mögliche Ursachen für anthropogene Belastung

Durch Gespräche mit Bewirtschafter\*innen zeigte sich, dass an den meisten landwirtschaftlichen Standorten in früheren Zeiten Schlacke ausgebracht wurde. Daniel Schaub von der Unteren Tannmatt wusste beispielsweise zu berichten, dass früher auf Sömmerungsweiden im gesamten Jurabogen Thomasmehl ausgebracht wurde (P-K Dünger). Laut Schaub war dies bis in die 90er Jahre gängige Praxis. Thomasmehl beinhaltet neben Phosphor und Kalium auch einen gewissen Anteil an Chrom, Mangan und Magnesium (Dittrich & Klose, 2008). Leider konnte nichts über weitere Inhaltsstoffe in Erfahrung gebracht werden, ebenso wenig darüber ob die Mengenanteile immer dieselben waren oder mit der Zeit variierten. Gesichert scheint, dass der Chromgehalt im Thomasmehl sehr hoch ist (Dittrich & Klose, 2008).

Die Pearson Korrelation zwischen den verschiedenen Parametern (Anhang D) zeigt, dass Chrom stark mit Eisen korreliert (Korrelationskoeffizient = 0.9). Falls bei der Verhüttung noch Rückstände des Eisens in der Schlacke zu finden sind, so könnte dies ein Indiz dafür sein, dass die erhöhten Chrom Werte auf das Ausbringen von Thomasmehl zurückzuführen sind und somit anthropogen wären. Gegen die These spricht, dass Chrom somit auch mit Mangan und Magnesium korrelieren sollte. Die Korrelation mit Mangan ist schwach (0.4) und mit Magnesium gibt es keine. Magnesium wird aber von den Pflanzen auch stärker aufgenommen, wodurch dessen Gehalt schneller sinkt. Ebenfalls gegen die These spricht die Tatsache, dass sich viele Standorte mit erhöhten Chromwerten im Wald und nicht auf Sömmerungsweiden befinden.

Neben dem Ausbringen von Thomasmehl ist es denkbar, dass schlackehaltige Materialien auch auf andere Weise auf die Felder gelangten. So kam aufgrund von Indizien in einem Bodenkartierprojekt in Blauen BL der Verdacht auf, dass in früherer Zeit Industrie-Schlacke aus der Eisen-Verhüttung, welche dezentral an

vielen Orten im Jurabogen stattfand, auf den Feldern der Angestellten ausgebracht wurde (Schmidhauser A. und Gasche T., 2011).

### 7.4.2 Mögliche Ursachen für geogene Belastung

Eine höhere Belastung des Oberbodens muss nicht zwingend bedeuten, dass die Belastung anthropogenen Ursprungs ist. So gibt es auch natürliche Ursachen, mit denen sich eine solche Belastungssituation, wie sie bei den untersuchten Standorten sehr häufig eintraf, erklärt werden kann. Gründe dafür können folgende sein:

- Die Pedogenese vor Ort entspricht nicht dem gängigen Muster, das heisst, der heutige Oberboden wurde nicht aus dem vermuteten Ausgangsmaterial gebildet.
- Der Oberboden enthält mehr Ton oder Humus und kann dadurch Metalle besser binden.
- Der Kalkgehalt im Oberboden wäscht im Laufe der Zeit aus. Die Schwer- und Halbmetalle, welche tendenziell an Ton und organischem Material haften, liegen somit nach erfolgter Kalkauswaschung in einer höheren Konzentration vor.

Ob in den untersuchten Standorten eine Korrelation zwischen dem **Kalkgehalt** und dem Parametergehalt vorliegt, wurde für diese Arbeit statistisch ausgewertet. Da die Daten nicht normalverteilt sind, wurde der Kruskal-Wallis Test verwendet. Die Resultate für die in die Untersuchung einbezogenen sieben Parameter sind in Abbildung 13 und Tabelle 8 abgebildet.

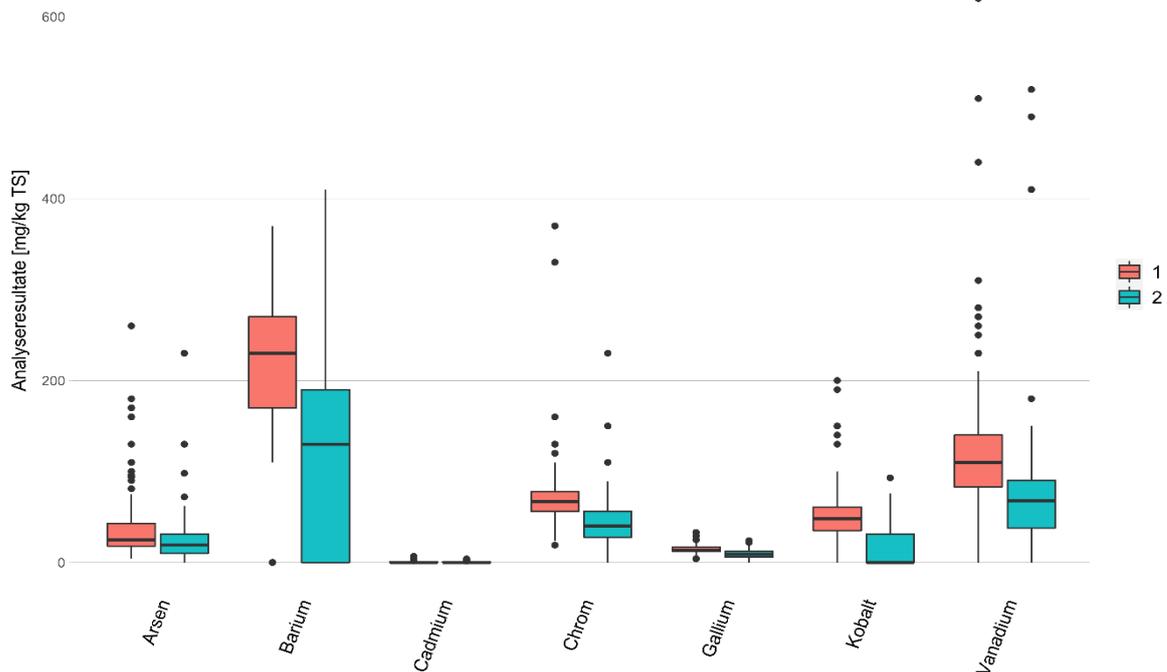


Abbildung 13. Übersicht der Parametergehalte aufgeteilt nach Schichten ohne Kalk (1) und mit Kalk (2)

Tabelle 8. Resultate des Kruskal-Wallis Test mit der Fragestellung, ob es einen signifikanten Unterschied vom Parametergehalt gibt, je nachdem ob Kalk in der Bodenschicht vorhanden ist oder nicht. Liegt der p-Wert < 0.05, so ist der Unterschied signifikant.

Parameter	Signifikanter Unterschied?	p-Wert
Arsen	Ja	5.07*10 <sup>-5</sup>
Barium	Ja	8.37*10 <sup>-14</sup>

Cadmium	Nein	0.78
Chrom	Ja	$3.03 \cdot 10^{-16}$
Gallium	Ja	$4.45 \cdot 10^{-13}$
Kobalt	Ja	$< 2.2 \cdot 10^{-16}$
Vanadium	Ja	$4.67 \cdot 10^{-12}$

Wie der Test zeigt, sind die Medianwerte für Arsen, Barium, Chrom, Gallium und Kobalt signifikant höher, wenn der Boden kalkfrei ist. Für Cadmium hingegen zeigt sich kein signifikanter Unterschied. Das Testresultat unterstützt demnach die Theorie der Entstehung einer geogenen Belastung für alle relevanten Parameter mit Ausnahme von Cadmium. Ob der Zusammenhang kausal ist, kann jedoch nicht beantwortet werden.

Weiter wurde untersucht, wie sich die Parametergehalte in gänzlich kalkfreien Böden verhalten. Denn sind die Gehalte dann ähnlich oder im Ausgangsmaterial sogar höher, so würde dies die Theorie der geogenen Entstehung unterstützen. Wie in Abbildung 14 ersichtlich, sind die Gehalte in Oberboden und Ausgangsmaterial sehr ähnlich und sogar tendenziell im Ausgangsmaterial etwas höher. Einen signifikanten Unterschied im Gehalt gibt es bei keinem der Parameter.

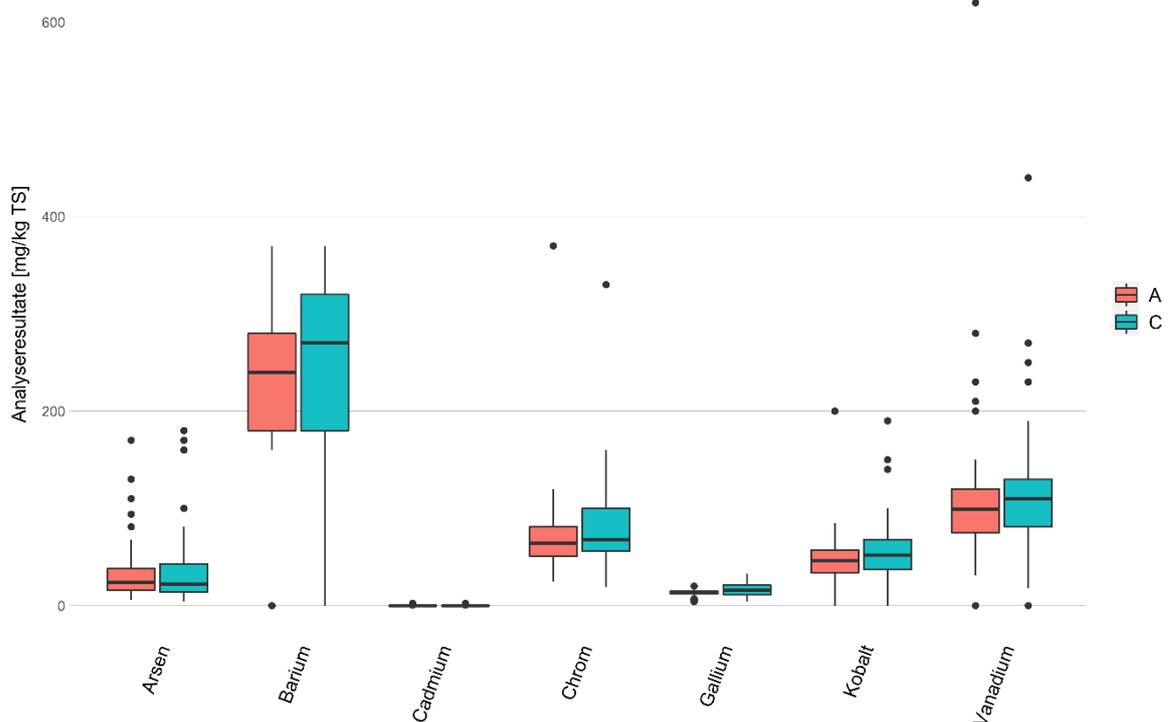


Abbildung 14. Übersicht der Parametergehalt von kalkfreien Böden aufgeteilt nach der Probenahme im Oberboden (A) und Untergrund (C)

### 7.4.3 Waldflächen vs. Landwirtschaftsflächen

Ein weiterer Ansatz zur Unterscheidung von geogener versus anthropogener Belastung ist, die Parameterwerte bezüglich Wald und Landwirtschaft zu vergleichen. Mit der Idee, dass Waldflächen tendenziell weniger anthropogen belastet sind. Hierfür wurde ebenfalls der Kruskal-Wallis Test verwendet. Die Ergebnisse zeigen Tabelle 9 und Abbildung 15.

Tabelle 9. Resultate des Kruskal-Wallis Test mit der Fragestellung, ob es einen signifikanten Unterschied vom Parametergehalt gibt, je nachdem ob der Standort im Wald oder auf einer landwirtschaftlichen Fläche liegt. Ab einem p-Wert < 0.05 ist der Unterschied signifikant

Parameter	Signifikanter Unterschied?	p-Wert
Arsen	Nein	0.414
Barium	Ja	$9.022 \cdot 10^{-8}$
Cadmium	Ja	$3.334 \cdot 10^{-4}$
Chrom	Ja	0.033
Gallium	Ja	0.014
Kobalt	Ja	$6.39 \cdot 10^{-4}$
Vanadium	Ja	0.005

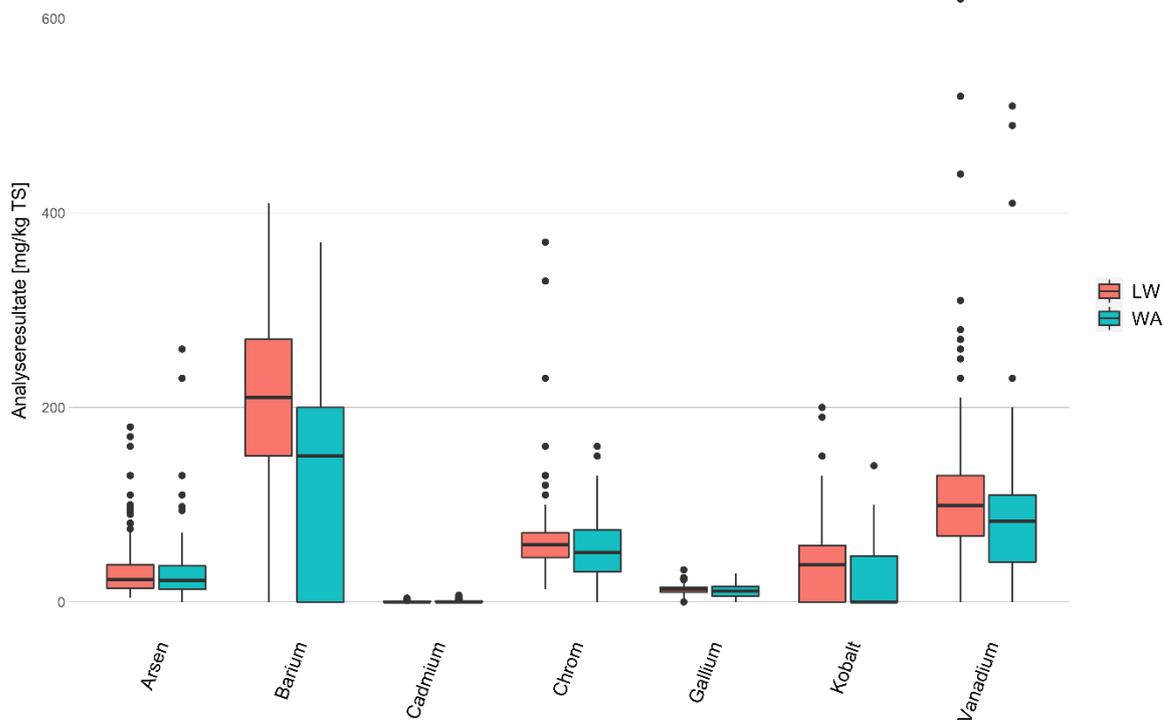


Abbildung 15. Übersicht der Parametergehalte aufgeteilt nach beprobten Schichten auf Landwirtschaftsflächen (LW) und im Wald (WA)

Es zeigt sich, dass Landwirtschaftsflächen für alle getesteten Parameter, mit Ausnahme von Arsen, einen signifikant höheren Medianwert aufweisen als Waldflächen. Dies würde – im Gegensatz zur obigen Auswertung nach Kalkgehalt - daraufhin deuten, dass bei den beprobten Landwirtschaftsflächen auch mit anthropogenen Einflüssen gerechnet werden muss und nicht nur von geogenen Belastungen gesprochen werden kann – mit Ausnahme von Arsen.

#### 7.4.4 Cadmiumgehalte

Der Kanton Baselland hat im Laufental an Orten mit bekannten erhöhten Cadmiumwerten Gesteinsproben entnommen (AUE-BL, 2015). Dabei zeigten sich auch im Festgestein erhöhte Cadmiumwerte, was als Be-

weis für einen geogenen Ursprung betrachtet wurde. Urs Pfirter hingegen vertritt gemäss mündlicher Aussage vom 29.11.2022 die Theorie, dass die Cadmiumbelastungen von ehemaligen Zementfirmen im Laufental stammen, welche aus der Abluft durch die Luftströmungen verteilt wurden. Diese Theorie stützt er darauf, dass die Belastungen unabhängig der geologischen Schichtung vorhanden sind. Diese Aussage stimmt jedoch nicht mit den Auswertungen der Cadmiumgehalte der vorliegenden Messkampagne überein. Diese zeigen nämlich, dass die Belastung je nach geologischer Schicht sehr wohl variiert (Kapitel 7.2). Für die Pfirter-These hingegen spricht, dass gemäss den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung Cadmium als einziger Parameter keinen signifikanten Gehaltsunterschied in Abhängigkeit vom Kalkgehalt zeigt.

## 8 Fazit / Ausblick

Im gesamten solothurnischen Jurabogen wurden an 127 ausgewählten Standorten Proben entnommen: A-Proben aus dem Oberboden und C-Proben aus dem Ausgangsmaterial der entsprechenden Böden. Die Auswahl der Standorte erfolgte aufgrund einer vorgelagerten geologischen Untersuchung von Urs Pfirter. Beprobte wurden ausschliesslich Böden auf geologischen Schichten, welche im Verdacht stehen, erhöhte Schwer- und Halbmetallkonzentrationen aufzuweisen.

Die Probenahme erwies sich als anspruchsvoll. Bereits die Evaluation eines geeigneten Standorts, an welchem die gesuchte geologische Schicht eindeutig feststand, war aufgrund der juratypischen, komplexen geologischen Verhältnissen nicht einfach. Die Entnahme der C-Proben gestaltete sich auch technisch schwierig, da sich die Böden an vielen Standorten durch hohe Skelettgehalte auszeichneten.

Fast alle analysierten Standorte und Einzelproben weisen in mindestens einem der gemessenen Schadstoffwerte Überschreitungen bzgl. Richt-, Prüf- oder Sanierungswert auf. Die bezüglich der Anzahl als auch bezüglich der gemessenen Werte markantesten Überschreitungen weist Arsen auf, gefolgt von Vanadium.

Hierzu muss festgehalten werden, dass die Proben mittels der XRF-Methode analysiert wurden, die Anforderungswerte, welche zum Vergleich beigezogen wurden, jedoch auf der VBBo Methode oder der Königswasseraufschlussmethode beruhen. Dadurch sind die Werte nicht absolut miteinander vergleichbar.

Ein Grund für die vielen Überschreitungen wird auch darin vermutet, dass nur Böden auf verdächtigen geologischen Schichten beprobt wurden.

- Um die Belastungssituation im Untersuchungsperimeter abschliessend zu beurteilen, müssten auch Bodenproben über unverdächtigen geologischen Schichten analysiert werden.

Absolut gesehen über alle Parameter weisen folgende geologische Schichten die meisten und höchsten Überschreitungen auf: *Birmenstorf, Elsässer Molasse, Liesberg bis Rauracien-Korallenkalke, Opalinuston, Rauracien Korallenkalke, Sissach bis Rothenfluh, Unterer Hauenstein bis Fe-Oolith, Unt. Hauptrogenstein, sämtliche untersuchten Varians-Schichten sowie die Verena-Schicht.*

Die Hypothese, dass sich gewisse geologische Schichten bezüglich einzelner Parametergehalte von anderen unterscheiden, konnte teilweise bestätigt werden. Dies gilt für die Parameter Arsen, Barium, Cadmium und Gallium. Kein signifikanter Unterschied zeigt sich hingegen bei Chrom, Kobalt und Vanadium. Jedoch sind für die jeweiligen Parameter die geologischen Schichten, welche sich im Gehalt unterscheiden, nicht dieselben. Es kann also nicht ausgesagt werden, dass es eine spezifische Schicht gibt, welche bezüglich allen Parametern stärker belastet ist.

- Um die Hypothese abschliessend zu klären, bräuchte es in einzelnen geologischen Schichten mehr Proben als auch Vergleichsproben in «unverdächtigen» geologischen Schichten.

Der Vergleich der C-Proben mit den gemessenen Werten aus der Untersuchung von Urs Pfirter zeigt ebenfalls, dass für die meisten geologischen Schichten ein ähnliches Bild bei den untersuchten Parametern resultiert. Somit konnte bestätigt werden, dass gewisse Schichten bezüglich bestimmter Schadstoffe auffälliger sind als andere.

Die Hypothese, dass generell in der Nähe der Grenze zum Permokarbondrog erhöhte Parameterwerte gefunden werden, kann durch die vorliegende Untersuchung nicht bestätigt werden. Um die Theorie der aufsteigenden Tiefenwässer zu überprüfen, müsste man die Grenzen und Versätze des Permokarbondrogs sowie das Strömungsverhalten des damaligen Meeres besser kennen. Es kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass die Erklärung für vereinzelte Hotspots dienen könnte. Dies müsste aber genauer untersucht werden.

In vielen Proben sind die gemessenen Schadstoffgehalte im Oberboden höher als im geologischen Ausgangsmaterial. Ob die Belastungen in jedem Fall geogenen Ursprungs sind oder ob auch anthropogene Faktoren mitspielen, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Aus den Auswertungen ergaben sich Indizien für beide Theorien. So wurde einerseits festgestellt, dass die Parameter, mit Ausnahme von Cadmium, in kalkfreien Bodenhorizonten höher sind als auf kalkhaltigen. Dies stützt die Theorie eines geogenen Ursprungs der Belastung. Dass die Parameter, bis auf Arsen, auf Landwirtschaftsflächen höher sind als im Wald, stützt hingegen die Theorie, dass - ausser bei Arsen - auch mit anthropogenen Einflüssen zu rechnen ist.

- Für ein genaueres Bild müsste man die Standorte einzeln betrachten und spezifische Erklärungen je Standort überprüfen. Die Schlacke-Thematik sollte zudem genauer betrachtet werden, da diese für Landwirtschaftsflächen eventuell relevant sein könnte, respektive eine Erklärung für einige Standorte mit hohen Werten sein könnte. Nicht ausser Acht gelassen werden darf auch in diesem Zusammenhang die im Juraboden sehr komplexe geologische Situation. So ist es nicht ausgeschlossen, dass das Ausgangsmaterial (C-Probe) aus einer anderen geologischen Schicht stammt, wie der Oberboden (A-Probe) am Standort.

## 9 Literaturverzeichnis

Amt für Umweltschutz und Energie AUE Basel-Landschaft (2015): *Geogene Hintergrundbelastungen in den Oberböden im Kanton Basel-Landschaft*. Bau- und Umweltschutzdirektion, Liestal.

Dittrich, B., Klose, R. (2008). *Schwermetalle in Düngemitteln*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14898>

Hämmann, M. (2003). *Handbuch – Probenahme und Probevorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden*. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

Leu, W. (2008). *Arbeitsbericht NAB 08-49*. Geoform AG. <https://nagra.ch/en/downloads/arbeitsbericht-nab-08-49-2/>

Mailänder, R. A., & Hämmann, M. (2005). *Handbuch – Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden – Gefährdungsabschätzung Boden*. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-boden/boden--publikationen/publikationen-boden/gefaehrungsabschaetzung-und-massnahmen-bei-schadstoffbelasteten.html>

Pfirter U. (2021): *Geogene Belastung mit Schwermetallen/ Halbmetallen im Kanton SO, Geologischer Kurzbericht*, Lauwil.

SR 814.12 — *Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)* vom 14.04.2016. [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/1854\\_1854\\_1854/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/1854_1854_1854/de)

Schmidhauser A. und Gasche T. (2011): *Gesamtmelioration Blauen, Baselland. Schlussbericht Bodenkartierung. Gasche-Bodengutachten*, Basel.

Zahner, D. (2020): *Geogene Bodenbelastungen im Kanton Solothurn*. Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Solothurn.

## Anhang A Standorte Probenahme

Tabelle 10. Übersicht der beprobten Standorte mit der Angabe von der jeweiligen Formation, Schicht und Nutzung

ID	X Koord	Y Koord	Gemeinde	Formation	Schicht	Nutzung
1	2614616	1250162	Nunningen	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
2	2606582	1258710	Witterwil	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
3	2606120	1259066	Witterswil	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
4	2602352	1248509	Bärschwil	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
5	2611611	1250462	Nunningen	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
6	2621923	1241022	Balsthal	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
7	2618956	1242458	Balsthal	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
8	2618361	1241962	Balsthal	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	LN
9	2617872	1245326	Mümliswil-Ramiswil	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	Wald
10	2611661	1246968	Meltingen	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
11	2603422	1256980	Metzerlen-Mariastein	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	Wald
12	2618304	1254358	Büren	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
13	2616229	1260518	Gempfen	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
14	2616128	1252151	Seewen	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
15	2613714	1249729	Nunningen	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
16	2612646	1249402	Zullwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
17	2608233	1247271	Erschwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
18	2607383	1234702	Balm bei Günsberg	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
19	2617975	1237848	Balsthal	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
20	2619982	1241896	Mümliswil-Ramiswil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
21	2613944	1245587	Beinwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
22	2610262	1242859	Beinwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
23	2614499	1245814	Beinwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
24	2631977	1247676	Hauenstein-Ifenthal	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
25	2632588	1246770	Trimbach	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
26	2613157	1241727	Matzendorf	Haupttrogenstein (223)	Unterer Haupttrogenstein (22310 22310)	LN
27	2616306	1252072	Seewen	Haupttrogenstein (geol. Atl.)	Unterer Haupttrogenstein bis Ferrugineus Oolith (22310 22340)	Wald
28	2603516	1246869	Bärschwil	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
29	2608751	1234954	Günsberg	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
30	2620501	1238706	Oensingen	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
31	2620562	1238659	Oensingen	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
32	2620030	1242336	Mümliswil-Ramiswil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	Wald
33	2608750	1244562	Beinwil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
34	2608502	1244498	Beinwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
35	2607964	1244602	Beinwil	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
36	2607227	1246468	Erschwil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
37	2601868	1248095	Bärschwil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
38	2602872	1248269	Bärschwil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
39	2614017	1242049	Matzendorf	Callovien (224)	Varians bis Anceps Athleta (22410 22450)	LN

40	2608184	1251216	Breitenbach	Untere Raurachische Molasse (322)	Elsässer Molasse (32260 32260)	Bäume bei Siedlung
41	2599879	1260095	Rodersdorf	Untere Raurachische Molasse (322)	Elsässer Molasse (32260 32260)	LN
42	2598189	1230997	Selzach	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
43	2604350	1231856	Oberdorf	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
44	2597249	1230279	Bettlach	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
45	2614769	1250280	Nunningen	Hauptrogenstein (223)	Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus-Oolith (22310 22340)	Wald
46	2614210	1238473	Matzendorf	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
47	2618638	1256812	Nuglar-St. Pantaleon	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
48	2618482	1256881	Nuglar-St. Pantaleon	Bärschwil (232)	Renggeri-Tone bis Terrain à chailles (23210 23220)	LN
49	2620143	1239832	Balsthal	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
50	2617947	1246048	Mümliswil-Ramiswil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
51	2618168	1245733	Mümliswil-Ramiswil	Hauptrogenstein (223)	Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus-Oolith (22310 22340)	LN
52	2618052	1246000	Mümliswil-Ramiswil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
53	2618188	1245873	Mümliswil-Ramiswil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
54	2607611	1248342	Büsserach	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
55	2611423	1251358	Nunningen	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
56	2642097	1250213	Erlinsbach	Callovien (224)	Varians bis Dalle nacree (22410 22440)	Wald
57	2618967	1223296	Aeschi	Obere Meeresmolasse (331)	Basiskonglomerat / Muschelsandstein (33110 33110)	LN
58	2607139	1234406	Balm bei Günsberg	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
59	2610938	1250922	Breitenbach	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
60	2613737	1244795	Beinwil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	Wald
61	2614206	1258671	Dornach	St. Ursanne (234)	Rauracien-Korallenkalke (23420 23420)	Wald
62	2602239	1256598	Metzerlen-Mariastein	St. Ursanne (234)	Liesberg-Schichten bis Rauracien-Korallenkalke (23410 23420)	Wald
63	2614072	1259314	Dornach	Untere Raurachische Molasse (322)	Elsässer Molasse (32260 32260)	LN
64	2605278	1257261	Hofstetten-Flüh	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien Korallenkalke (23410 23420)	Wald
65	2602500	1258760	Metzerlen-Mariastein	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien Korallenkalke (23410 23420)	Wald
66	2614157	1255214	Hochwald	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien Korallenkalke (23410 23420)	Wald
67	2611977	1250251	Nunningen	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien Korallenkalke (23410 23420)	Wald
68	2614560	1255464	Hochwald	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien Korallenkalke (23410 23420)	LN
69	2640391	1248044	Stüsslingen	Villigen-Formation (235)	Geissberg (23510 23510)	Wald
70	2641959	1247738	Niedergösgen	Villigen-Formation (235)	Geissberg (23510 23510)	Wald
71	2593848	1228613	Grenchen	Reuchenette (239)	Kimmeridge-Kalke (23910 23910)	Wald
72	2601911	1234602	Welschenrohr-Gänsbrunnen	Reuchenette (239)	Kimmeridge-Kalke (23910 23910)	Wald
73	2604978	1232302	Oberdorf	Reuchenette (239)	Kimmeridge-Kalke (23910 23910)	Wald

74	2616071	1238124	Laupersdorf	Reuchenette (239)	Kimmeridge-Kalke (23910 23910)	Wald
75	2602073	1247588	Bärschwil	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
76	2602444	1247247	Bärschwil	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
77	2605484	1247403	Grindel	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
78	2612040	1247555	Meltingen	Birmenstorf (geol. Atl.)	Birmenstorf	Wald
79	2611937	1248262	Meltingen	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
80	2615152	1245557	Beinwil	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
81	2631509	1245823	Hauenstein-Ifenthal	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
82	2629395	1245279	Hägendorf	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
83	2619471	1246358	Mümliswil-Ramiswil	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	LN
84	2639792	1252995	Kienberg	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	Wald
85	2607198	1234299	Balm bei Günsberg	Staffelegg (geol. Atl.)	Staffelegg	Wald
86	2620963	1238902	Oensingen	Birmenstorf (geol. Atl.)	Birmenstorf	LN
87	2608959	1239341	Herbetswil	Hauptrogenstein (223)	Unterer Hauptrogenstein (22310 22310)	LN
88	2639883	1256843	Kienberg	Passwang (222)	Sissach (22210 22210)	Wald
89	2606751	1234121	Rüttenen	Hauptrogenstein (223)	Unterer Hauptrogenstein (22310 22310)	LN
90	2609479	1239560	Herbetswil	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	LN
91	2612332	1241802	Aedermannsdorf	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	LN
92	2610704	1241020	Aedermannsdorf	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	LN
93	2614878	1242129	Laupersdorf	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	LN
94	2621814	1243493	Mümliswil-Ramiswil	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	Wald
95	2620305	1242231	Mümliswil-Ramiswil	Callovien (224)	Varians (22410 22410)	Wald
96	2604697	1237311	Welschenrohr-Gänsbrunnen	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
97	2625552	1242265	Holderbank	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
98	2621108	1238764	Oensingen	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	Wald
99	2619374	1238362	Balsthal	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	Wald
100	2621156	1240072	Balsthal	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
101	2620206	1242241	Mümliswil-Ramiswil	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
102	2621832	1243329	Mümliswil-Ramiswil	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
103	2614212	1242061	Laupersdorf	Callovien (224)	Callovien-Tone (22430 22430)	LN
104	2615200	1256594	Dornach	St. Ursanne (234)	Rauracien-Korallenkalke (23420 23420)	LN
105	2612193	1243991	Beinwil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	Wald
106	2624303	1243447	Holderbank	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
107	2622067	1245589	Mümliswil-Ramiswil	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
108	2613569	1246865	Nunningen	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	Wald
109	2605128	1256602	Hofstetten-Flüh	Opalinus-Ton (221)	Opalinus-Ton (22110 22110)	LN
110	2615182	1256636	Hochwald	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
110.1	2615205	1256595	Hochwald	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
111	2613580	1253306	Seewen	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
112	2612739	1250470	Nunningen	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
113	2610831	1242392	Mümliswil-Ramiswil	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
114	2619120	1245225	Mümliswil-Ramiswil	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
115	2611422	1238658	Herbetswil	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN

116	2608426	1236307	Welschenrohr-Gänsbrunnen	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	Wald
117	2607474	1237103	Welschenrohr-Gänsbrunnen	Siderolithikum (311)	Bohnerz (31110 31110)	LN
118	2608132	1238903	Herbetswil	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
119	2601328	1233125	Oberdorf	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
120	2638666	1254296	Kienberg	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
121	2639135	1249633	Stüsslingen	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
122	2634945	1249264	Wisn	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
123	2634186	1248210	Trimbach	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	Wald
124	2611275	1248721	Meltingen	Passwang (222)	Sissach bis Rothenfluh (22210 22250)	LN
125	2601693	1249405	Bärschwil	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien-Korallenkalke (23410 23420)	LN
126	2616272	1256238	Hochwald	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien-Korallenkalke (23410 23420)	LN
127	2614259	1246852	Beinwil	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
128	2612949	1246896	Meltingen	Birmenstorf (231)	Birmenstorf (23110 23110)	LN
129	2610218	1246846	Beinwil	St. Ursanne (234)	Liesberg bis Rauracien-Korallenkalke (23410 23420)	Wald
130	2608308	1246752	Erschwil	Callovien (224)	Varians bis Callovien-Tone (22410 22430)	LN
131	2603230	1236603	Welschenrohr-Gänsbrunnen	Balsthal (236)	Verena (23660 23660)	LN

## Anhang B Kartografische Auswertung

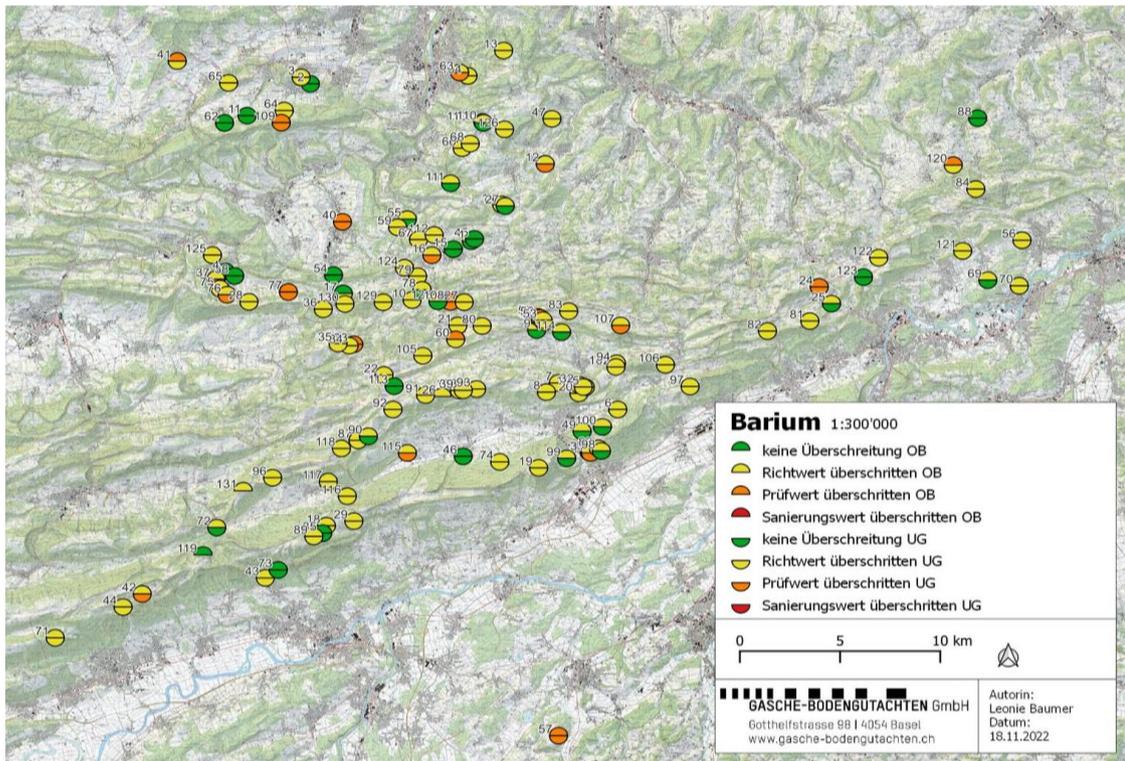


Abbildung 16. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Barium einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

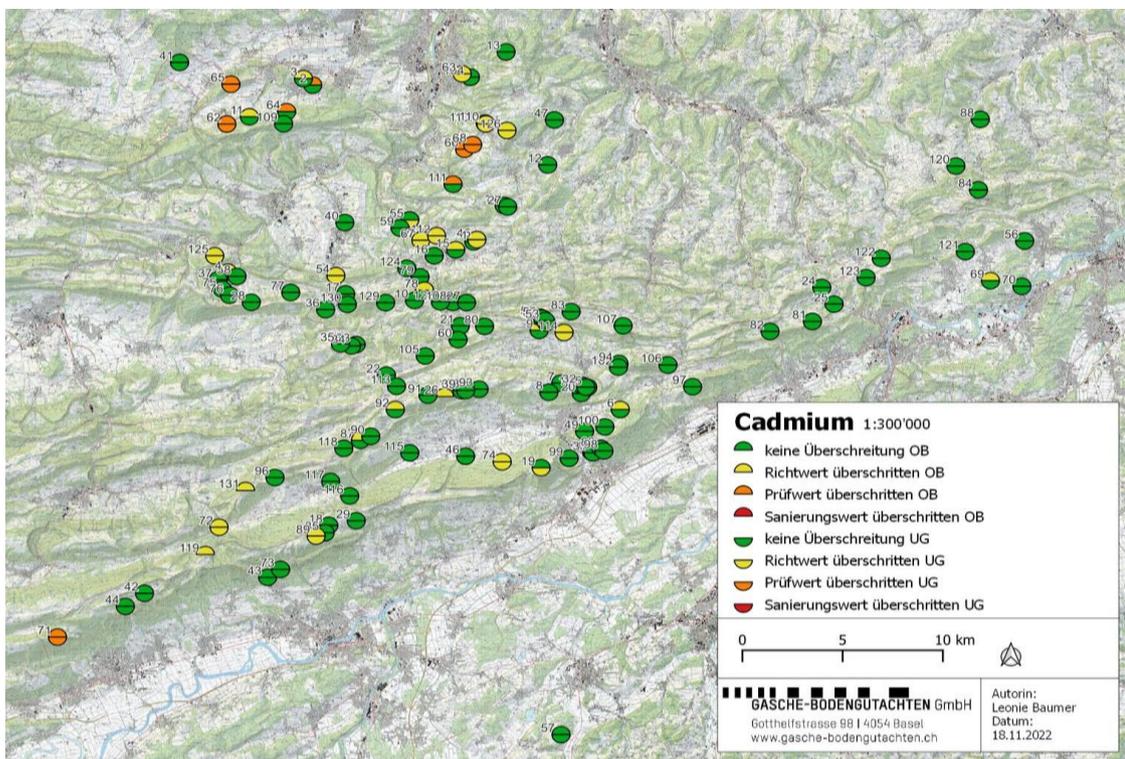


Abbildung 17. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Cadmium einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

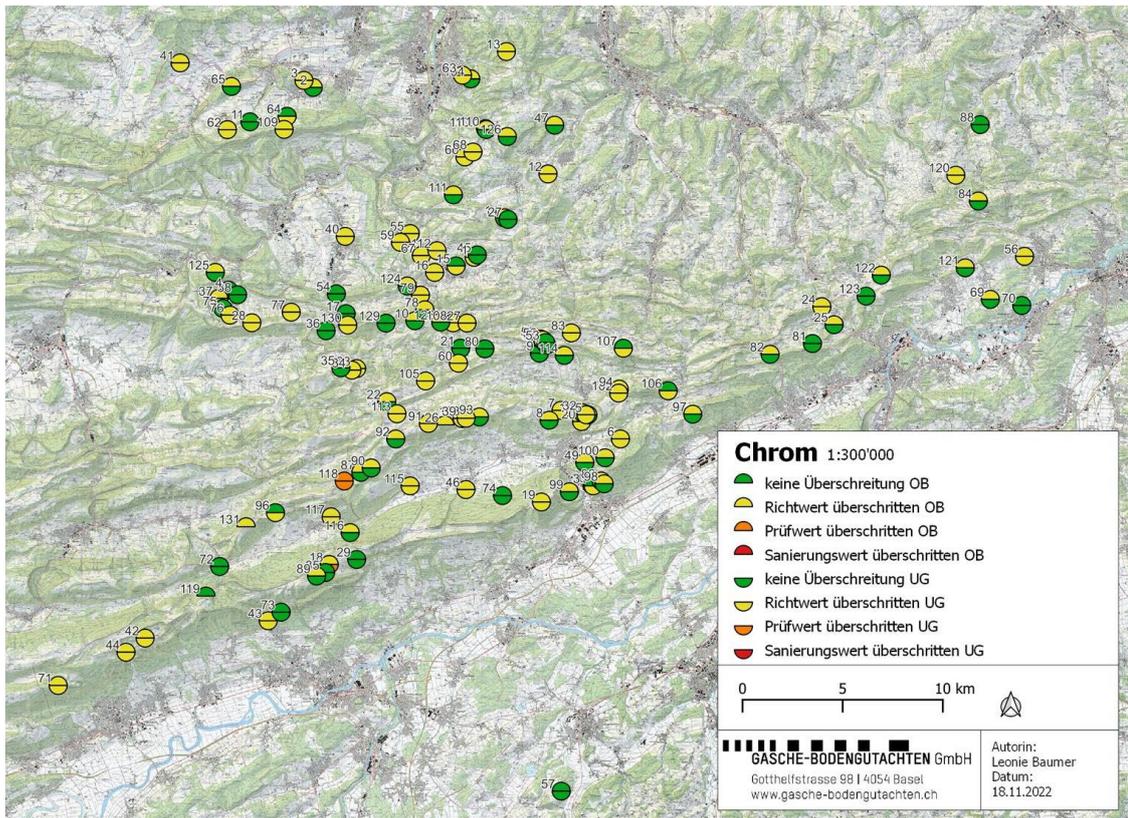


Abbildung 18. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe ob die Analysewerte für Chrom einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

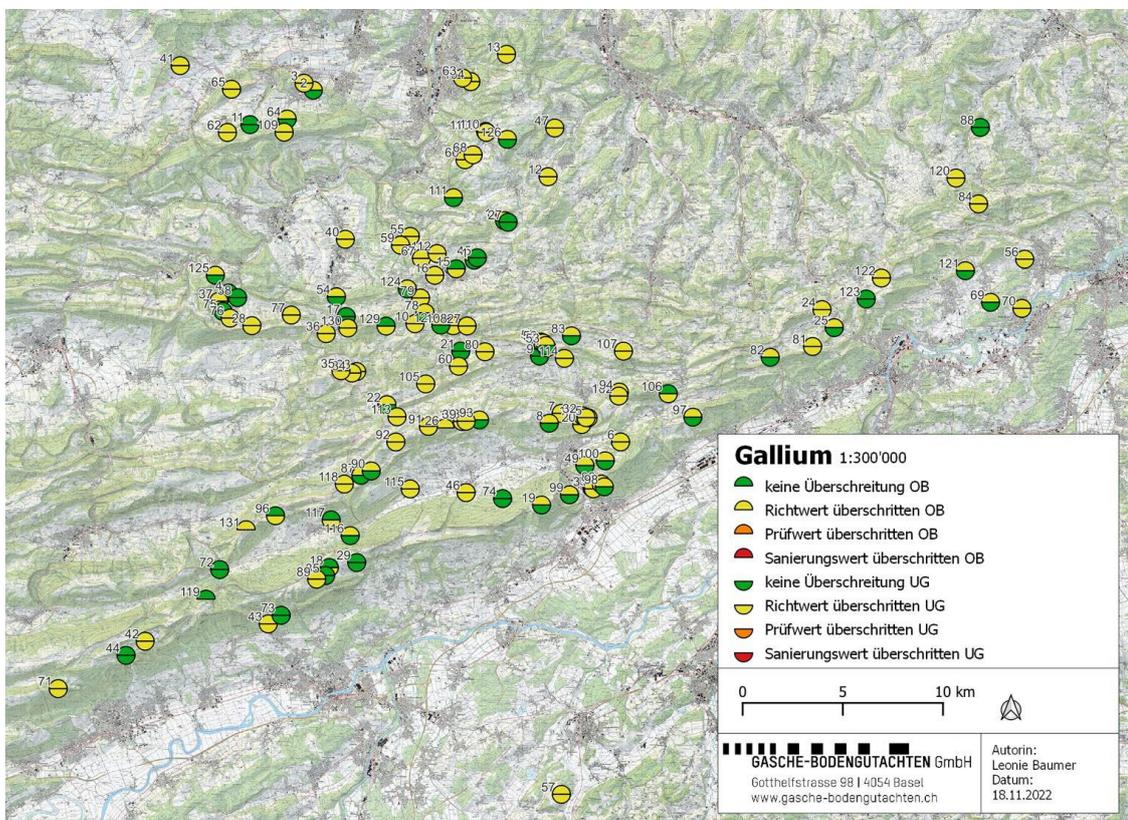


Abbildung 19. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe ob die Analysewerte für Gallium einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

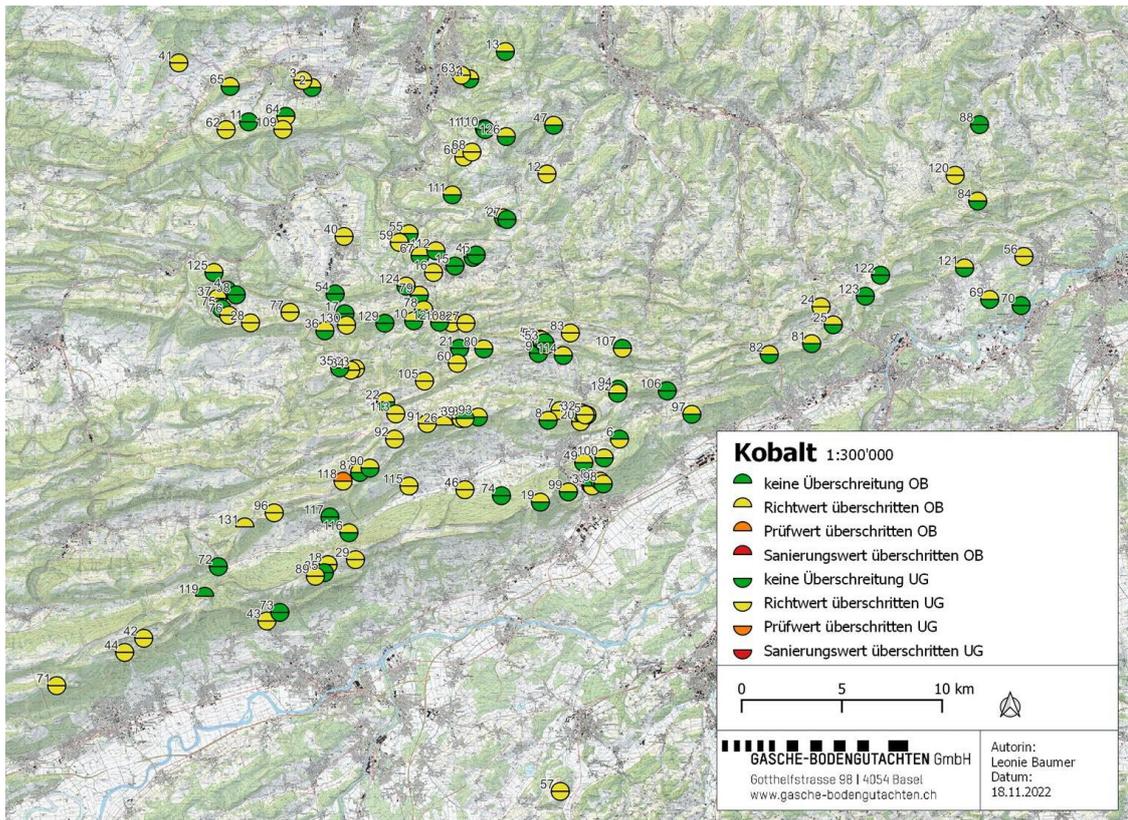


Abbildung 20. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Kobalt einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

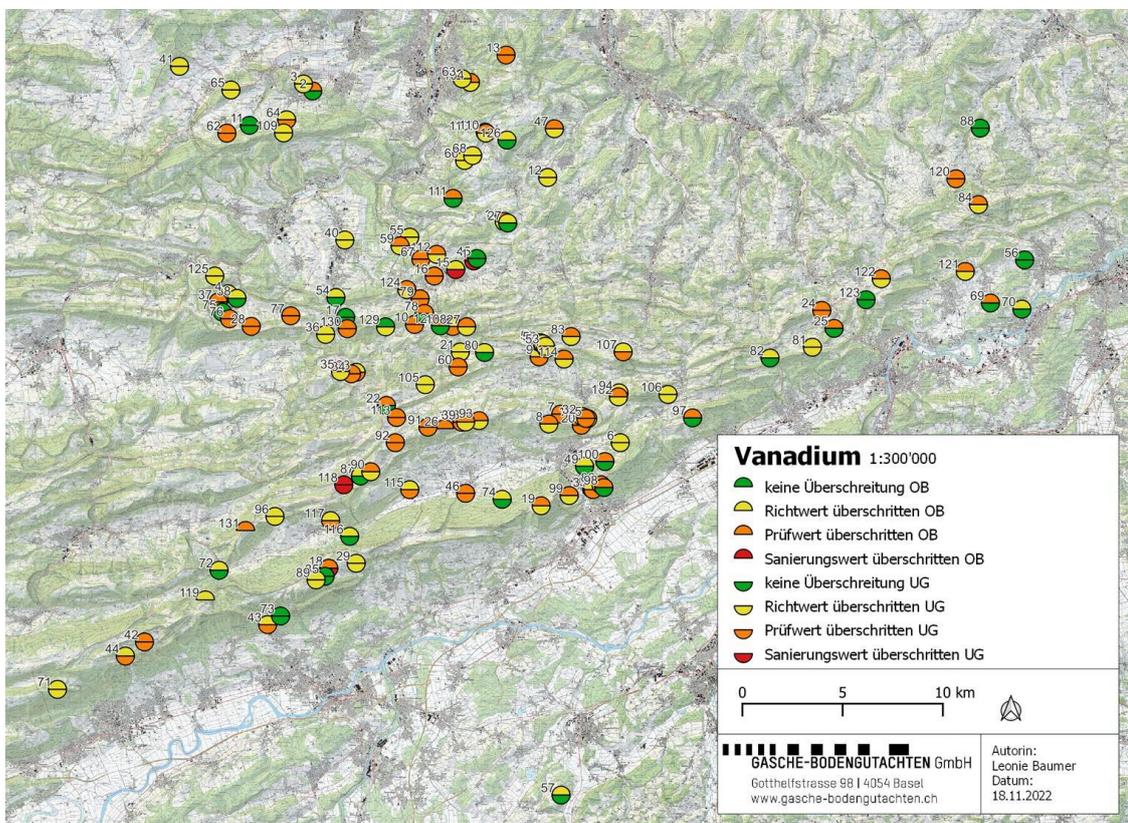


Abbildung 21. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Vanadium einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

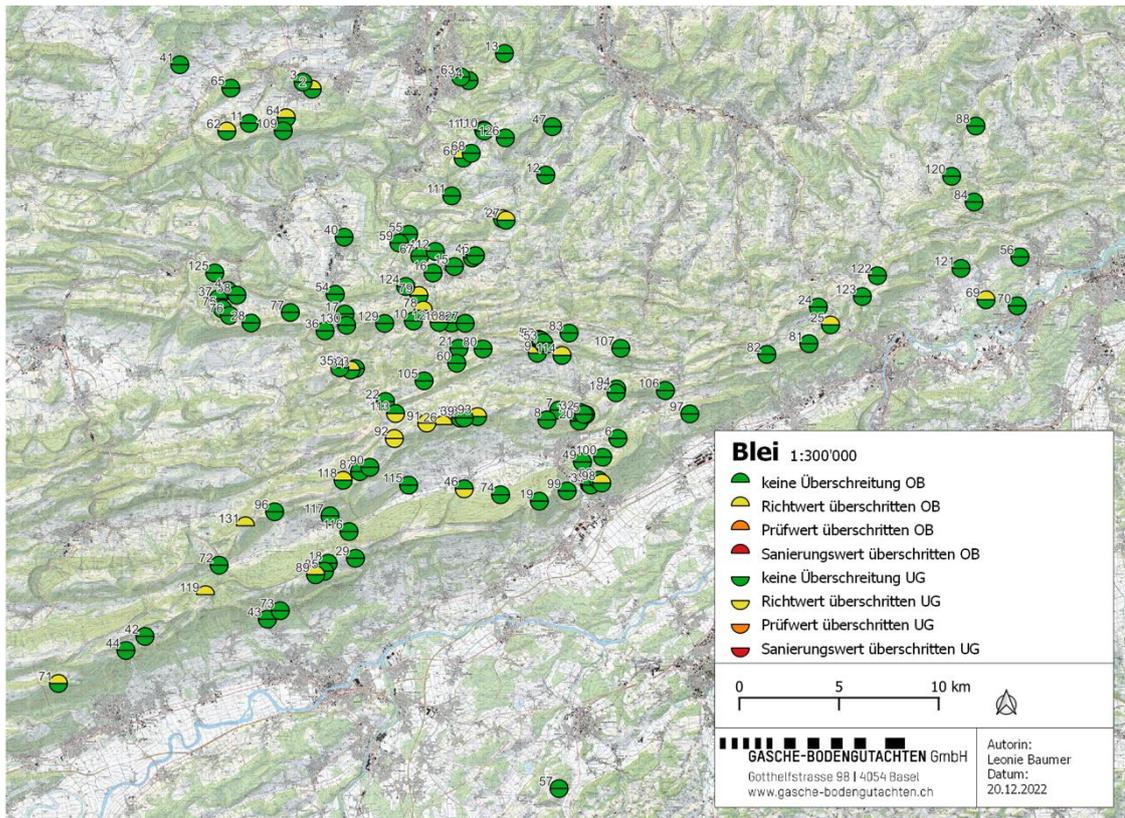


Abbildung 22. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Blei einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

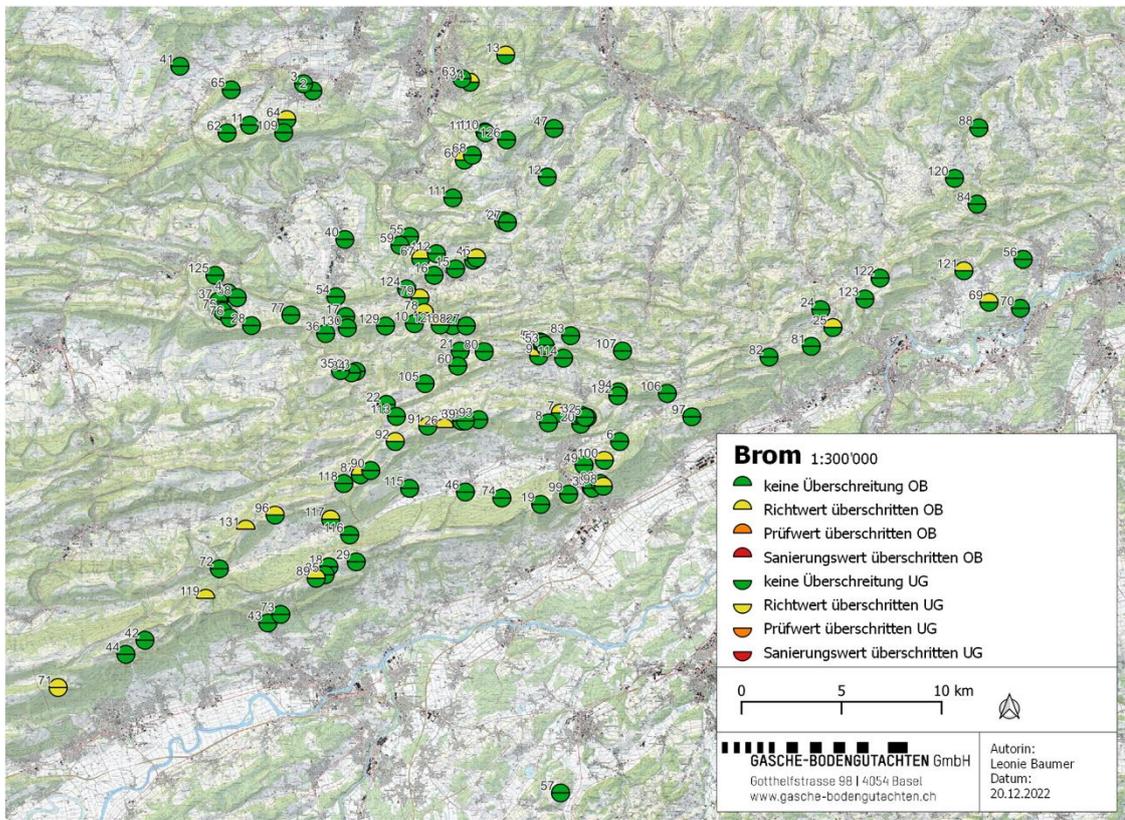


Abbildung 23. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Brom einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

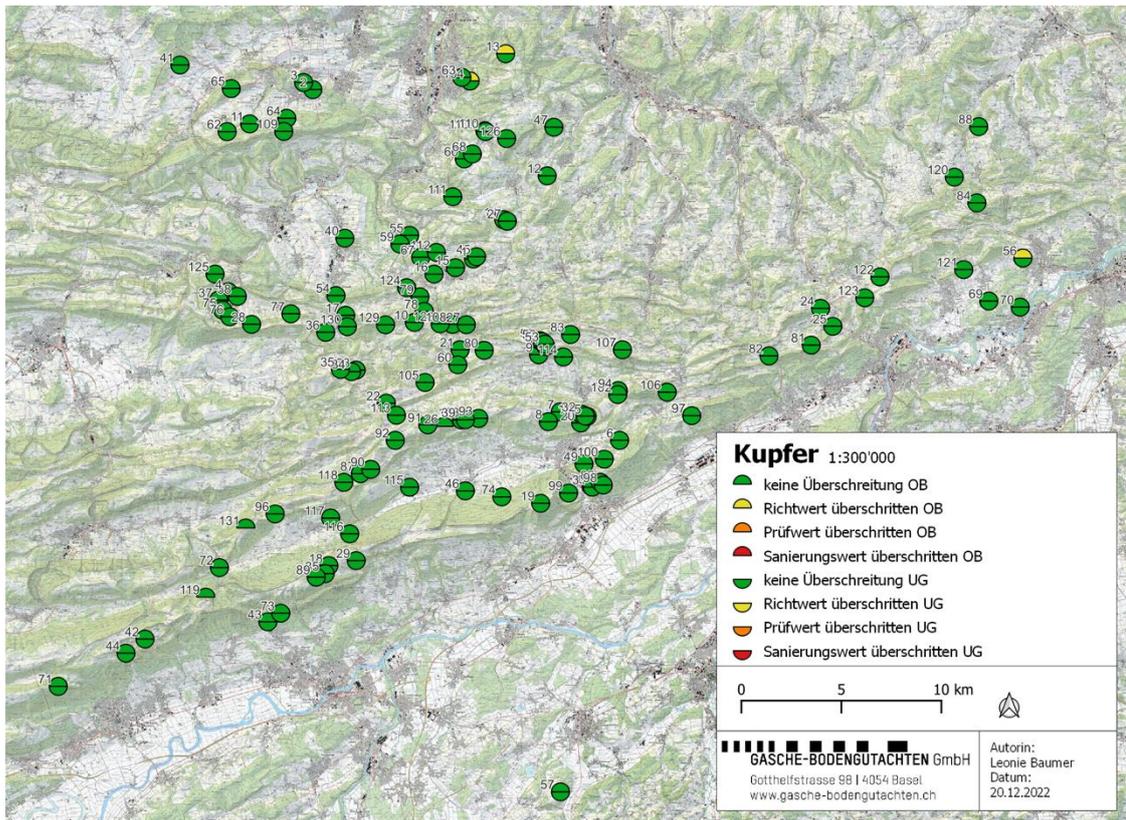


Abbildung 24. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Kupfer einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

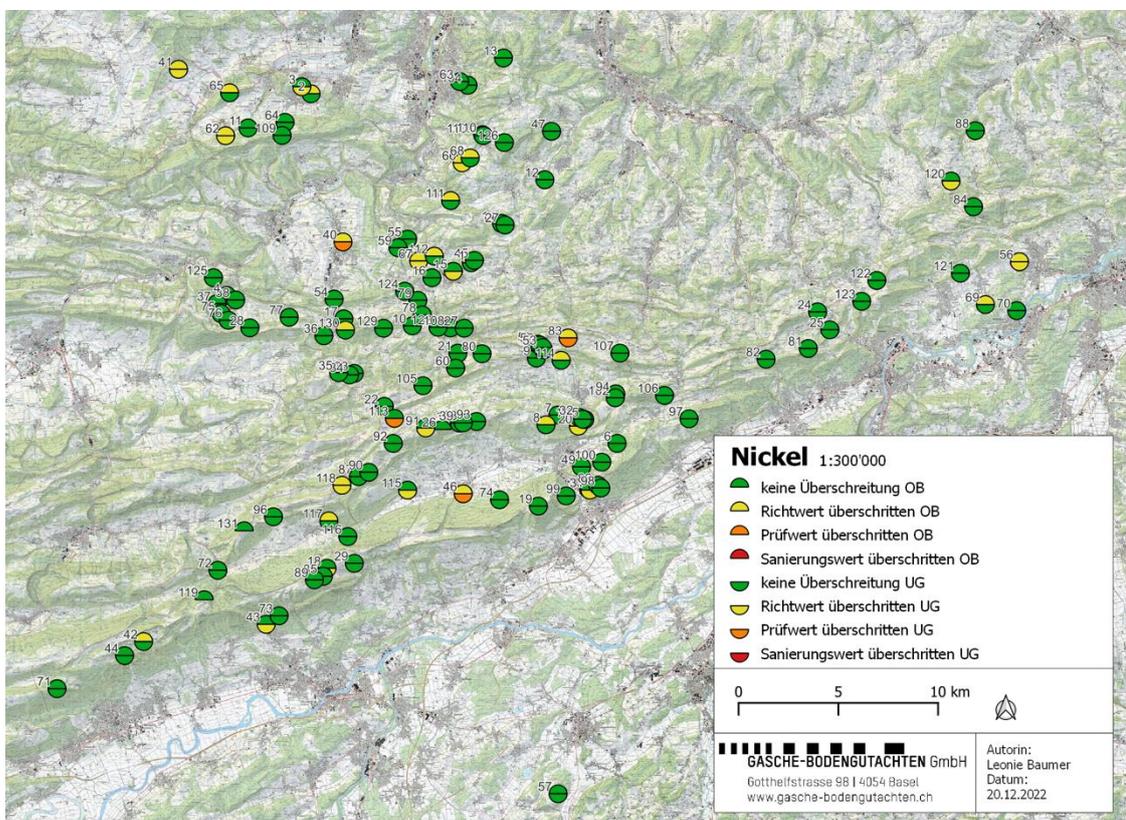


Abbildung 25. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Nickel einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

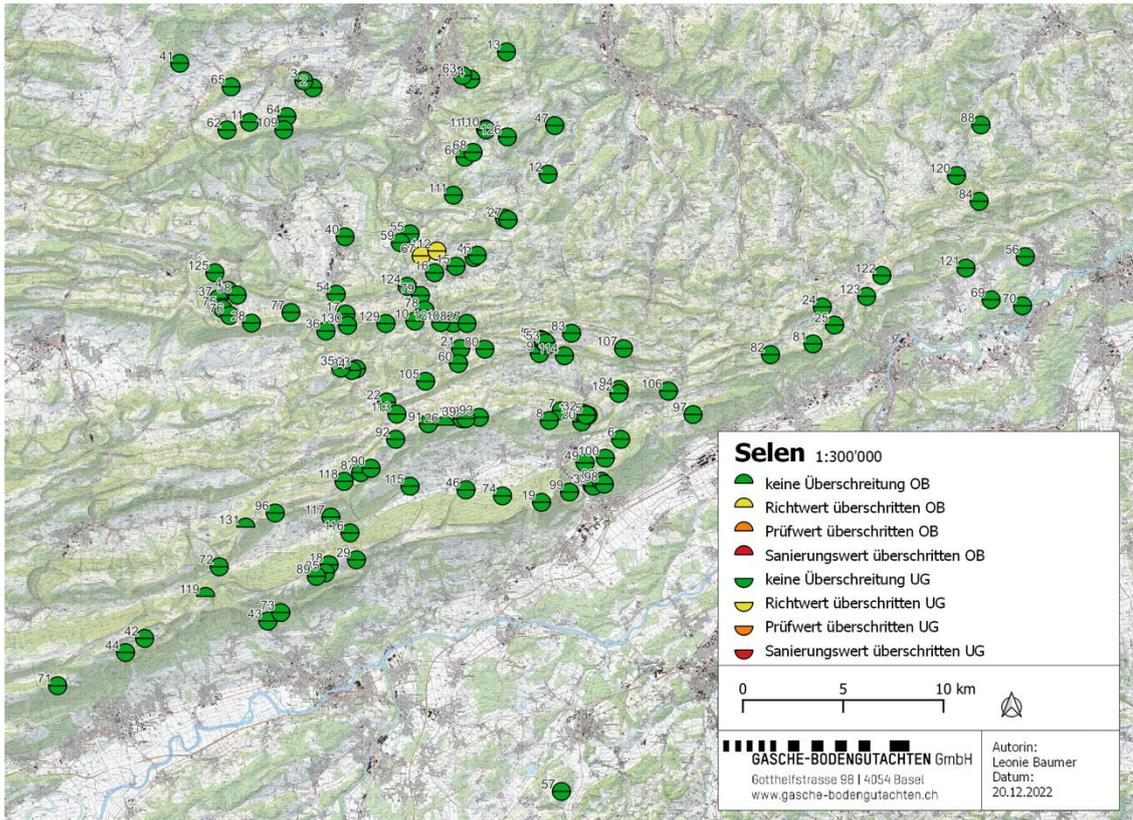


Abbildung 26. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Selen einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

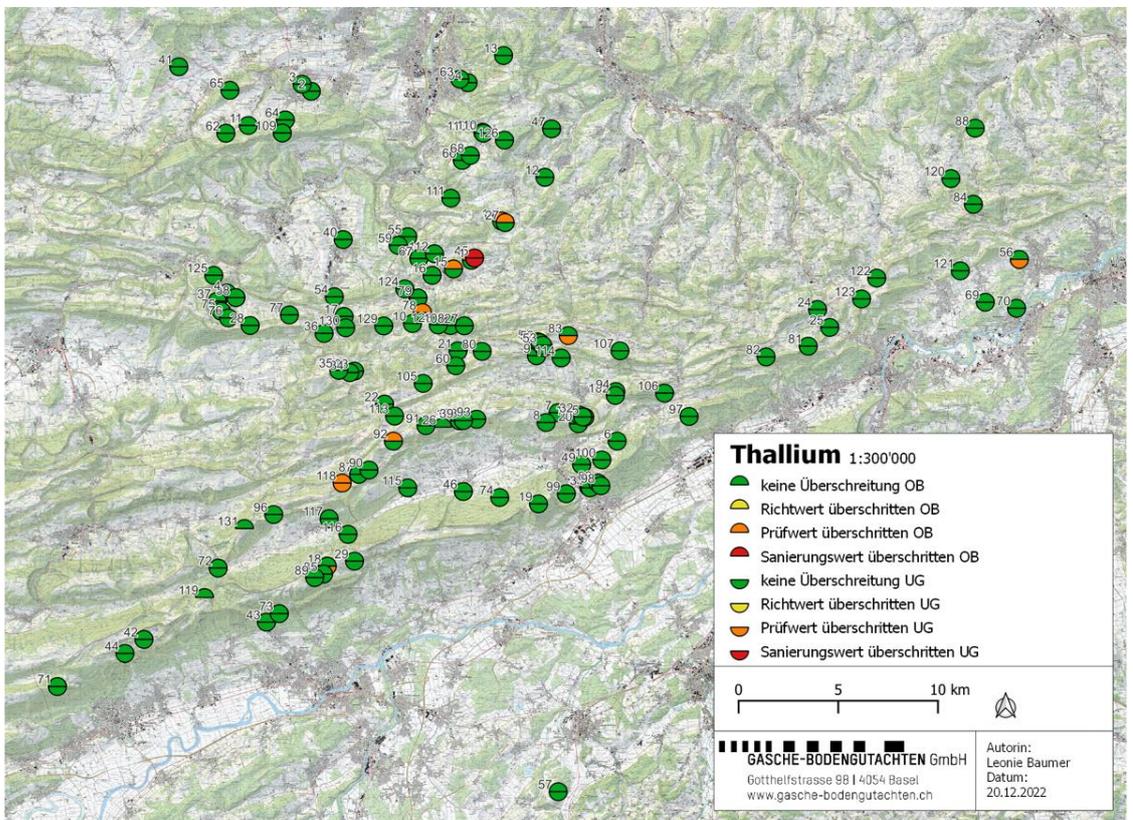


Abbildung 27. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Thallium einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

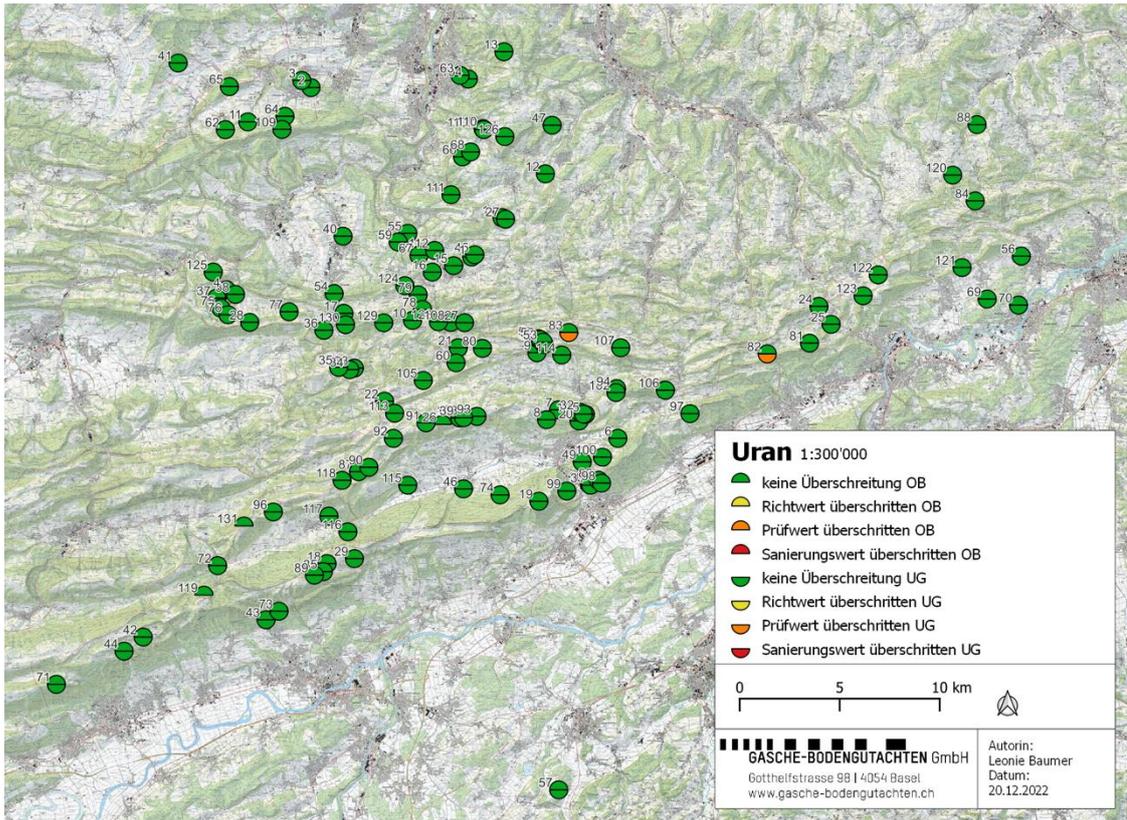


Abbildung 28. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Uran einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

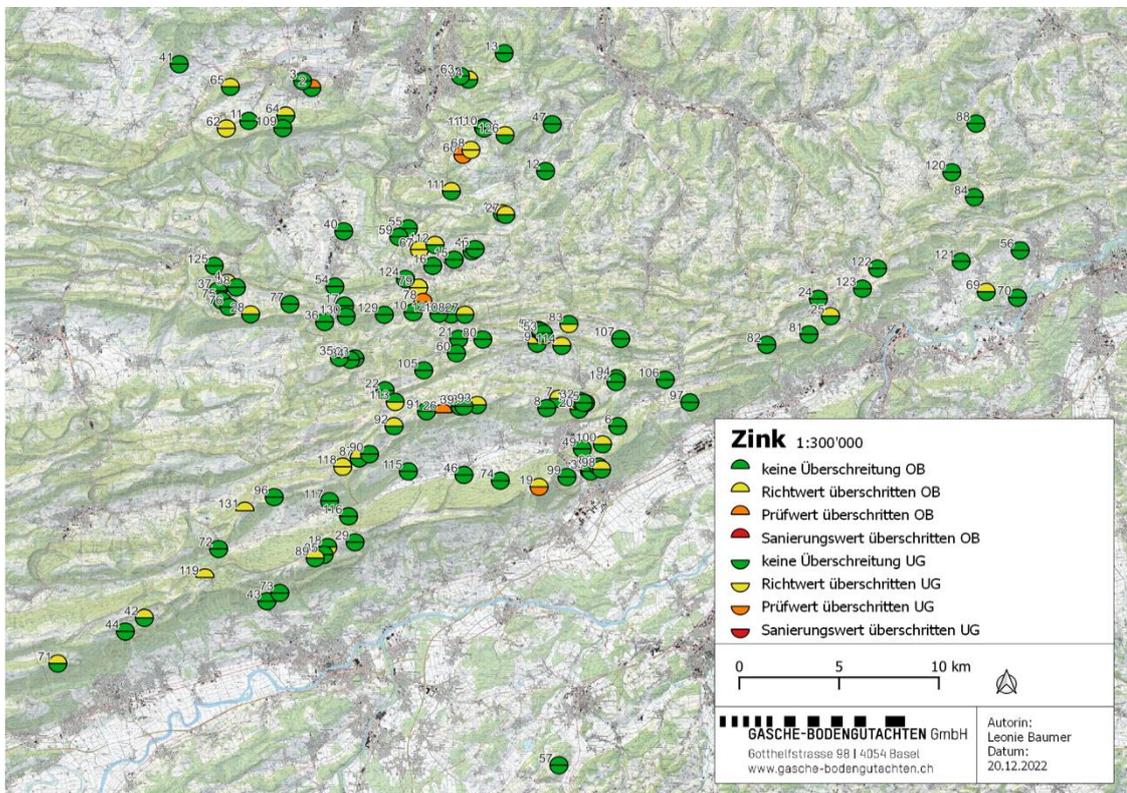


Abbildung 29. Karte mit den Probenahmestandorten sowie die Angabe, ob die Analysewerte für Zink einen Richt-, Prüf- oder Sanierungswert überschritten haben. OB = Oberboden, UG = Ausgangsmaterial

## Anhang C Parametergehalte in den verschiedenen Schichten

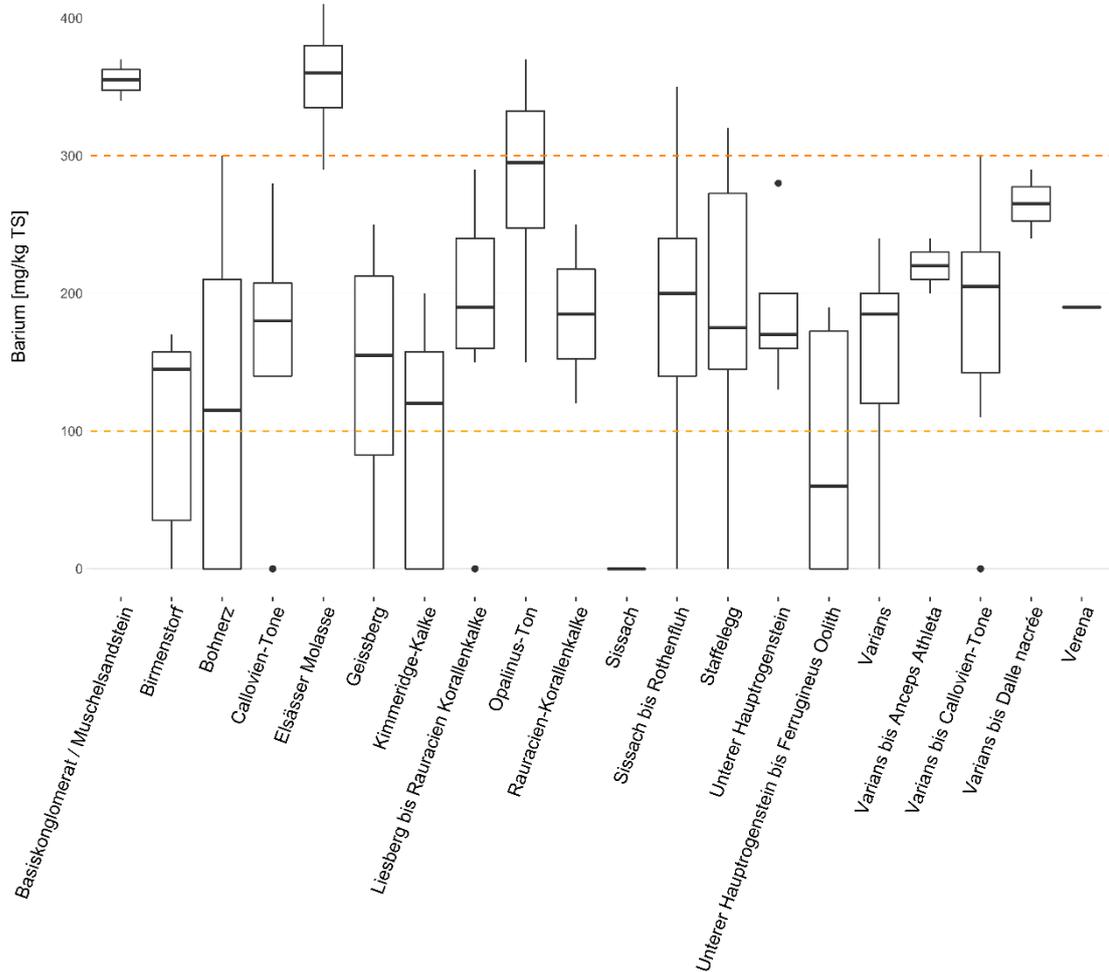


Abbildung 30. Bariumgehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (100), orange Linie = Prüfwert (300), rote Linie = Sanierungswert (1500)

Tabelle 11. Signifikante p-Werte (p-Wert < 0.05) aus der statistischen Analyse zur Hypothese, dass sich die geologischen Schichten im Bariumgehalt unterscheiden (Hypothese 1).

Barium	Basiskonglomerat / Muschelsandstein	Elsässer Molasse	Opalinus-Ton
Birmenstorf	0.024	0.004	0.001
Bohnerz	0.026	0.002	1.3*10 <sup>-7</sup>
Liesberg bis Rauracien Korallenkalke		0.049	0.013
Sissach	0.022	0.008	0.009
Callovien-Tone		0.019	0.002
Sissach bis Rothenfluh		0.02	3.2*10 <sup>-4</sup>
Geissberg		0.049	
Kimmeridge-Kalke	0.019	0.002	2.5*10 <sup>-4</sup>
Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith	0.021	0.003	0.001
Staffelegg		0.049	0.011
Varians		0.015	0.002
Varians bis Callovien-Tone		0.037	0.006

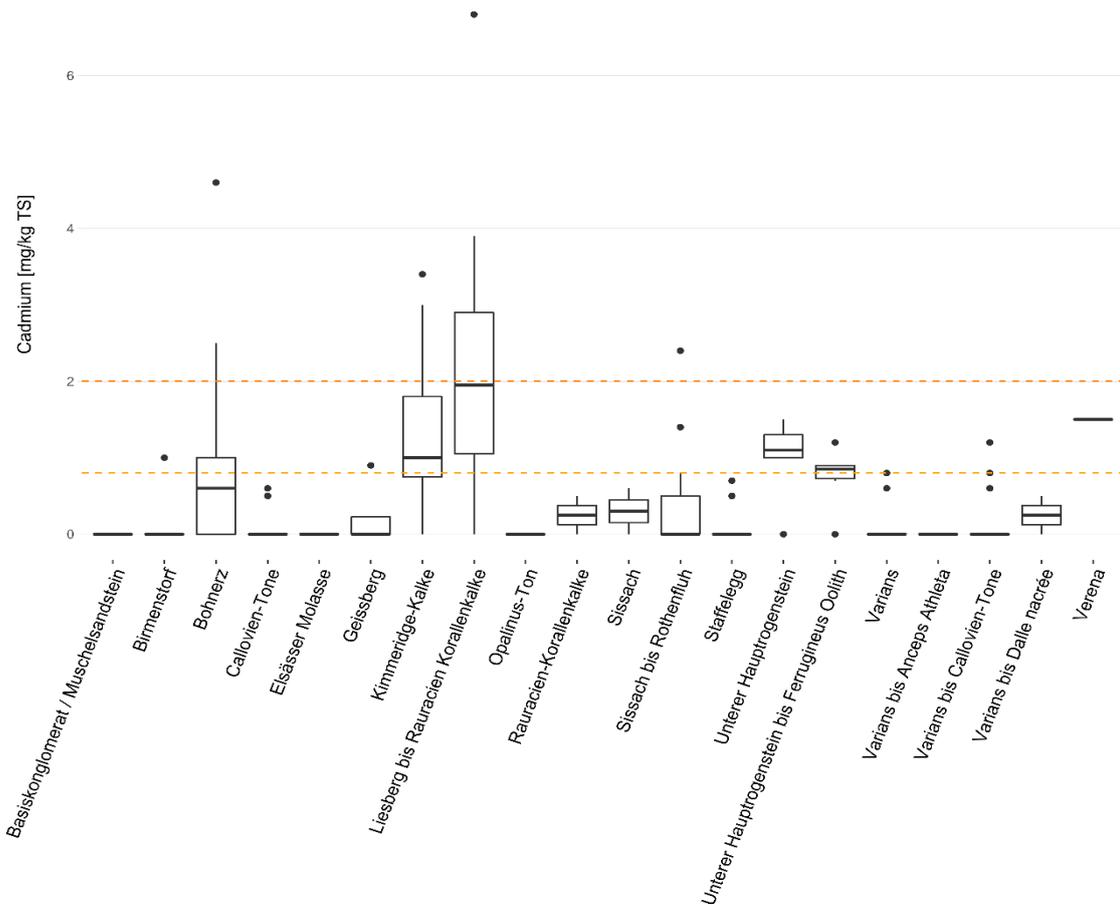


Abbildung 31. Cadmiumgehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (0.8), orange Linie = Prüfwert (2)

Tabelle 12. Signifikante p-Werte (p-Wert < 0.05) aus der statistischen Analyse zur Hypothese, dass sich die geologischen Schichten im Cadmiumgehalt unterscheiden (Hypothese 1).

<b>Cadmium</b>	<b>Kimmeridge-Kalke</b>	<b>Liesberg bis Rauracien Korallenkalke</b>	<b>Unterer Hauptprogenstein</b>	<b>Bohnerz</b>	<b>Unterer Hauptprogenstein bis Ferrugineus Oolith</b>
Birmenstorf	0.024	0.003			
Liesberg bis Rauracien Korallenkalke				0.022	
Elsässer Molasse	0.014	0.003	0.037		
Callovien-Tone	0.003	$6.9 \cdot 10^{-6}$	0.020	0.012	0.026
Geissberg		0.025			
Kimmeridge-Kalke					
Varians bis Anceps Athleta		0.030			
Basiskonglomerat / Muschelsandstein		0.029			
Opalinus-Ton	$7.0 \cdot 10^{-5}$	$5.9 \cdot 10^{-9}$	0.003	$5.7 \cdot 10^{-5}$	0.003
Staffelegg	0.001	$9.3 \cdot 10^{-7}$	0.014	0.003	0.019
Sissach bis Rothenfluh	0.003	$8.7 \cdot 10^{-7}$	0.033	0.009	0.048
Varians	0.003	$1.0 \cdot 10^{-5}$	0.020	0.014	0.026
Varians bis Callovien-Tone	0.001	$1.1 \cdot 10^{-6}$	0.014	0.003	0.020

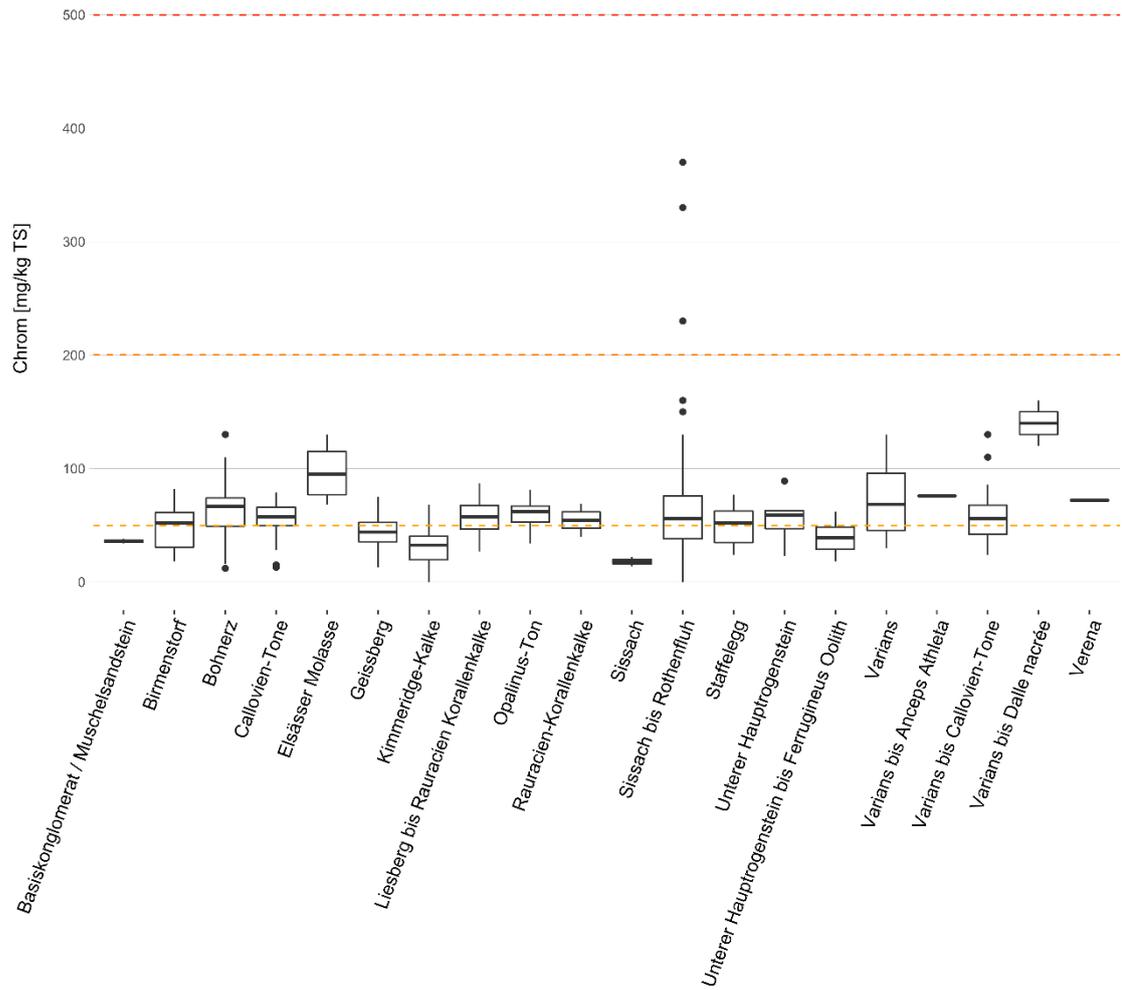


Abbildung 32. Chromgehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (50), orange Linie = Prüfwert (200), rote Linie = Sanierungswert (500)

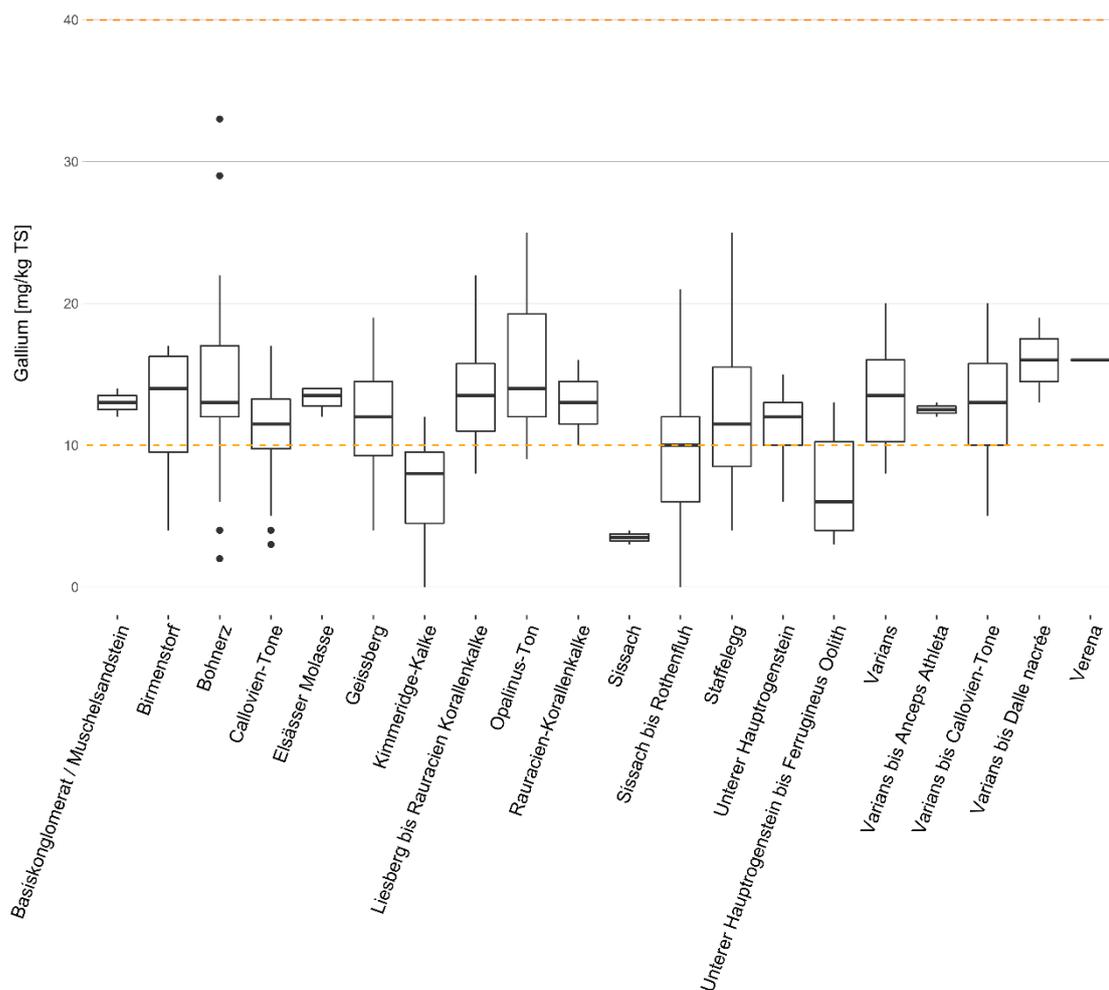


Abbildung 33. Galliumgehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (10), orange Linie = Prüfwert (40), rote Linie = Sanierungswert (200)

Tabelle 13. Signifikante p-Werte (p-Wert < 0.05) aus der statistischen Analyse zur Hypothese, dass sich die geologischen Schichten im Galliumgehalt unterscheiden (Hypothese 1).

Gallium	Kimmeridge-Kalke	Sissach bis Rothenfluh	Opalinus-Ton
Bohnerz	0.030	0.008	
Opalinus-Ton	0.006	0.002	
Unterer Hauptrogenstein bis Ferrugineus Oolith			0.026

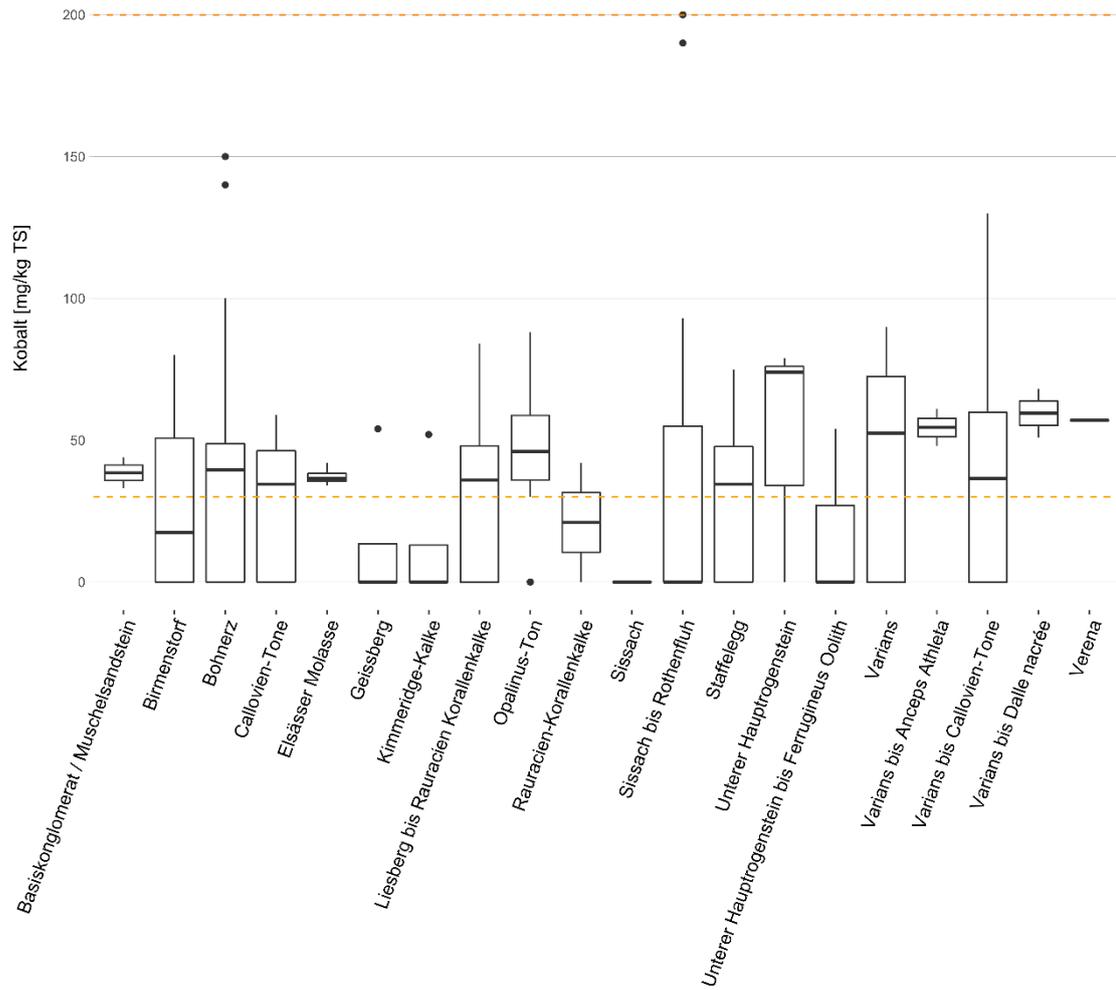


Abbildung 34. Kobaltgehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (30), orange Linie = Prüfwert (200), rote Linie = Sanierungswert (1000)

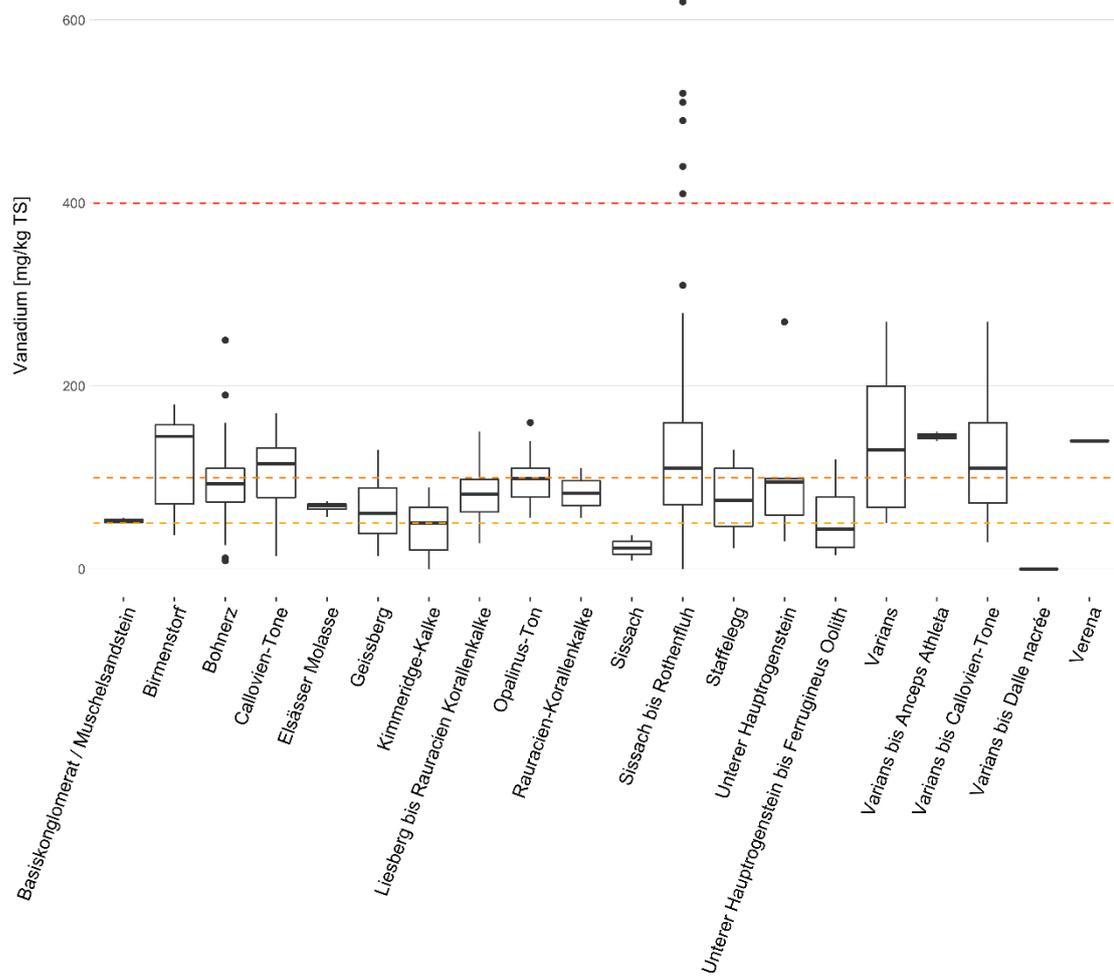


Abbildung 35. Vanadiumgehalte in den verschiedenen geologischen Schichten. Gelbe Linie = Richtwert (50), orange Linie = Prüfwert (100), rote Linie = Sanierungswert (400)

## Anhang D Pearson-Korrelation

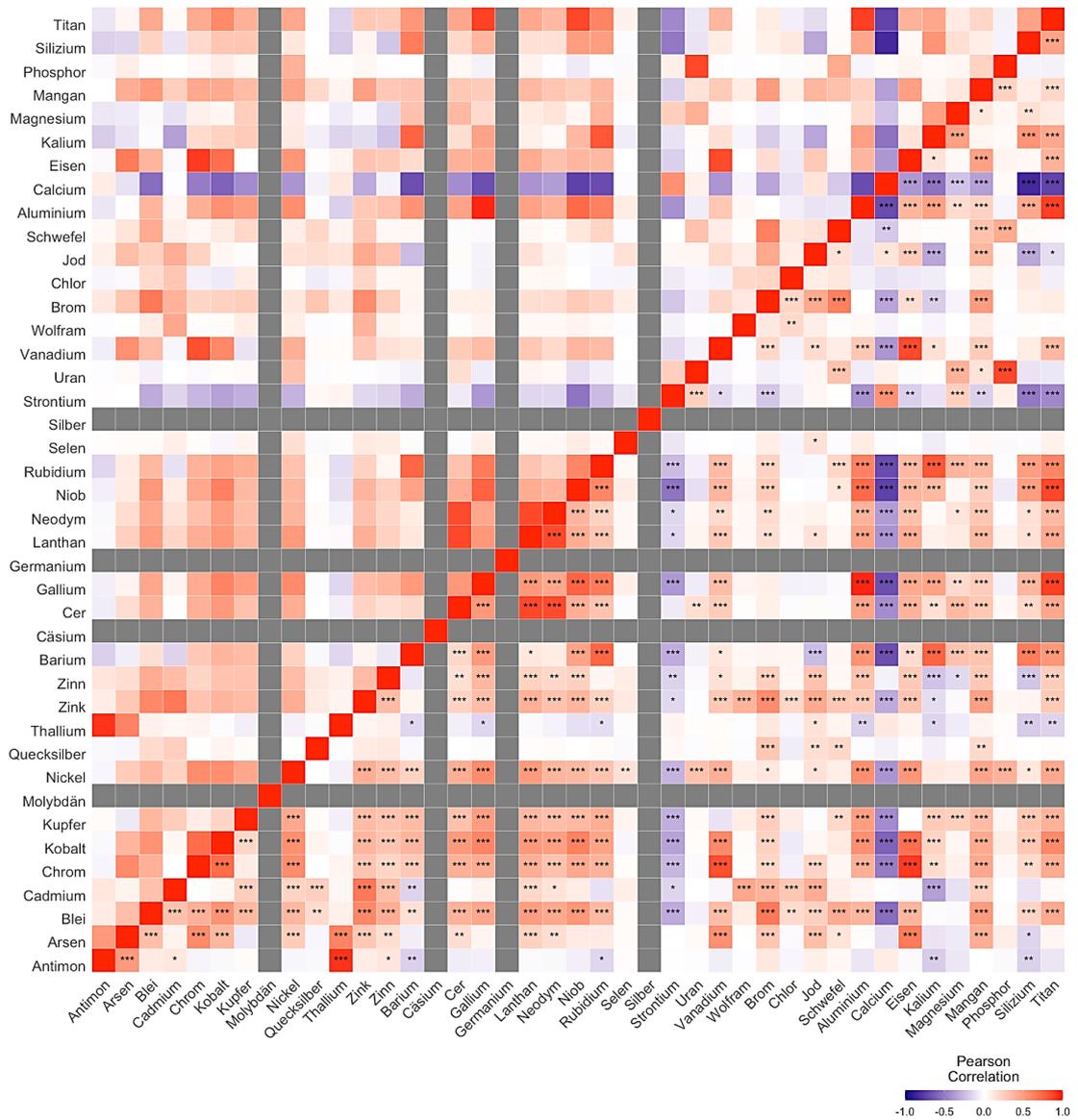


Abbildung 36. Pearson Korrelation aller analysierter Parameter. 0 = keine Korrelation,  $|0.4| - |0.7|$  = schwache Korrelation,  $\geq |0.7|$  = starke Korrelation. \*signifikant ( $p \leq 0.05$ ), \*\* sehr signifikant ( $p \leq 0.01$ ), \*\*\* hoch signifikant ( $p \leq 0.001$ )

## Anhang E    Statistische Auswertung zum Parametergehalt Oberboden/Ausgangsmaterial

Tabelle 14. P-Werte des Kruskal-Wallis Test mit der Fragestellung, ob es einen signifikanten Unterschied vom Parametergehalt gibt, je nachdem ob die Probe aus dem Ober- oder Unterboden stammt. Ein p-Wert < 0.05 zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied gibt.

Parameter	Unterschied Signifikant	p-Wert
Arsen	Ja	0.001
Barium	Ja	0.003
Cadmium	Ja	0.0.013
Chrom	Ja	$2.68 \cdot 10^{-5}$
Gallium	Ja	0.011
Kobalt	Ja	$6.43 \cdot 10^{-5}$
Vanadium	Ja	$3.02 \cdot 10^{-5}$

## *Impressum*

---

### *Herausgeber, Bezugsquelle*

*Amt für Umwelt  
des Kantons Solothurn  
Werkhofstrasse 5  
4509 Solothurn  
Telefon +41 32 627 24 47  
afu@bd.so.ch  
afu.so.ch*

---

### *Projektleitung*

*Stephan Margreth, Amt für Umwelt  
Gaby von Rohr, Amt für Umwelt*

---

### *Bearbeitung Projekt und Bericht*

*Thomas Gasche, Gasche-Bodengutachten GmbH  
Leonie Baumer, Gasche-Bodengutachten GmbH*

---

### *© by*

*Amt für Umwelt 2023*