

Deposition von Luftschadstoffen im Kanton Thurgau

Moosanalysen 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020

Im Auftrag des Amtes für Umwelt des Kantons Thurgau



Autorinnen:

Zaida Ehrenmann, Eva Seitler

November 2021



Impressum

Auftraggeber

Amt für Umwelt, Kanton Thurgau
Verwaltungsgebäude Promenade
Postfach
CH-8510 Frauenfeld

Herr Reto Baumann

Auftragnehmerin

FUB – Forschungsstelle für Umweltbeobachtung AG
Alte Jonastrasse 83
CH - 8640 Rapperswil
fub@fub-ag.ch

Autorinnen:

Zaida Ehrenmann (-Kosonen), Eva Seitler

Dank

Sammlung der Moose:
Aufarbeitung der Moose:
Analytik: Jozef Stefan Institute, Ljubljana, SI:
Schweizerische Vergleichsdaten:
Fotos:

Senta Stix, Norbert Schnyder
Christine Hunziker, Berenice Meier, Senta Stix
Marko Strok und Mitarbeiter
Reto Meier, BAFU
Senta Stix

Titelbild: Impressionen an verschiedenen Standorten im Kt. Thurgau während der Sammlung 2020.

Fotos S. Stix.

Bezug: Amt für Umwelt, Kanton Thurgau

Abkürzungen

Regionale Einteilung

TG	Kanton Thurgau
J	Jura
M	Mittelland
NA	Nordalpen
ZA	Zentralalpen
SA	Südalpen

Moosart

Hc: *Hypnum cupressiforme* Hedw. s.l.

Analytik

TS	Trockensubstanz
ICP-MS	Inductive Coupled Plasma - Mass Spectrometry
SD	Standardabweichung des Einzelwertes
RSD	Relative Standardabweichung in % (Mittelwert = 100 %)
P	Perzentil

Elemente

As	Arsen
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Ni	Nickel
Pb	Blei
V	Vanadium
Zn	Zink

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung.....	3
2.1	Anlass.....	3
2.2	Ziele.....	3
3	Grundlagen.....	4
4	Methodisches	6
4.1	Untersuchte Elemente.....	6
4.2	Verwendete Moosart	6
4.3	Sammelstellen.....	6
4.4	Sammlung der Moose	7
4.5	Aufbereitung, Aufschluss und Analytik.....	7
4.6	Darstellung der Resultate.....	8
4.6.1	Punktearten	8
4.6.2	Tabellen und Boxplots	8
5	Resultate und Diskussion	9
5.1	Darstellung der einzelnen Elemente	9
5.1.1	As - Arsen.....	10
5.1.2	Cd - Cadmium	13
5.1.3	Cr - Chrom.....	17
5.1.4	Cu - Kupfer	20
5.1.5	Ni - Nickel	23
5.1.6	Pb - Blei.....	26
5.1.7	V - Vanadium.....	29
5.1.8	Zn – Zink.....	32
5.2	Abschätzung der Deposition	35
6	Schlussfolgerungen.....	36
7	Literatur.....	37
8	Anhang.....	40
8.1	Geografische Angaben und Werte tabellarisch.....	40
8.1.1	Legende.....	40
8.1.2	Geografische Angaben zu den Standorten	41
8.1.3	Elementkonzentrationen: Einzelwerte	42
8.1.4	Abschätzung der Elementfrachten: Einzelwerte.....	43
8.2	Qualitätskontrolle.....	43
8.2.1	Referenzproben.....	44
8.2.2	Reproduzierbarkeit (Doppelproben)	45
8.2.3	Rückstellproben.....	46

1 Zusammenfassung

Als Schweizer Beitrag zum europäischen Projekt "Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Europe using bryophytes" wurde im Jahr 2020, wie schon 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 und 2015 mit Hilfe von Moosen, als akkumulative Biomonitoren, der atmosphärische Eintrag von verschiedenen Metallen und Halbmetallen in der Schweiz geschätzt. Moose eignen sich für diese Untersuchung, weil sie Wasser, Nährstoffe, aber auch Schadstoffe nicht über Wurzeln, sondern direkt aus der Atmosphäre aufnehmen. Verwendet wurden die Moosarten *Hypnum cupressiforme* (auch im Kt. TG) und *Pleurozium schreberi*.

Im Kanton Thurgau wurden im Februar 2001 sowie im Herbst 2005, 2010, 2015 und 2020 neben „Schweizer Standorten“ dreissig weitere Standorte beprobt. Die Probenahme erfolgte meist im Abstand von mindestens 300 m zu Strassen und Siedlungen, da die emittentenferne Belastung und nicht lokale Spitzenwerte erfasst werden sollen. Pro Standort wurden je fünf Teilproben gesammelt.

Ziel dieser Untersuchung ist es, die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Deposition von Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei, Vanadium und Zink im Kanton Thurgau qualitativ und quantitativ zu schätzen und mit den anderen Regionen der Schweiz sowie Europa zu vergleichen.

Resultate:

- Die Gesamtbelastung (normierte Werte der acht Metalle aufsummiert), zeigt, dass die Unterschiede im Kt. TG mit Ausnahmen nicht gross sind (Abbildung 1).
- As, Cr, V und Zn zeigen seit 2010 einen Anstieg der Konzentration in den beprobten Moosen. Auch 2020 waren die Werte bei diesen Elementen höher als in der Vorperiode 2015.
- Bei Pb ist seit Beginn der Messungen eine Abnahme zu verzeichnen und dies zieht sich auch in der Messperiode 2020 fort.
- Cu weist 2020 Vergleich zur Vorperiode tiefere Konzentrationen auf.
- Cd und Ni scheinen sich auf einem Niveau einzupendeln, wobei bei Ni 2020 eine grössere Varianz in den Messwerten gegenüber der Vorperiode beobachtet werden konnte.
- Werden die Messwerte 1990 mit denjenigen von 2020 verglichen (3 Standorte) sind die Abnahmen zum Teil beträchtlich: Bei As 58 %, Cd 70 %, Ni 43 %, Pb 85 % und V 42 %. Bei diesen Elementen war die Abnahme vor allem zwischen 1990 und 1995 gross. Bei Cu und Zn zeigt sich nach einer Abnahme wieder eine Zunahme, wobei die Werte von 1990 noch nicht erreicht wurden. Bei Cr schwankten die Werte von Periode zu Periode stark, wobei in den letzten Perioden wieder erhöhte Werte gemessen wurden.
- Die aus den Mooskonzentrationen geschätzten Depositionen von Cadmium, Blei und Zink liegen an diesen emittentenfernen Standorten deutlich unter dem LRV-Grenzwert.
- Verglichen mit der restlichen Schweiz sind die Werte im Thurgau in der gleichen Grössenordnung wie die Werte in Jura und Mittelland. In der Schweiz weisen meist die Zentralalpen die tiefsten und die Südalpen die höchsten Werte auf.
- Die relativ günstige „Moos-Methode“ kann sowohl regionale Unterschiede wie auch zeitliche Entwicklungen der Deposition von Metallen gut schätzen. Sie ist damit ein kostengünstiges Mittel für die Erfolgskontrolle von Massnahmen im Umweltschutz.

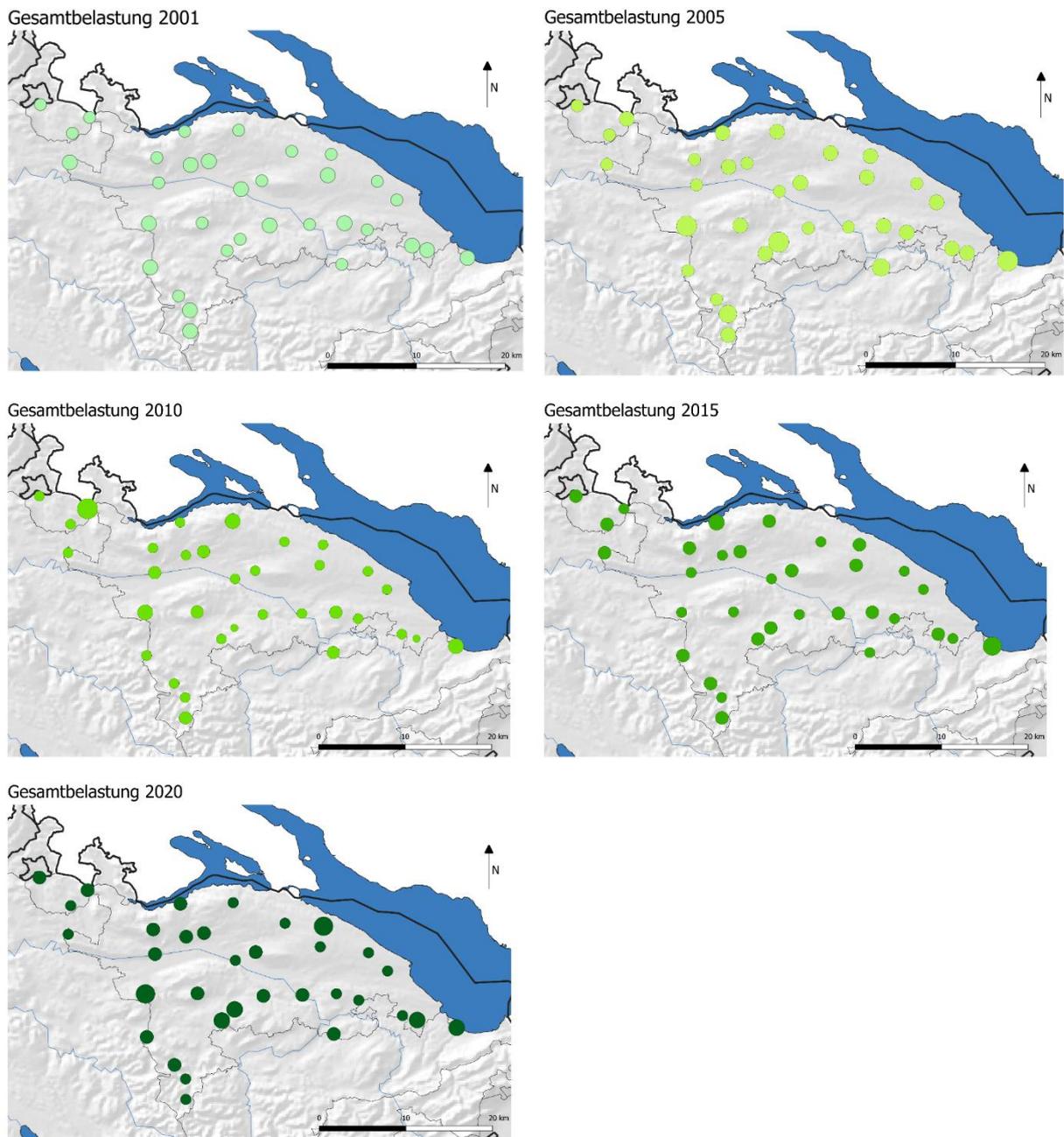


Abbildung 1 Gesamtbelastung pro Periode über alle acht Elemente
Mittelwert der normierten Werte der acht Metalle

2 Einleitung

2.1 Anlass

Erhöhter Eintrag von verschiedenen Elementen in Boden und Grundwasser sowie die daraus resultierende erhöhte Aufnahme in Organismen kann einen negativen Einfluss auf das Wachstum von Pflanzen haben. Zusätzlich kann diese Anreicherung über die Nahrungskette Probleme bei Tier und Mensch verursachen.

Einige Elemente werden bei den heute üblichen industriellen Prozessen nach der Emission meist in relativ kurzen Distanzen wieder deponiert (z.B. Cr und Ni). Andere Elemente werden je nach Emissionsart (Feinstaub, gasförmig) zum Teil über sehr weite Strecken und europaweit grenzübergreifend transportiert. Als Beispiele dafür gelten As, Cd, Pb, Hg und Zn.

Da auch eine langsame Akkumulation in der Biosphäre mit der Zeit Probleme verursachen kann, ist es sinnvoll, die Immissionen auch in emittententfernen Gebieten zu überwachen.

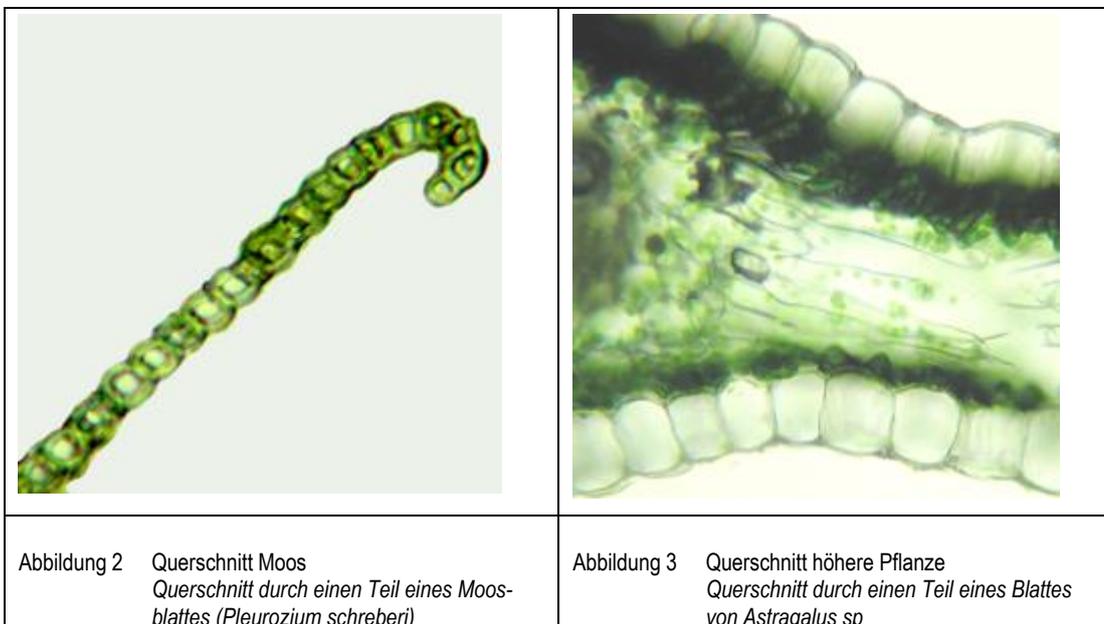
In Skandinavien wird die Überwachung der Schwermetallbelastung aus der Luft mit Hilfe von Moosanalysen seit 1968/69 durchgeführt (Rühling & Tyler 1973, 1984, Gydesen et al. 1983, Steinnes 1985, Rühling et al. 1987). Seit 1990 wird in einem 5-jährlichen Zyklus emittententferne Belastung durch verschiedene Metalle in vielen Ländern Europas mit Hilfe dieser Moostechnik geschätzt und Übersichtskarten erstellt (Rühling 1994, Rühling & Steinnes 1998, Buse et al. 2003, Harmens et al. 2008, 2013 und Frontasyeva 2020), Auch im Jahre 2020 wurde die europäische Studie wiederholt (Berichte in Vorbereitung). Der schweizerische Beitrag dieser Studien wurde 2020 im Auftrag des BAFU durch die Forschungsstelle für Umweltbeobachtung durchgeführt (Schmid-Grob et al. 1993, Thöni 1998, Thöni & Seitler 2004, Thöni et al. 2008, 2013, Thöni & Kosonen 2018). Im Kanton Thurgau wurden im Februar 2001, Oktober 2005, Ende September/Anfang Oktober 2010, Oktober 2015 (Kosonen, Thöni & Seiter 2016, Thöni & Seitler 2001, 2011, Thöni & Matthaei 2006) und August/September 2020 neben den fünf (bis 2010) resp. 3 (2015) „Schweizer Standorten“ dreissig weitere Standorte beprobt.

2.2 Ziele

- Qualitative und quantitative Bestandsaufnahme der regionalen atmosphärischen Deposition von verschiedenen Elementen an emittententfernen Stellen, die repräsentativ für einen weiträumigeren Bereich um die Sammelstelle herum sind.
- Vergleich der Jahre 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020
- Vergleich der Konzentrationen im Kanton Thurgau mit der übrigen Schweiz

3 Grundlagen

Seit Ende der 60er Jahre wurden Moose in sehr vielen Arbeiten in verschiedenen Ländern weltweit erfolgreich zur Überwachung von Schwermetallimmissionen eingesetzt. Da Moose keine Wurzeln und keine Kuticula haben, nehmen sie Wasser, Nährstoffe, aber auch Schadstoffe über die ganze Oberfläche auf. Moose, die fern vom (Mineral-)Boden wachsen, z.B. in Hochmooren oder auf Baumstrünken, sind dadurch praktisch nur von atmosphärischen Einträgen beeinflusst. Die Blättchen der meisten Moosarten sind einzellschichtig (Abbildung 2), was zu einer grossen Oberfläche im Verhältnis zur Masse führt. Diese Eigenschaften führen dazu, dass Moose bei vielen Elementen deutlich höhere Konzentrationen aufweisen als Gefässpflanzen. Letztere nehmen die Nährstoffe fast ausschliesslich über die Wurzeln auf und können dabei selektiv einzelne Ionenarten bevorzugen oder herausfiltern. Der Gehalt an verschiedenen Elementen in der Substanz der Gefässpflanzen kann daher erheblich von demjenigen in der Atmosphäre abweichen. Die Blätter der Gefässpflanzen sind zudem immer mehrzellschichtig (Abbildung 3).



Gegenüber wesentlich aufwendigeren technischen Depositionsmessungen haben die Moose den Vorteil, kostengünstig, retrospektiv und nicht anfällig auf Vandalismus zu sein. Sie haben hingegen den Nachteil, dass die Konzentrationen keine direkten Rückschlüsse auf die Depositionsfracht, welche mit technischen Geräten ermittelt werden, erlauben. Empirische Vergleiche von Konzentrationen in Moosen mit Depositionsfrachten, ermöglichen jedoch eine Schätzung solcher Frachten (Thöni 1996, Berg et al. 1995, Ross 1990, Thöni & Seittler 2004).

In Abbildung 4 sind die Vergleiche zwischen der Deposition gemessen mit technischen Mitteln (z.B. Bergerhoffgerät - Abbildung 5) und der Konzentration in Moosen von Blei, Cadmium, Kupfer und Zink dargestellt. Die Regressionsgleichung erlaubt eine Schätzung der Schwermetalldeposition mit Hilfe der Mooskonzentration. Da Kupfer ein essenzielles Element ist, weisen auch Moose von unbelasteten Standorten einen Wert auf, wobei die «natürliche» Konzentration bei rund 1.6 Mikrogramm pro Gramm Moos liegt. Das gleiche gilt für Zink mit rund 5 Mikrogramm pro Gramm Moos als «natürlichen» Gehalt. Auch Vergleiche mit der Stickstoffdeposition zeigen sehr gute Übereinstimmung (Kosonen et al. 2018).

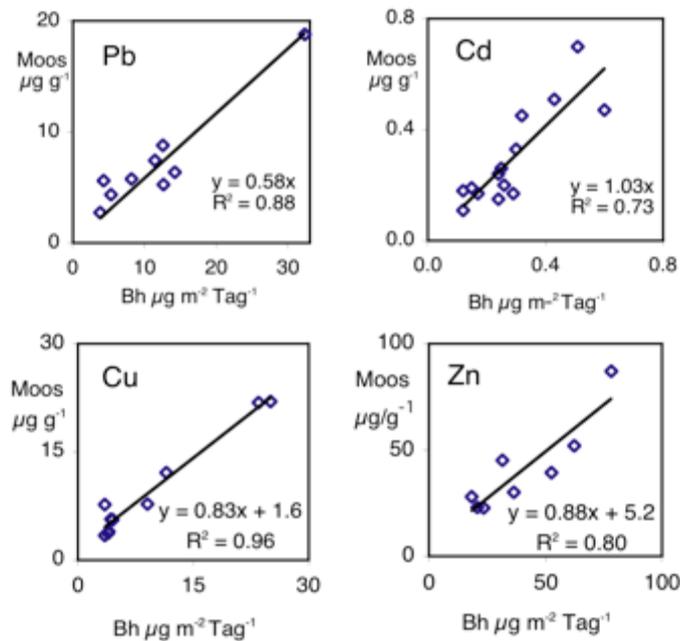


Abbildung 4 Vergleich Mooskonzentrationen - Depositionsmessungen
Die Deposition wurde mit technischen Mitteln wie z.B. der Bergerhoff-Methode gemessen und mit den Konzentrationen in Moosen verglichen. Aus der Regressionsgeraden ergibt sich die Schätzung der Schwermetalldeposition mit Hilfe der Mooskonzentrationen.



Abbildung 5 Bergerhoffgerät
Aus dem nach der Bergerhoff-Methode gemessenen Depositionsstaub wurde die Schwermetallkonzentration bestimmt.

Die Variabilität der Konzentration eines Elementes im Moos kann gross sein; gesicherte Aussagen bezüglich Standortunterschieden und zeitlichen Veränderungen sind nur bei erheblichen Konzentrationsunterschieden möglich. Jedoch muss hier erwähnt werden, dass auch die technischen Messsysteme wie die Bergerhoff-Methode nur Näherungswerte und nicht die wahren Werte liefern können.

4 Methodisches

4.1 Untersuchte Elemente

In den Moosproben wurden die Elemente Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei, Vanadium und Zink mit ICP-MS gemessen.

4.2 Verwendete Moosart

Für das Biomonitoring von atmosphärisch eingetragenen Elementen müssen geeignete Moosarten im Untersuchungsgebiet verbreitet sein und häufig an Stellen vorkommen, die den europäischen Richtlinien für emittentenferne Standorte (siehe unten) entsprechen. Wichtig ist auch, dass die Moose im Feld leicht zu erkennen sind. Als Hauptart wird europaweit *Pleurozium schreberi* (Ps) empfohlen. Dieses Moos ist jedoch vor allem im Mittelland selten, darum wurde im Kanton Thurgau auf die Ersatzart *Hypnum cupressiforme* (Hc) zurückgegriffen

Hypnum cupressiforme ist ein im Feld gut kenntliches, weit verbreitetes und häufiges Moos (Abbildung 6). Es ist sowohl im Mittelland wie auch in den Alpen zu finden. Es wächst in dichten Polstern auf Totholz und lebenden Stämmen (epiphytisch), aber auch am Boden, an Felsen und Mauern, hauptsächlich in Wäldern, in höheren Lagen aber auch in offenen Biotopen. Für diese Untersuchung wurden nur Moospflanzen von Totholz (meist Strünken) verwendet, die in offenen Stellen (z.B. Verjüngungsflächen) wuchsen. Damit wurde der Einfluss von Erde/Stein bzw. von Traufe/Stammabfluss so gut wie möglich vermieden.



Abbildung 6 Die verwendete Moosart zur Biomonitoring im Kt. Thurgau: *Hypnum cupressiforme* Hedw. s.l. (Hc)

4.3 Sammelstellen

Die Sammelstellen wurden möglichst gleichmässig über den Kanton Thurgau verteilt und befanden sich vorwiegend in Verjüngungsflächen in Wäldern. Als Sammelorte kommen in der Schweiz nur offene Stellen in Wäldern, Hochmooren und Weiden in Frage. Die europäischen Bedingungen für emittentenferne Standorte, die auch für die Thurgauer Untersuchung berücksichtigt wurden, sind folgende:

- offene Standorte, Moose nicht von der Kronentraufe beeinflusst

- kein Dünger- und Biozideintrag
- mindestens 300 m von Hauptstrassen und Siedlungen entfernt
- mindestens 100 m von kleinen Strassen und Einzelhäusern entfernt

Im Anhang 8.1.2 sind die Standorte aufgelistet und aus Abbildung 7 ist deren Lage ersichtlich. Es wurde, wenn immer möglich, der gleiche Standort beprobt wie 2000/2001, 2005, 2010 und 2015. Da meist in Verjüngungsflächen gesammelt wurde, die mit den Jahren wieder zuwachsen, hatte sich der Standort zum Teil verschoben. In der Tabelle im Anhang 8.1.2 sind die Standorte, die gleich waren mit „1“, jene in der Nähe und in etwa gleicher Distanz zu möglichen Schadstoffquellen mit „±1“ und diejenigen, die relativ weit voneinander entfernt waren mit „2“ bezeichnet.

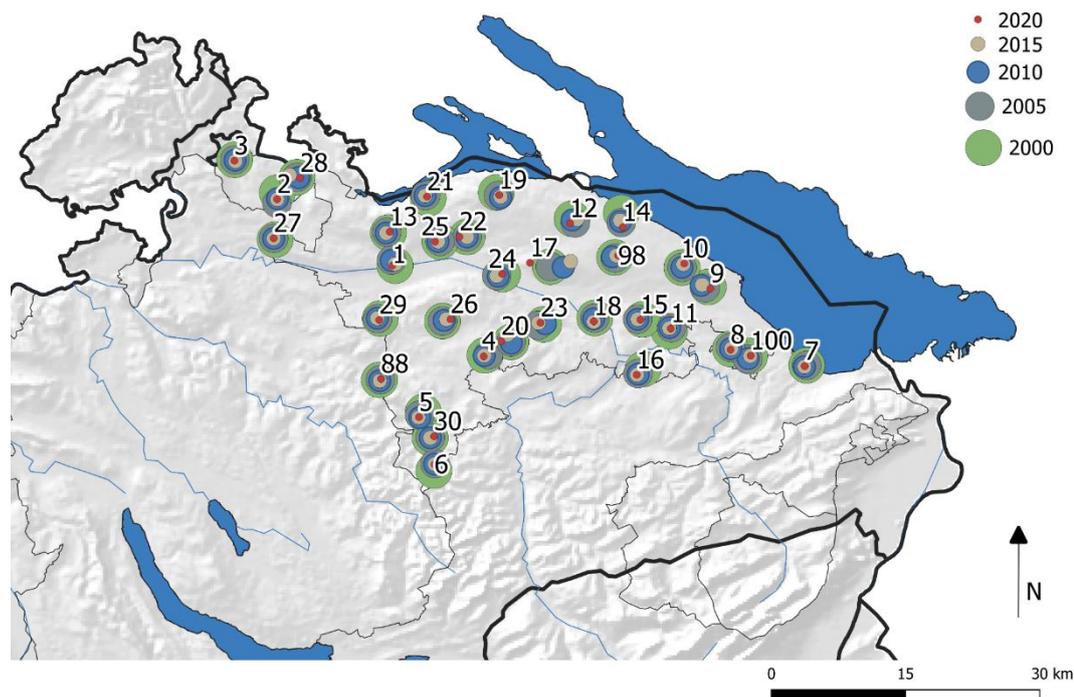


Abbildung 7 **Sammelstandorte**
Lage und Nummerierung der Sammelorte im Kanton Thurgau. Die Nummern 1-30 betreffen die kanton-interne Untersuchung, die Standorte 88, 98 und 100 stehen für die Standorte innerhalb der Schweizer Untersuchung

4.4 **Sammlung der Moose**

Fünf unabhängige, etwa handgrosse Moospolster von Hc wurden mit Polyethylen-Handschuhen aufgesammelt, je einzeln in Polyethylen-Beutel gefüllt und bis zur Aufarbeitung bei -18°C gelagert. Die erste Sammlung erfolgte im Winter 2001 (die Proben der Schweizer Untersuchung im Herbst 2000), die nächsten drei jeweils im Herbst 2005, 2010, 2015 resp. 2020.

4.5 **Aufbereitung, Aufschluss und Analytik**

Alle Instrumente und Gefässe wurden mit 0.1 mol l-1 resp. 1 mol l-1 HNO₃ p.a. und Reinstwasser (18,2 MΩ·cm) gereinigt. Die Moose wurden nur mit Polyethylen-Handschuhen und -Pinzetten berührt.

Die Proben wurden von allen "Verunreinigungen" (Tannennadeln usw.) gesäubert. Für die Weiterverarbeitung wurde nur der Zuwachs der letzten drei Jahre berücksichtigt, d.h. die Werte wurden aus Moosprösschen ermittelt, die von 1998 bis 2000, 2003 bis 2005, 2008 bis 2010, 2013 bis 2015 resp. 2017 bis 2020 gewachsen sind. Die aufbereiteten Proben wurden während mindestens 48 Stunden bei 40°C im Umluftofen getrocknet und mit flüssigem Stickstoff homogenisiert. Der Aufschluss der Proben

erfolgte mittels HNO₃ 65% Ultrapur im Mikrowellen-Aufschlussgerät (Milestone) und die Analytik mit ICP-QQQ (Agilent 8800). Aufschluss und Analytik wurden durch das Laboratorium des „Department of Environmental Science Institute Jozef Stefan“, Ljubljana, Slowenien durchgeführt. Im gleichen Labor wurden auch die slowenischen Moosproben der europäischen Untersuchung analysiert (Qualitätssicherung siehe Anhang 8.2).

4.6 Darstellung der Resultate

Die Daten werden mit Hilfe von Punktekarten, Balkendiagrammen, Boxplots, Tabellen und Excel Grafiken dargestellt.

4.6.1 Punktekarten

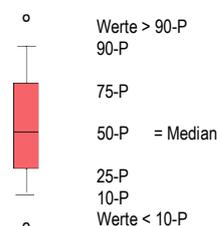
Punktekarten werden für die Darstellung der Gesamtbelastung verwendet und wurden mit QGIS 3.4 erstellt. In die Gesamtbelastung des Kantons Thurgau wurden die Messwerte der acht Schwermetalle miteinbezogen und pro Periode betrachtet. Um die einzelnen Elemente als Summe betrachten zu können, wurden alle einzelnen Elementwerte gegen 1 normiert (Norm-1-Wert). Dazu wurde jeder Elementwert mit dem gemittelten Median der vier Messperioden (pro Element) dividiert. Anschliessend wurden die Norm-1-Werte mit dem geometrischen Mittel jedes Elementes (Produkt aller Daten über Anzahl Messwerte) dividiert. Für die Gesamtbelastung pro Periode wurden die genormten Werte der acht Elemente gemittelt. Die Punktekarten pro Standort und Jahr wurden mit diesen Werten der Gesamtbelastung erstellt. Die Gesamtbelastungen werden als Kreise, deren Fläche proportional zu der Konzentration im Moos ist, in einer Karte des Thurgaus dargestellt (mit dreissig Proben aus der Thurgauer Spezialuntersuchung und drei Proben aus der Schweizer Untersuchung).

4.6.2 Karten mit Balkendiagrammen

Karten mit Balkendiagrammen wurden mit QGIS 3.4 erstellt. Die Konzentrationen der verschiedenen Elemente im Moos wird pro Jahr als Balken angezeigt in einer Karte des Thurgaus dargestellt (mit dreissig Proben aus der Thurgauer Spezialuntersuchung und drei Proben aus der Schweizer Untersuchung). Die Höhe der Balken entspricht der Schwermetallkonzentration im Moos, wobei die Höhe der Balken auf den Maximalwert pro Element während aller Perioden skaliert wurde.

4.6.3 Tabellen und Boxplots

Der Vergleich mit den Resultaten in der übrigen Schweiz wird mit Hilfe von Tabellen dargestellt in denen die Maximalwerte, 90er-, 50er- (Median), und 10er-Perzentile und Minimalwerte, sowie Mittelwerte aufgelistet sind. Aus diesen Tabellen wurden mit dem Datenbank Programm Filemaker Pro Advanced 18 und dem Plugin xm-Chart 5.0 Boxplot-Diagramme erstellt, um die Daten besser zu veranschaulichen. Dabei sind unter TG nur die dreissig in der Spezialuntersuchung ermittelten Werte berücksichtigt, die drei Standorte aus der Schweizer Untersuchung sind unter Mittelland verrechnet. Im Mittelland wurden 19, im Jura 12, in den Nordalpen 16, Zentral- und Südalpen 13 Standorte beprobt.



5 Resultate und Diskussion

5.1 Darstellung der einzelnen Elemente

Im Folgenden wird jedes berücksichtigte Element beschrieben und anschliessend die Resultate dargestellt sowie kommentiert. Die einzelnen Messwerte befinden sich in der Tabelle im Anhang 8.1.3. Die Konzentrationen im Moos beziehen sich immer auf die Trockensubstanz bei 40 °C.

Beschreibung der Elemente

Als erstes werden bei jedem Element Vorkommen, Gewinnung und Verwendung, die Emissionssituation sowie die Toxizität und Grenzwerte beschrieben, soweit Angaben gefunden wurden. Die Angaben über den Gehalt in der Erdkruste schwanken z.T. von Quelle zu Quelle. In diesem Bericht werden diejenigen von Rösler und Lange (1975) verwendet. Für die Abschätzung der Emissionssituation wurde auch der Gehalt im Depositionsstaub, der in einer Vorstudie ermittelt wurde, mit dem Gehalt in der Erdkruste verglichen (Thöni et al. 1998). In der Vorstudie wurden Depositionsstaub nach der Bergerhoffmethode im Hagenmoos bei Kappel am Albis (Kt. ZH), auf dem Zugerberg (Kt. ZG) und oberhalb Personico in der Leventina (Kt. TI) analysiert. Ist die Konzentration im Staub deutlich geringer als in der Erdkruste, kann davon ausgegangen werden, dass anthropogene Immissionen praktisch fehlen. Gleich hohe Konzentrationen im Depositionsstaub und in der Erdkruste sind generell nicht zu erwarten. Dies weil der Depositionsstaub hauptsächlich anthropogen bedingte, ionische Bestandteile (Ammonium, Nitrat, Sulfat) sowie auch organisches Material enthält.

Tabellen und Boxplots

Vergleich der vier Messperioden untereinander und mit der übrigen Schweiz

Entwicklung seit 1990 (Excel Grafik)

Bei den drei Standorten aus der Schweizer Untersuchung kann die Entwicklung seit 1990 betrachtet werden.

5.1.1 As - Arsen

Atommasse 74.9 u, Dichte 5.73 g cm⁻¹, Halbmetall

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Arsen kommt in der Erdkruste in einer durchschnittlichen Konzentration von ca. 1.7 g t⁻¹ vor. Gewonnen wird es in der Form von Arsenitoxid als Nebenprodukt bei der Verhüttung von Cu-, Pb-, Sn-, Zn- und Ni-Erzen. Die Weltjahresproduktion von Arsen betrug 2019 ungefähr 32'300 t (U.S. Geological Survey 2021).

Aufgrund ihrer Toxizität und ihrer krebserregenden Wirkung sind Arsenverbindungen heute fast nur noch als Holzschutzmittel und in der Glasherstellung (Bildschirmröhren, Lichtwellenleiter, Läuterung von Bleiglas) zulässig. Daneben findet metallisches Arsen als Legierungsbestandteil zur Erhöhung der Härte und der Giessbarkeit von Blei- und Kupferlegierungen Verwendung. Ultrareines Arsen wird in der Halbleiterindustrie sowie in der Herstellung von Hochfrequenzelementen wie Leuchtdioden und Laserdioden benötigt. Die in der Vergangenheit als Herbizide, Insektizide, Fungizide und Malpigmente verwendeten Arsenverbindungen sind seit Jahren verboten.

Emissionssituation

Die Hauptquellen für Arsen in der Luft sind die Verhüttung von Nickel- und Kupfer-Erzen, der Verbrauch fossiler Brennstoffe (Arsen-Gehalt von Braunkohle bis 1'500 mg kg⁻¹, durchschnittlich 18 mg kg⁻¹), die metallverarbeitende Industrie, die Landwirtschaft und die Aktivität von Vulkanen. Die globalen anthropogenen Emissionen wurden 2012 auf 24'000 t Jahr⁻¹, die natürlichen auf 7'900 Tonnen Jahr⁻¹ (IARC-Monographs 2012). Der überwiegende Anteil von anthropogenen Quellen bei den Immissionen zeigte sich auch dadurch, dass Arsen im Depositionsstaub nach Bergerhoff 3 bis 7 x konzentrierter war als in der Erdkruste (Thöni et al. 1999). Der Verlauf der Emissionen in den letzten Jahrzehnten für Deutschland zum Beispiel sieht wie folgt aus: Ende der neunziger Jahre betragen die Arsen Emissionen um 80 t Jahr⁻¹, 2000 um 5.7 t Jahr⁻¹, 2010 um 5.2 t Jahr⁻¹ (EMEP/CEIP 2014). Europaweit wurden die Emissionen für 2000 auf 763 t Jahr⁻¹ geschätzt (Pacyna et al. 2007) wobei die Schweiz einen Beitrag von ca. 0.8 t Jahr⁻¹ leistet (Hettelingh et al. 2006).

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Arsen wird von den Gefässpflanzen vor allem in den Wurzeln akkumuliert, da Pflanzen im Normalfall in der Lage sind Arsen in den Wurzeln zurückzuhalten. Wird Arsen an der Wurzel akkumuliert, hemmt es das Wachstum sowie die Ausbreitung der Wurzeln. Kann eine Pflanze das Arsen nicht in der Wurzel zurückbehalten und wird es in andere Gewebe der Pflanze transportiert, führt Arsen zu vermindertem Wachstum, reduzierter Reproduktion und bei hohen Konzentrationen zum Tod einer Pflanze (Garg & Singla 2011).

Tiere und Mensch: Arsen wirkt kanzerogen, teratogen und vermutlich auch mutagen. Chronische Belastungen mit arsenhaltigen Stäuben rufen schwere hämatologische und neurologische Krankheitsbilder hervor (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen	1 mg m ⁻³
	- Einleitung in Gewässer	0.1 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Grenzwert Trinkwasser	0.01 mg l ⁻¹

Resultate und Diskussion

In Abbildung 8 sind die Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020 mittels einer Karte inkl. Balkendiagramme, in Abbildung 9 und Tabelle 1 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt. Einzelne hohe Werte können durch auf den Moosen abgelagerten, nicht sichtbaren Staub bedingt sein. Der Standort TG7, ganz im Osten des Kantons liegt nahe einer Industrieanlage.

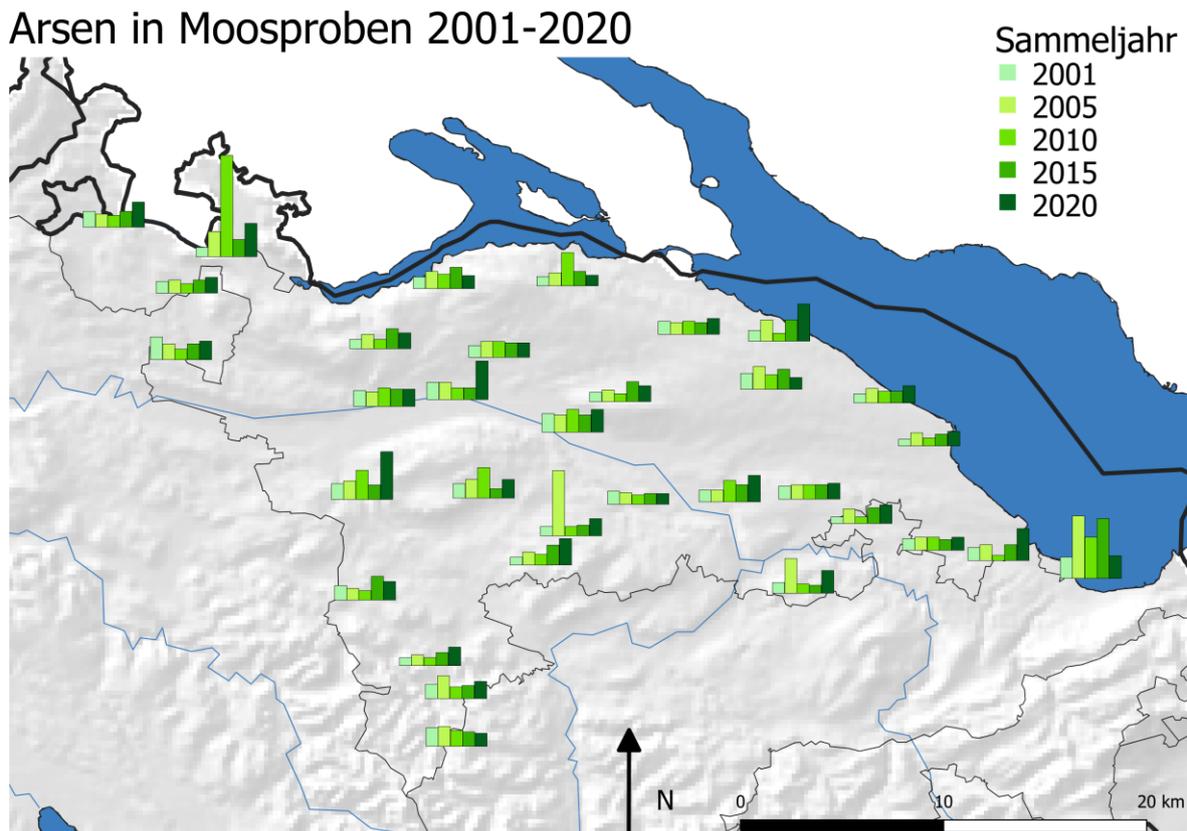


Abbildung 8 Balkendiagramme der Arsenkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020 Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2010 gemessen und beträgt $0.76 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Arsen im Kanton Thurgau im Jahr 2020 sind im gesamtschweizerischen Vergleich ähnlich den Werten wie im Jura und im Mittelland. Nord- und Zentralalpen zeigen leicht tiefere Werte, die Südalpen hingegen höhere Konzentrationen.

Nach einem leichten Anstieg der Arsen-Konzentration im Jahr 2005 gegenüber 2000/01 ist die Konzentration 2010 im Moos wieder auf ein ähnliches Niveau gesunken wie 2000/01. Seit 2010 ist hingegen wieder ein Anstieg im Kt. Thurgau zu verzeichnen.

Zum Vergleich der Konzentrationsentwicklung sind in Abbildung 10 die Werte im Kt. Thurgau dargestellt, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden. Es zeigte sich zwischen 1990 und 1995 eine starke Minderung der Konzentrationen; anschliessend waren keine markanten Veränderungen mehr zu verzeichnen, wobei die Konzentration an diesen Standorten zwar tendenziell wieder etwas anstieg aber ohne den erhöhten Wert bei M100 eher auf einem stabilen Niveau einzupendeln würde. Der Rückgang in den 1990er Jahren kann möglicherweise auf das Verbot von arsenhaltigen Bioziden und Malpigmenten, sowie auf den Wandel im ehemaligen Ostblock zurückgeführt werden.

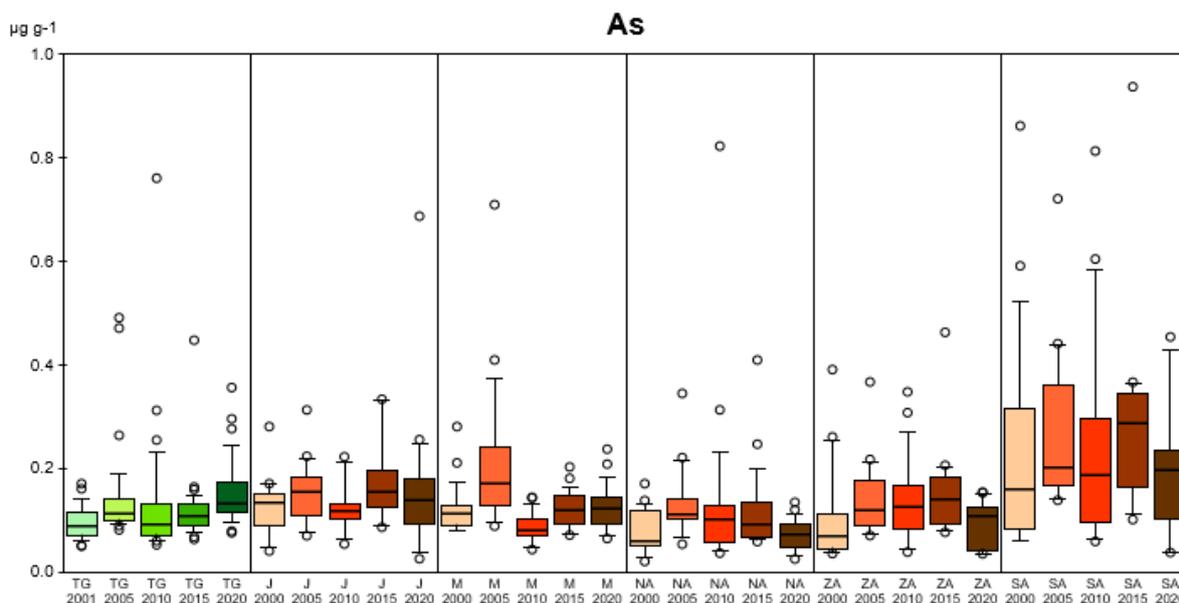


Abbildung 9 Arsen: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 1 Arsen: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

As µg g ⁻¹	TG					M					J					NA					ZA					SA				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz. Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	0.17	0.49	0.76	0.45	0.36	0.69	4.14	0.14	0.20	0.24	0.28	0.31	1.64	1.48	0.69	0.14	0.34	0.82	0.41	0.13	0.39	0.37	0.35	0.15	0.15	0.86	0.72	0.81	0.94	4.30
90-P	0.14	0.20	0.23	0.15	0.25	0.22	0.47	0.13	0.17	0.18	0.17	0.24	0.22	0.33	0.25	0.13	0.18	0.25	0.21	0.11	0.26	0.21	0.28	0.20	0.15	0.56	0.44	0.59	0.36	0.44
Median	0.09	0.11	0.09	0.11	0.13	0.12	0.17	0.08	0.12	0.12	0.14	0.18	0.12	0.15	0.14	0.06	0.11	0.09	0.09	0.07	0.07	0.13	0.12	0.14	0.11	0.16	0.20	0.19	0.28	0.19
10-P	0.06	0.09	0.06	0.08	0.10	0.09	0.10	0.06	0.08	0.09	0.07	0.10	0.10	0.11	0.08	0.03	0.08	0.04	0.06	0.04	0.04	0.09	0.06	0.08	0.04	0.06	0.16	0.08	0.14	0.05
Min	0.05	0.08	0.05	0.06	0.08	0.03	0.09	0.04	0.07	0.06	0.04	0.07	0.05	0.09	0.03	0.02	0.05	0.04	0.06	0.02	0.04	0.07	0.04	0.08	0.03	0.06	0.14	0.06	0.10	0.04
Mittelwert	0.10	0.15	0.14	0.12	0.15	0.11	0.43	0.09	0.12	0.13	0.14	0.17	0.25	0.28	0.18	0.08	0.13	0.15	0.12	0.07	0.12	0.15	0.15	0.16	0.10	0.27	0.29	0.27	0.30	0.50

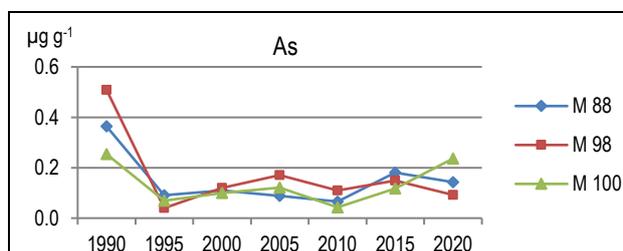


Abbildung 10 Arsen: 1990 bis 2020
Verlauf der Arsen Messwerte an den 3 Stand-orten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.2 Cd - Cadmium

Atommasse 112.4 u, Dichte 8.65 g cm⁻¹

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Der Cadmium-Gehalt der Erdkruste wird auf durchschnittlich 0.13 g t⁻¹ geschätzt. Reine Cadmiumminerale sind selten, im Allgemeinen kommt Cadmium in der Natur im Verbund mit Zink vor. Es wird zu über 95 % aus Nebenprodukten der Zinkverhüttung gewonnen (Stoeppler, 1991). Die Weltjahresproduktion von Cadmium betrug 2019 ungefähr 24'400 t (U.S. Geological Survey 2021).

Cadmium wird aufgrund seiner Korrosionsfestigkeit für die Plattierung von Stahlteilen für den Schiffs- und Fahrzeugbau und wegen seiner härtenden Wirkung als Legierungsbestandteil verwendet. Als Verbindung kommt Cadmium aufgrund seiner schönen gelben Farbe und der hohen Deckkraft beim Färben von Kunststoffen und als Pigment von Anstrichfarben und in Ni-Cd-Akkumulatoren in Einsatz. Daneben findet Cadmium auch in der Herstellung von Photozellen und als Neutronenabsorber in der Kernenergietechnik Verwendung. Die Verwendung von Cadmium ist rückläufig, da es aufgrund seiner Toxizität seit den achtziger Jahren in den Anwendungsbereichen, in welchen es in die Umwelt gelangen kann (Korrosionsschutz, Legierungen, Pigmente, Kunststoffe), zunehmend durch weniger giftige Alternativen ersetzt wurde (Trueb 1996).

Emissionssituation

Cadmium gelangt teilweise über Klärschlamm, Dünger (Phosphat), Kehrlicht und Schlacken aus Hüttenbetrieben und Kohlekraftwerken direkt in den Boden. In die Atmosphäre wird Cadmium durch Verbrennungsprozesse (fossile Brennstoffe, Kehrlicht, Klärschlamm) und durch die metallproduzierende und -verarbeitende Industrie eingetragen. In der Atmosphäre findet man Cadmium vor allem in kleinen, lungengängigen Aerosolen. Diese können über grosse Distanzen transportiert werden.

Die globalen Cadmium-Emissionen wurden in den achtziger Jahren auf 7'500 t Jahr⁻¹ geschätzt, in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre auf 3'000 t Jahr⁻¹ (Pacyna et al. 2002), wovon 3 t natürlichen Ursprungs sind (Lantzy & Mackenzie 1979). Diese sehr hohen anthropogen bedingten Emissionen zeigten sich auch in der Studie von Thöni et al. (1999). Cadmium war im Depositionsstaub 33 bis 69 x konzentrierter als in der Erdkruste. Die europäischen Emissionen fielen von 900 t im Jahr 1990 auf 360 t in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre. Im Jahre 2000 wurde die europäische Emission auf 377 t Jahr⁻¹ geschätzt (Hettelingh et al. 2006).

In der Schweiz stammten die Cadmium-Emissionen in der Atmosphäre zum grössten Teil aus der Metallindustrie und den Kehrlichtverbrennungsanlagen. Der Höchststand wurde mit rund 7'000 kg Jahr⁻¹ zwischen 1965 und 1970 verzeichnet. Dank emissionsmindernden Massnahmen vor allem im Bereich der Abfallverbrennung (1990 – 2003) und Sanierungen von Stahlwerken (1999) sanken die Emissionen bis 2003 (1990: 3.4 t, 2000: 1.8 t) und blieben seither stagnierend (2005: 0.7 t, 2019: 0.69 t) (FOEN 2021).

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Cadmium kann von den meisten Kulturpflanzen (und Wildpilzen) in relativ grossen Mengen aufgenommen und akkumuliert werden. Cadmium-Toxizität bei Pflanzen zeigt sich in gehemmtem Wachstum mit z.T. chlorotischen Flecken und Verfärbungen der Blätter. Bei hohen Cadmiumgehalten (je nach Pflanzenart stark unterschiedlich) treten an den älteren Blättern Nekrosen auf und die Pflanzen sterben ab (Bergmann 1988).

Tiere und Mensch: Cadmium ist für Mensch und Tier bereits in sehr geringen Mengen toxisch. Die toxische Wirkung beruht auf der Hemmung schwefelhaltiger Enzyme sowie der Substitution des Zinks in zinkhaltigen Proteinen. Akute Vergiftungen (Itai-Itai Krankheit, Japan 1960: 100 Tote) führen zu Schmerzen in Rückenwirbeln und Gelenken, zu Erbrechen, Durchfall, Lungenödemen, Nierenversagen und Herzgefässverengungen. Bei chronischen Belastungen mit Cadmium beobachtet man Knochenmarkschädigungen und Osteoporose (Cadmium-bedingte Calciumverarmung) sowie Bluthochdruck und Nierenschädigungen. Darüber hinaus wird Cadmium bei inhalativer Exposition auch eine kanzerogene Wirkung nachgesagt (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen	0.01 mg m ⁻³
	- Immissionsgrenzwerte:	
	Schwebestaub (PM10) (Jahresmittelwert)	1.5 ng m ⁻³
	Staubniederschlag (Jahresmittelwert)	2 µg m ⁻² Tag ⁻¹
	- Kompost bei biologischer Landwirtschaft	0.7 mg kg ⁻¹ TS
	- Bodenrichtwert (Totalgehalt)	0.8 mg kg ⁻¹ TS
	- Qualitätsziel oberirdische Gewässer	0.2 µg l ⁻¹ (gesamt)
	- Einleitung in Gewässer	0.1 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Grenzwert Trinkwasser	0.003 mg l ⁻¹

Resultate und Diskussion

Abbildung 11 zeigt in Karten dargestellt die Cd-Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020, in Abbildung 12 und in Tabelle 2 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt.

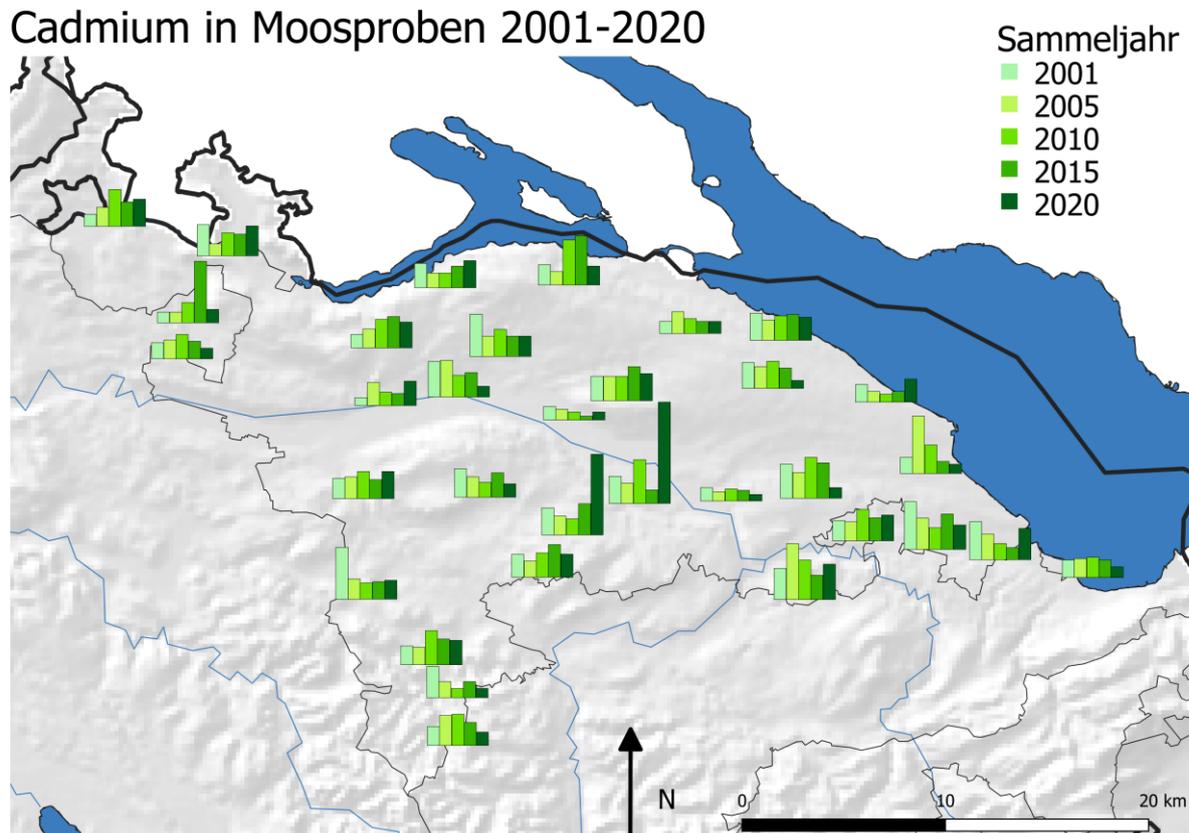


Abbildung 11 Balkendiagramme der Cadmiumkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020

Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2021 gemessen und beträgt $0.74 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Cadmium im Kanton Thurgau sind im Jahr 2020 ähnlich wie diejenigen des Juras, des ganzen Mittellandes und der Südalpen. Nordalpen, und vor allem Zentralalpen zeigen niedrigere Konzentrationen.

Während in der übrigen Schweiz die Cadmium-Konzentrationen seit 2000 abgenommen haben, blieben sie im Kanton Thurgau zwischen 2001 und 2005 etwa gleich und stabilisierten sich 2010 bis 2020 auf einem etwas höherem Niveau gegenüber den ersten zwei Perioden.

An den 3 Standorten im Thurgau, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden, zeigte sich zwischen 1990 und 1995 eine Abnahme, vor allem stark beim Standort M 88 (Abbildung 13); anschliessend wird ein tendenzieller Rückgang mit einer Stabilisierung der Konzentrationen verzeichnet. Grundsätzlich kann der Rückgang vor allem auf die Sanierung der KVAs und Anlagen der Metallindustrie zurückgeführt werden.

Aufgrund der Mooskonzentration wurden Abschätzungen gemacht, wie hoch die Cadmium Deposition im Kanton Thurgau an quellenfernen Standorten ist (Tabelle 9). Die geschätzten Werte liegen unter dem LRV-Grenzwert (siehe auch Kapitel 5.2).

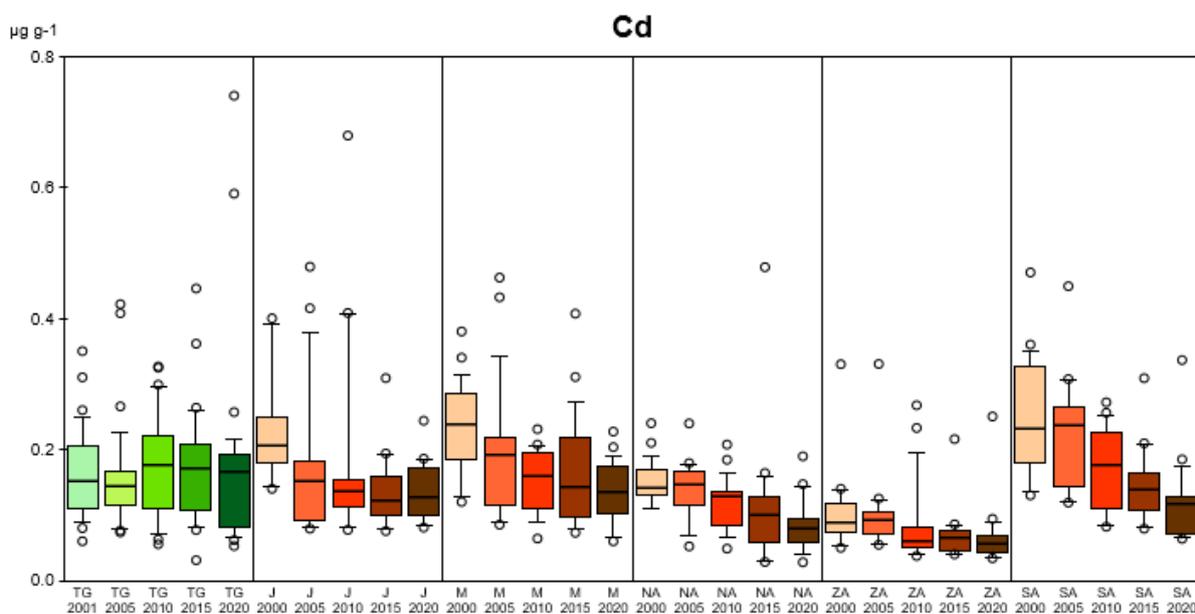


Abbildung 12 Cadmium: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 2 Cadmium: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

Cd µg g ⁻¹	TG					M					J					NA					ZA					SA				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	0.35	0.42	0.33	0.45	0.74	0.38	0.46	0.23	0.41	0.23	1.53	0.48	0.68	0.31	0.24	0.24	0.24	0.21	0.48	0.19	0.33	0.33	0.27	0.22	0.25	0.47	0.45	0.27	0.31	0.34
90-P	0.25	0.23	0.29	0.26	0.22	0.26	0.35	0.20	0.28	0.19	0.40	0.40	0.41	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16	0.14	0.14	0.19	0.21	0.08	0.09	0.35	0.31	0.25	0.21	0.18
Median	0.15	0.14	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19	0.16	0.14	0.14	0.21	0.15	0.13	0.12	0.13	0.14	0.15	0.12	0.10	0.08	0.09	0.09	0.06	0.07	0.05	0.23	0.25	0.18	0.14	0.12
10-P	0.09	0.08	0.09	0.09	0.07	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.15	0.09	0.10	0.09	0.09	0.11	0.08	0.08	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.16	0.13	0.09	0.09	0.07
Min	0.06	0.07	0.06	0.03	0.05	0.08	0.09	0.06	0.07	0.06	0.14	0.08	0.08	0.08	0.08	0.11	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.13	0.12	0.08	0.08	0.06
Mittelwert	0.17	0.16	0.18	0.18	0.18	0.23	0.20	0.15	0.17	0.14	0.34	0.19	0.21	0.14	0.14	0.15	0.14	0.12	0.12	0.09	0.11	0.12	0.09	0.08	0.07	0.26	0.24	0.18	0.15	0.13

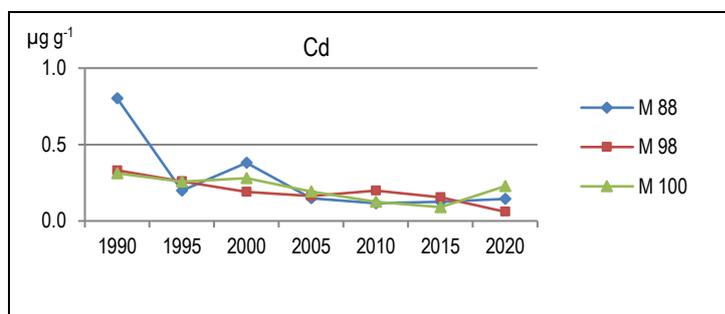


Abbildung 13 Cadmium: 1990 bis 2020
Verlauf der Cadmium Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.3 Cr - Chrom

Atommasse 52.0 u, Dichte 7.18 g cm⁻¹

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Mit einem Gehalt von 83 g t⁻¹ gehört Chrom zu den häufigeren Elementen in der Erdkruste. Es wird aus dem einzigen Chromerz von wirtschaftlicher Bedeutung gewonnen, dem Chromit oder Chromeisenstein. 2019 wurden weltweit ungefähr 44.8 Mio. t Chrom gefördert und verarbeitet (U.S. Geological Survey 2021).

Chrom ist Bestandteil der Edelstähle und vieler Speziallegierungen zur Herstellung hochfester Metallteile. Nichtrostende Chromnickelstähle finden vielfältige Verwendung im Bauwesen, in der chemischen Industrie, in der Lebensmittelindustrie, im Haushalt sowie im Fahrzeug- und Flugzeugbau. Chromsalze spielen als Farbpigmente, zum Gerben von Lederwaren und als Holzimprägniermittel eine wichtige Rolle. Chromate und Chromdioxid dienen als Katalysatoren in chemischen Prozessen. In Tonband- und Videokassetten wurde das ferromagnetische Chromdioxid als Ton- bzw. Bildträger eingesetzt. Flaschenglas wird mit Chromtrioxid grün gefärbt (Trueb 1996).

Emissionssituation

Der grösste Chromverbraucher und zugleich der wichtigste Chrom-Emittent ist die Metallindustrie. Emissionen gehen in die Luft (Staub) und ins Abwasser. Chrom aus Pigmenten, Lederartikeln und Ton- bzw. Videobändern gelangt beim Beseitigen via Kehrlichtverbrennungsanlagen in die Umwelt (Schmid-Grob et al. 1993). Eine unterschätzte Quelle könnten Cr(VI)-Emissionen aus Zement (Beton) sein. Nach gängiger Auffassung kommt es beim Brennen des Zementklinkers aufgrund des Sauerstoffgehaltes im Ofen zu Bildung des sehr giftigen Chromats aus Cr(III), das in den Ausgangsmaterialien vorliegt (VDZ 1999). Die anthropogenen Chrom-Emissionen wurden 1983 weltweit auf 30'000 t Jahr⁻¹, 1995 auf 15'000 t Jahr⁻¹ geschätzt (Pacyna & Pacyna 2001), die natürlichen auf 58'400 t Jahr⁻¹ (Lantzy & Mackenzie 1979). Der höhere Anteil von natürlichen Quellen bei den Immissionen zeigte sich auch im Depositionsstaub nach Bergerhoff, bei dem Chrom zwar in geringerer Konzentration auftrat als in der Erdkruste (0.1 bis 0.9 x), aber in höherer als z.B. bei Aluminium (Thöni et al. 1999). Für Europa wurde für das Jahr 2000 eine Emission von 2'350 t Jahr⁻¹ geschätzt (Pacyna & Pacyna 2001), wovon für die Schweiz ein Emissionsbeitrag von 3.5 t geschätzt wurde (Hettelingh et al. 2006).

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Chrom wird im Boden stark absorbiert und ist für Pflanzen nur in sehr geringem Masse verfügbar. Eine toxische Wirkung von Chrom auf Pflanzen konnte nur in Nährlösungsversuchen, nicht aber in der Praxis beobachtet werden (Scheffer & Schachtschabel 1984).

Tiere und Mensch: Für Mensch und Tier stellt Chrom ein essenzielles Element dar. Dabei spielt dreiwertiges Chrom v.a. im Glucose-Stoffwechsel durch Förderung der Insulin-Wirkung als "Glucose-Toleranz-Faktor" eine wesentliche Rolle. Toxische Wirkungen von Cr(III)-Verbindungen und metallischem Chrom sind nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Im Gegensatz dazu können Cr(VI)-Verbindungen akute und chronische Toxizität auslösen. Chromate und Dichromate können Hautschädigungen bewirken, z.B. bei der Verarbeitung von Zement. Belastungen des Atemsystems durch Chromsäuredämpfe oder Chromstaub können zu Bronchialkrebs führen (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen	5 mg Cr ges. m ⁻³ 1 mg Cr (VI) m ⁻³ -
	- Bodenrichtwert (Totalgehalt)	50 mg kg ⁻¹ TS
	- Qualitätsziel oberirdische Gewässer	0.005 mg Cr ges. l ⁻¹
	- Einleitung in Gewässer	2 mg Cr ges. l ⁻¹ 0.1 mg Cr-VI l ⁻¹
	- Grenzwert Trinkwasser	0.02 mg Cr-VI l ⁻¹ 0.05 mg Cr l ⁻¹

Resultate und Diskussion

Abbildung 14 zeigt in Karten dargestellt die Cr-Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020 in Abbildung 15 und Tabelle 3 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt. Die Chromwerte waren an denselben Standorten wie Arsen erhöht, was auf eine Verschmutzung durch Erde oder Staub hinweist.

Chrom ist ein heikles Element für die Analytik, die Abweichung zu zertifiziertem Material und die Reproduzierbarkeit sind bei Cr weniger gut als bei den anderen Elementen (siehe Anhang 8.2.1 und 8.2.2.), darum müssen die Resultate mit Vorsicht interpretiert werden.

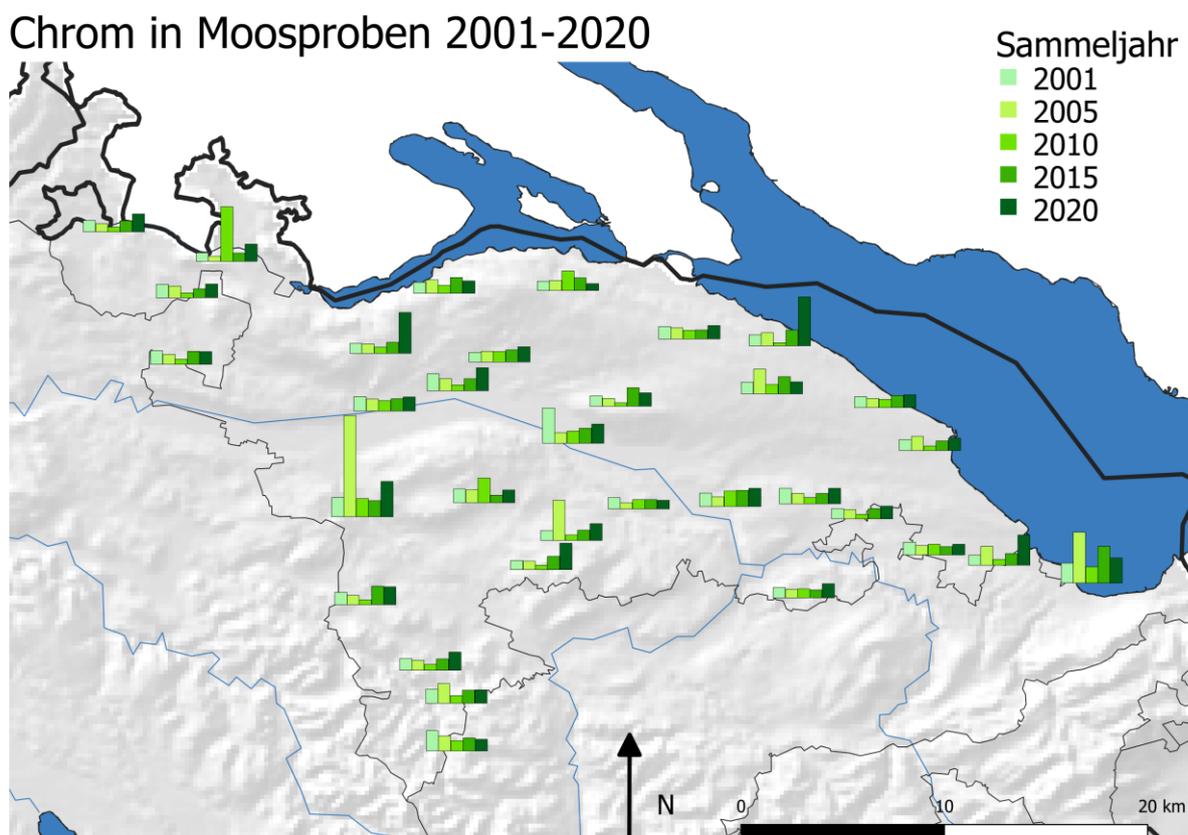


Abbildung 14 Balkendiagramme der Chromkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020
Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2005 gemessen und beträgt $7.08 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Chrom im Kanton Thurgau sind im Jahr 2020 ähnlich wie im ganzen Mittelland und im Jura. Nordalpen und Zentralalpen zeigen niedrigere, Südalpen deutlich höhere Konzentrationen.

Seit den Messungen 2000/2001 ist eine Zunahme der Chrom-Konzentration seit 2010 im Kt. Thurgau, im Mittelland wie auch in den Südalpen zu beobachten. Jura sowie die Nord- und Zentralalpen scheinen sich auf einem Level stabilisiert zu haben. Es muss aber beachtet werden, dass die Chrom Analytik grundsätzlich nicht ganz einfach ist.

An den 3 Standorten im Thurgau, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden, zeigte sich keine langfristige Tendenz einer Zu- oder Abnahme, wobei die Messreihen z.T. starke Schwankungen zwischen den einzelnen Standorten zeigen. Grundsätzlich deutet der zeitliche Verlauf auf eine konstante Chromkonzentration um $1 \mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS (Abbildung 16).

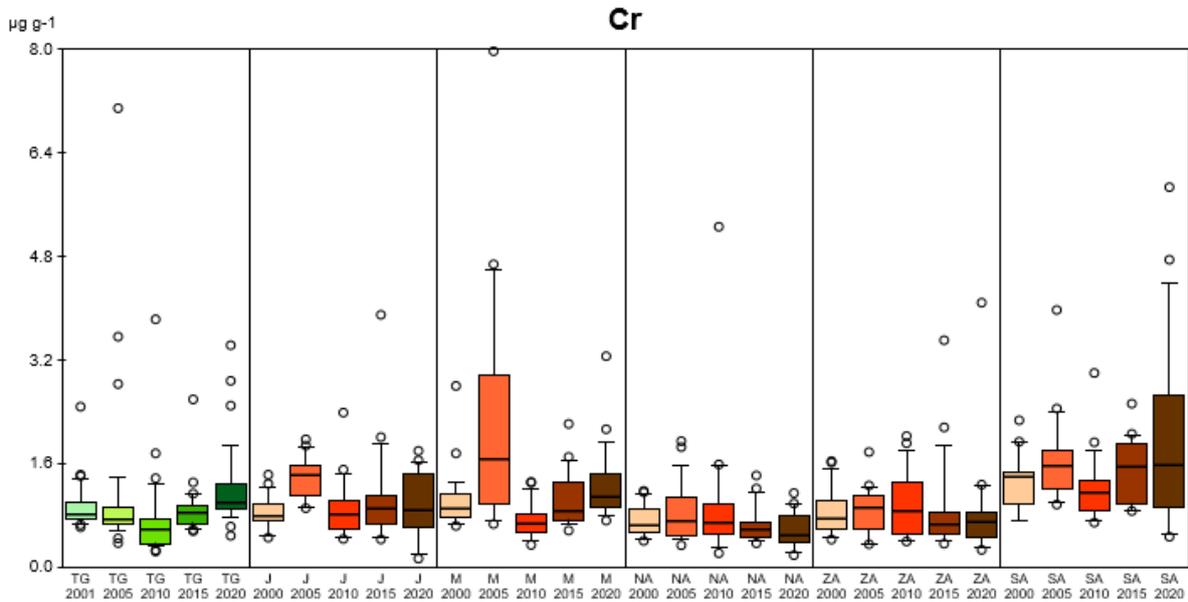


Abbildung 15 Chrom: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 3 Chrom: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

Cr µg g ⁻¹	TG					M					J					NA					ZA					SA				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	2.47	7.08	3.82	2.58	3.42	1.79	14.50	1.31	2.20	3.25	1.42	1.97	2.38	3.89	1.79	1.17	1.85	5.25	1.41	1.14	1.63	1.77	2.02	3.50	4.08	2.26	3.96	2.99	2.52	5.86
90-P	1.36	1.52	1.30	1.13	1.93	1.49	5.32	1.22	1.65	1.93	1.25	1.85	1.47	1.94	1.62	1.04	1.41	1.40	1.16	0.96	1.54	1.22	1.83	1.96	1.26	1.99	2.41	1.84	2.04	4.50
Median	0.82	0.75	0.58	0.84	1.00	0.86	1.74	0.65	0.87	1.12	0.79	1.40	0.82	0.88	0.86	0.61	0.63	0.68	0.58	0.47	0.73	0.93	0.87	0.66	0.68	1.38	1.57	1.16	1.54	1.55
10-P	0.69	0.59	0.32	0.59	0.82	0.60	0.82	0.44	0.68	0.84	0.65	1.03	0.55	0.63	0.52	0.47	0.45	0.33	0.44	0.28	0.53	0.40	0.45	0.48	0.39	0.76	1.09	0.81	0.91	0.64
Min	0.61	0.37	0.23	0.55	0.48	0.13	0.66	0.34	0.56	0.71	0.45	0.90	0.43	0.42	0.13	0.40	0.33	0.21	0.36	0.18	0.42	0.35	0.39	0.36	0.26	0.71	0.96	0.68	0.86	0.46
Mittelwert	0.94	1.13	0.75	0.90	1.25	0.87	3.03	0.73	1.07	1.34	0.87	1.40	0.96	1.20	0.99	0.69	0.83	1.01	0.67	0.49	0.87	0.92	0.99	0.99	0.95	1.41	1.76	1.27	1.51	2.24

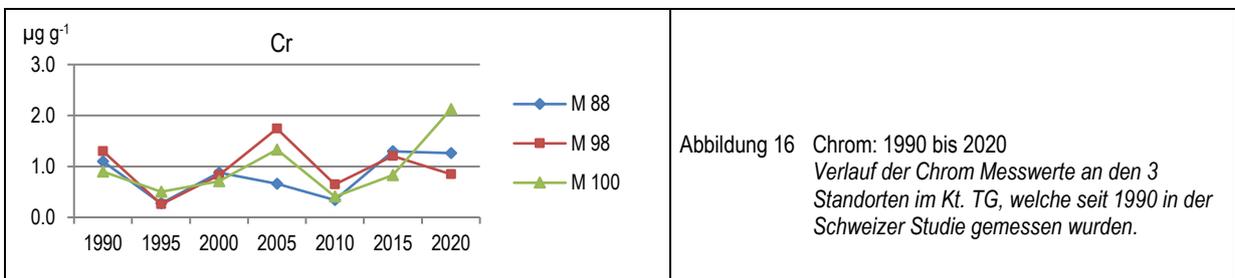


Abbildung 16 Chrom: 1990 bis 2020
Verlauf der Chrom Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.4 Cu - Kupfer

Atommasse 63.55 u, Dichte 8.92 g cm⁻¹

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Die mittlere Kupfer-Konzentration in der Erdkruste beträgt 47 g t⁻¹. Kupfer wird in erster Linie aus seinen Erzen gewonnen, die wichtigsten sind Kupferpyrit, Kupferglanz, Cuprit und Malachit, es tritt eher selten in gediegener Form auf. Die Jahres-Weltproduktion (Mienen und Raffinerien) betrug 2019 44.9 Mio t (U.S. Geological Survey 2021).

Kupfer wird hauptsächlich zur Herstellung von elektrischen Leitern in der Energie- und Fernmelde-technik, im Bauwesen für Verkleidungen und Regenrinnen sowie zur Herstellung von Legierungen (u.a. für Münzen) verwendet. Daneben dienen Kupferverbindungen als Farbstoffe sowie als Algizide und Fungizide.

Emissionssituation

Die anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre erfolgen hauptsächlich bei der Kupfer-, Eisen- und Stahlproduktion, bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Kehrlicht sowie bei der industriellen Kupfer-Verarbeitung. Die anthropogenen Kupfer-Emissionen in die Atmosphäre wurden 1983 auf 35'000 t Jahr⁻¹, 1995 auf 26'000 t Jahr⁻¹ geschätzt (Pacyna & Pacyna 2001), die natürlichen auf knapp 20'000 Tonnen (Lantzy & Mackenzie 1979). Diese leicht höheren anthropogen bedingten Emissionen zeigten sich auch in der Studie von Thöni et al. (1999): Kupfer war im Depositionstaub 1.3 bis 2.8 x konzentrierter als in der Erdkruste. In der Schweiz wurden die Kupfer-Emissionen 2000/2001 auf jährlich rund 65 t Cu Jahr⁻¹ geschätzt (von Arx 2006). In Rebbaugeländen dürften vom Einsatz kupferhaltiger Fungizide ausgehende Emissionen eine gewisse Bedeutung haben. Für Europa liegt die Schätzung der Emissionen für 2000 bei 2846 t Jahr⁻¹, wovon für die Schweiz ein Emissionsbeitrag von 21.6 t Jahr⁻¹ geschätzt wurde (Hettelingh et al, 2006). Eine Einschränkung des Kupferverbrauchs und der Emissionen im letzten Jahrzehnt hat in der Schweiz vermutlich nicht stattgefunden.

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Kupfer ist als Baustein vieler Enzyme für das Pflanzenwachstum unerlässlich. Der Kupfer-Bedarf von Pflanzen ist allerdings nur gering. Schadsymptome eines Kupfer-Überschusses sind Chlorosen und Wurzelveränderungen, die sich in der Ausbildung zahlreicher kurzer, braun gefärbter Nebenwurzeln zeigen (Bergmann 1988). Auf Pilze und Algen wirkt Kupfer sehr toxisch.

Tiere und Mensch: Kupfer ist für Mensch und Tier lebensnotwendig, es ist Bestandteil vieler Metallproteine. Für den Menschen ist Kupfer in erhöhten Konzentrationen bemerkenswert ungiftig, chronische Vergiftungen sind selten. Bekannt sind akute Toxizitätserscheinungen bei der Einnahme von grösseren Mengen von Kupfersalzen wie Übelkeit, Erbrechen und Durchfall. Grammengen können zu Krämpfen, Koma und Tod führen da die Leber durch Hepatitis und das Blut durch hämolytische Anämie geschädigt wird (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen	5 mg m ⁻³
	- Bodenrichtwert (Totalgehalt)	40 mg kg ⁻¹ TS
	- Qualitätsziel oberirdische Gewässer	0.005 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Einleitung in Gewässer	0.5 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Toleranzwert Trinkwasser	1.0 mg l ⁻¹

Resultate und Diskussion

Abbildung 17 zeigt in Karten dargestellt die Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020, in Abbildung 18 und Tabelle 4 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt.

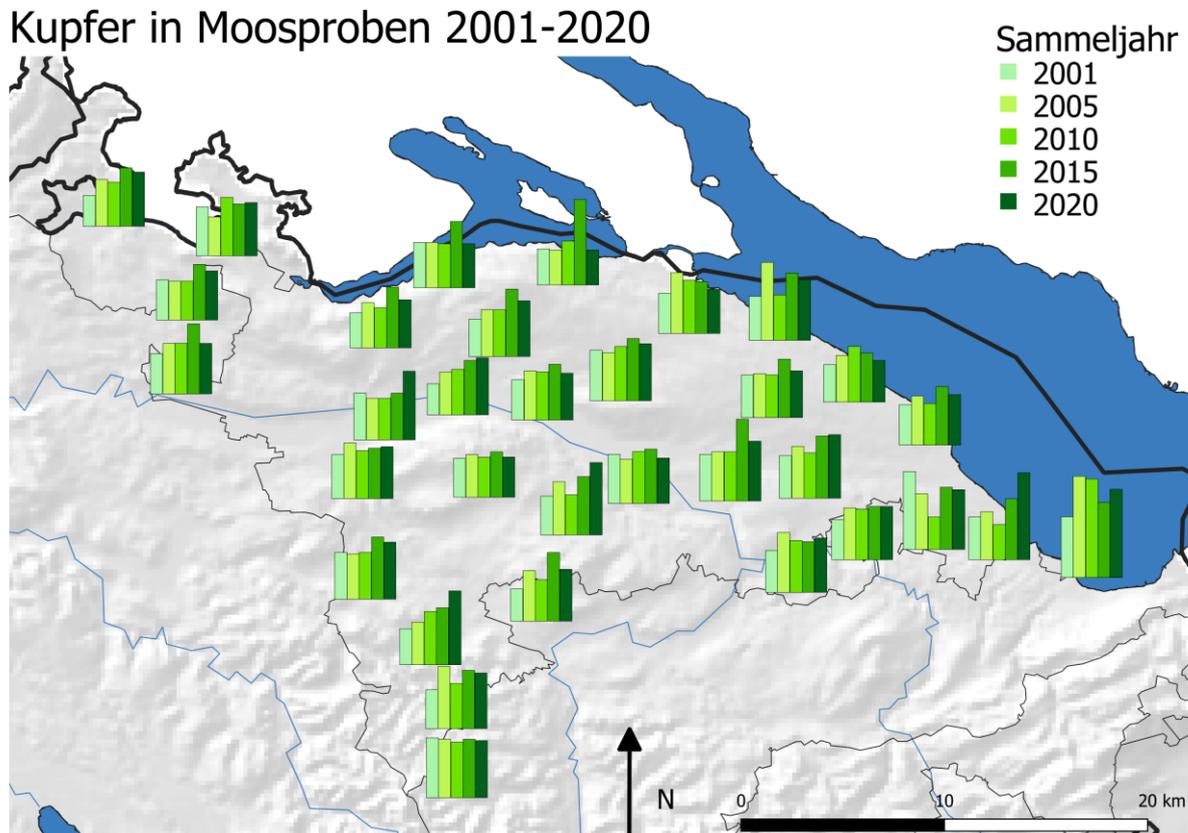


Abbildung 17 Balkendiagramme der Kupferkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020
Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2005 gemessen und beträgt $7.8 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Kupfer im Kanton Thurgau gehören zu den niedrigen in der Schweiz, hohe Werte wurden vor allem in den Südalpen ermittelt. Die Kupferkonzentration im Kt. TG ist an allen Standorten ziemlich ähnlich.

Im Kanton Thurgau wie auch im Mittelland und Jura scheinen die Kupfer-Konzentrationen nach einer tendenziellen Zunahme nun zu stabilisieren. In den Alpen haben sich die Kupferkonzentrationen wenig verändert, wobei die Werte im Gegensatz zur Vorperiode gestiegen sind.

An den 3 Standorten im Thurgau, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden, zeigte sich zwischen 1990 und 1995 ein Rückgang der Konzentrationen (Abbildung 19); anschliessend waren keine markanten Veränderungen mehr zu verzeichnen, wobei die Konzentration bei M100 seit 2010 eine markante Zunahme zeigt.

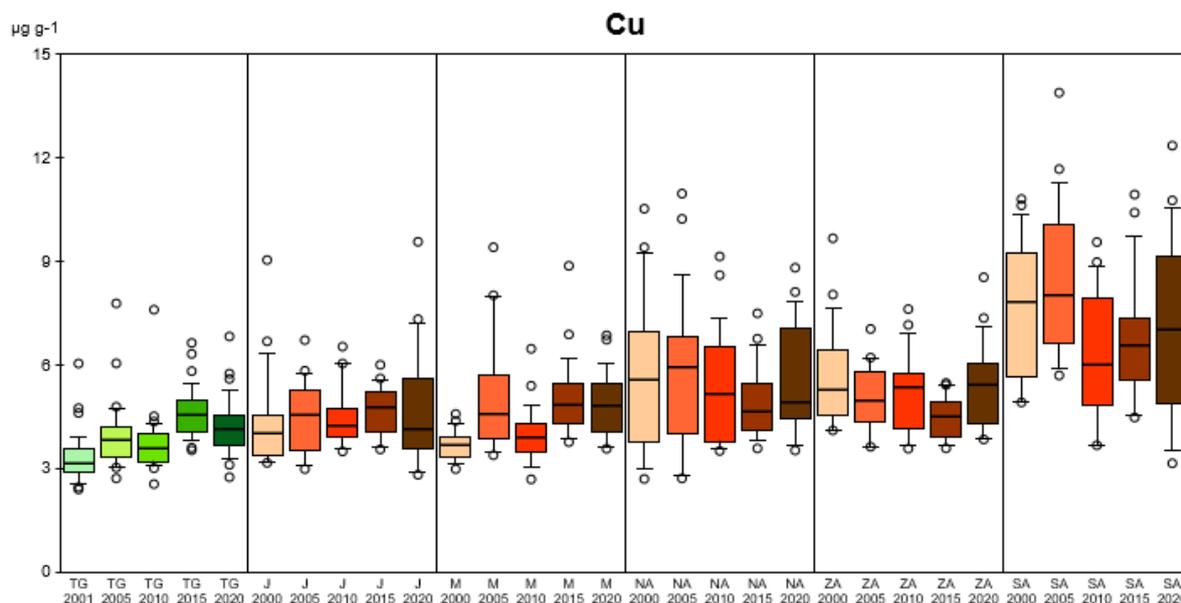


Abbildung 18 Kupfer: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 4 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 4 Kupfer: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

Cu µg g ⁻¹	TG					M					J					NA					ZA					SA				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz. Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	6.0	7.8	7.6	6.6	6.8	9.5	28.9	6.5	8.9	6.8	9.0	7.4	6.5	6.0	9.5	10.5	10.9	9.1	7.5	8.8	9.6	7.1	7.6	5.5	8.5	10.8	13.9	9.5	10.9	12.3
90-P	4.0	4.7	4.3	5.5	5.3	6.9	8.3	4.9	6.3	6.0	6.5	6.6	6.0	5.6	7.3	9.3	10.6	7.7	6.6	7.9	7.8	6.9	7.0	5.4	7.2	10.4	11.4	8.9	9.9	10.6
Median	3.1	3.8	3.5	4.5	4.1	3.8	4.6	3.9	4.8	4.6	4.0	4.9	4.3	4.8	4.1	5.7	6.4	5.2	4.6	4.9	5.2	5.1	5.4	4.5	5.4	7.8	8.1	6.0	6.6	7.0
10-P	2.6	3.2	3.1	3.9	3.4	3.3	3.6	3.3	3.9	3.6	3.2	3.5	3.8	3.8	3.3	3.1	3.4	3.6	4.0	3.8	4.2	3.8	3.9	3.8	4.0	5.0	6.4	3.9	4.8	4.5
Min	2.4	2.7	2.5	3.5	2.7	2.8	3.4	2.7	3.8	3.6	3.2	3.0	3.5	3.5	2.8	2.7	2.7	3.5	3.6	3.5	4.1	3.6	3.6	3.6	3.8	4.9	5.7	3.7	4.5	3.1
Mittelwert	3.3	4.0	3.7	4.6	4.2	3.8	6.5	4.0	5.1	4.8	4.5	4.8	4.6	4.8	4.9	5.8	6.5	5.5	5.0	5.6	5.8	5.2	5.2	4.5	5.5	7.8	8.8	6.4	6.9	7.3

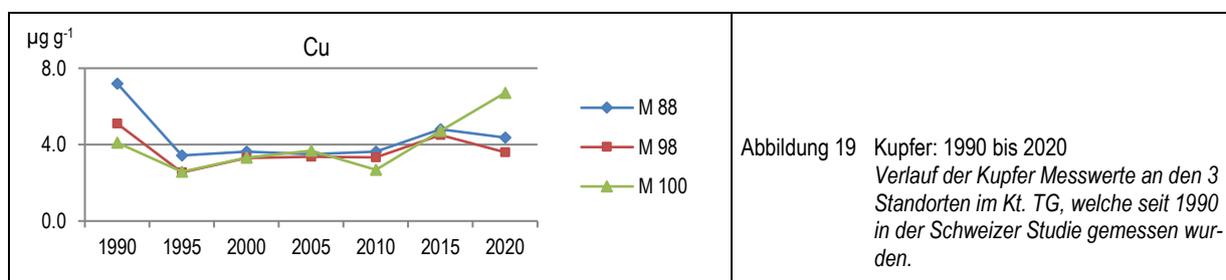


Abbildung 19 Kupfer: 1990 bis 2020
Verlauf der Kupfer Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.5 Ni - Nickel

Atommasse 58.71 u, Dichte 8.90 g cm⁻¹

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Mit einem Gehalt von 58 g t⁻¹ gehört Nickel zu den häufigeren Elementen in der Erdkruste. Nickel wird zu 90 % aus Pentlandit, einem Eisen-Nickel-Sulfid, gewonnen (Merian 1984). 2019 wurden weltweit ca. 2.6 Mio t produziert (U.S. Geological Survey 2021).

Nickel ist Bestandteil von insgesamt etwa 3'000 verschiedenen Legierungen, die wichtigsten sind die Chromnickelstähle. Sie finden vielfältige Verwendung im Bauwesen, in der chemischen Industrie, in der Lebensmittelindustrie, im Haushalt sowie im Fahrzeug- und Flugzeugbau. Aus Kupfer-Nickellegierungen bestehen die meisten Münzen (Trueb 1996), und Nickel basierte Superlegierungen werden vor allem in der Luft- und Weltraumindustrie sowie in der Energiegewinnung eingesetzt (U.S. Geological Survey 2015).

Emissionssituation

Nickel gelangt vor allem beim Bergbau und bei industriellen Arbeitsvorgängen in die Umwelt (Merian 1984). Die anthropogenen Nickel-Emissionen wurden 1983 auf 55'000 t Jahr⁻¹, 1995 auf 95'000 t Jahr⁻¹ geschätzt (Pacyna & Pacyna 2001), die natürlichen auf 28'300 t Jahr⁻¹ (Lantzy & Mackenzie 1979). In der Studie von Thöni et al. (1999) war die Konzentration im Depositionsstaub 0.3 bis 1.1 x so hoch wie diejenigen in der Erdkruste, was die leicht erhöhte anthropogene Emission bestätigt. Bei Elementen mit vorwiegend natürlichen Emissionen wie Aluminium waren diese nur 0.1 bis 0.3 x so gross. Für Europa liegt die Schätzung der Emissionen für 2000 bei 4144 t Jahr⁻¹, wobei für die Schweiz eine Emissionsbelastung von 7.4 t Jahr⁻¹ geschätzt wurde (Hetteling et al. 2006).

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Es ist nicht klar, ob Nickel für Pflanzen essentiell ist. Wichtig für die Toxizität ist der Anteil an löslichem Nickel, der vor allem bei sauren, sandigen Böden hoch ist. Ni²⁺ wird von den Pflanzen leicht aufgenommen und wirkt je nach Pflanzenart unterschiedlich toxisch (Bergmann 1988).

Tiere und Mensch: Nickel zählt zu den essentiellen Elementen, wobei beim Menschen bislang noch keine abhängigen Funktionen identifiziert wurden. Die Toxizität der in der Umwelt vorhandenen Konzentration ist gering. Allergien z.B. beim Tragen von Modeschmuck sind relativ häufig. Gewisse Nickelverbindungen gelten als krebserregend (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen	1 mg m ⁻³
	- Bodenrichtwert (Totalgehalt)	50 mg kg ⁻¹ TS
	- Qualitätsziel oberirdische Gewässer	0.01 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Einleitung in Gewässer	2 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Höchstwert Trinkwasser	0.02 mg l ⁻¹

Resultate und Diskussion

Abbildung 20 zeigt in Karten dargestellt die Ni-Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020, in Abbildung 21 und Tabelle 5 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt.

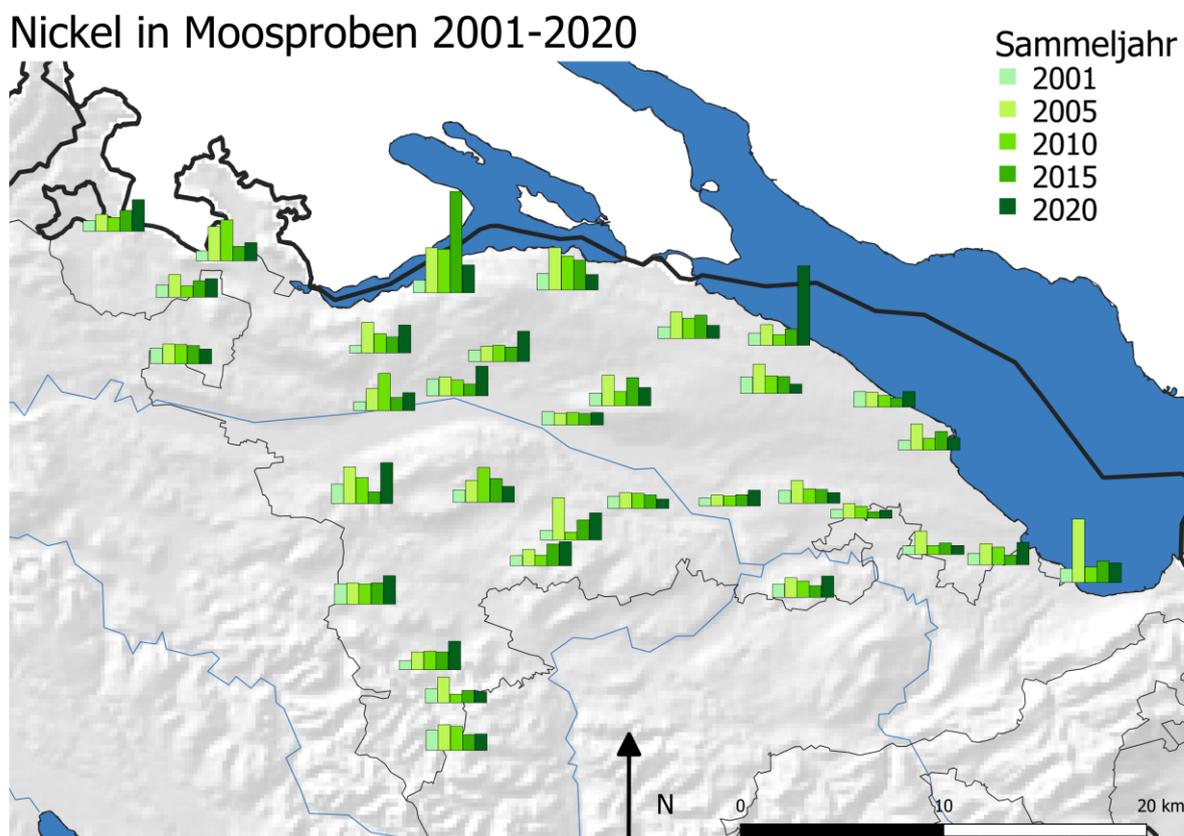


Abbildung 20 Balkendiagramme der Nickelkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020
Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2015 gemessen und beträgt $6.7 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Nickel im Kanton Thurgau liegen im Jahr 2020 leicht höher als diejenigen im Jura, in den Nord- und Zentralalpen, sind ähnlich denen des Mittellandes und liegen tiefer als die Konzentrationen in den Südalpen.

Ausser in den Südalpen hat sich die Nickel-Konzentrationen seit 2010 in jedem Naturraum inkl. Kt. Thurgau auf einem konstanten Niveau stabilisiert (unterschiedliches Niveau für jeden Naturraum). Diese Stabilisierung zeigt sich auch bei den 3 Standorten, welche seit 1990 im Rahmen der Schweizerischen Untersuchung im Kt. Thurgau beprobt werden (Abbildung 22).

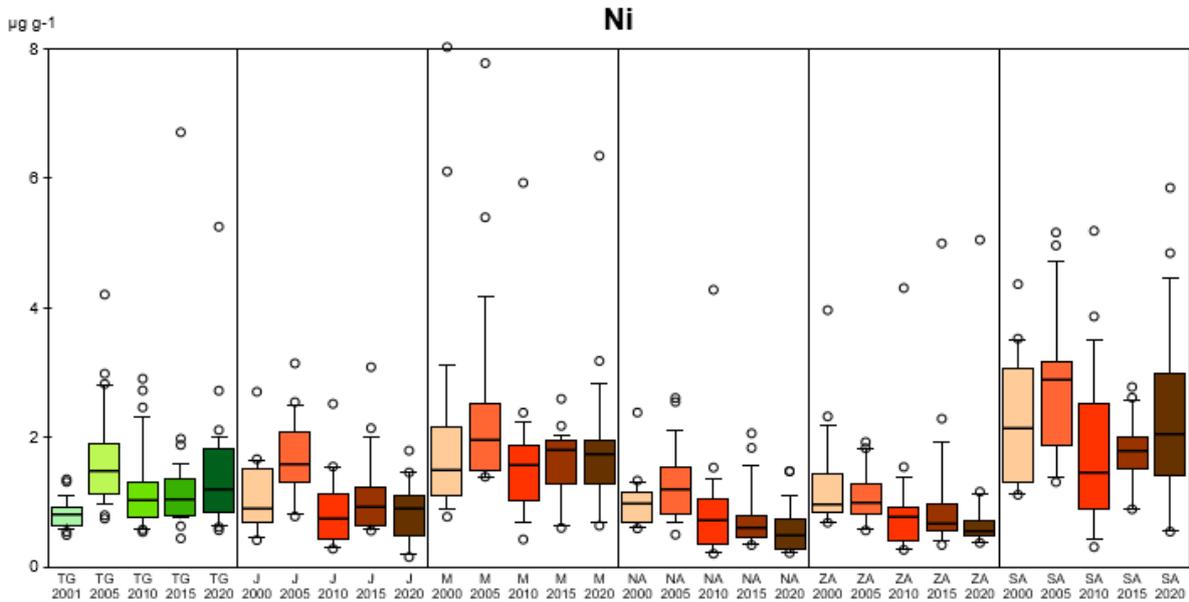


Abbildung 21 Nickel: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 5 Nickel: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

Ni µg g ⁻¹	TG					M					J					NA					ZA					SA				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	1.4	4.2	2.9	6.7	5.2	6.1	7.8	5.9	2.6	6.3	2.7	3.1	2.5	3.1	1.8	1.3	2.6	4.3	2.1	1.5	4.0	3.7	4.3	5.0	5.0	4.6	5.2	5.2	2.8	5.8
90-P	1.1	2.8	2.3	1.6	2.0	1.5	4.3	2.3	2.0	2.8	1.6	2.5	1.5	2.1	1.5	1.2	2.1	1.4	1.6	1.2	2.2	1.9	1.4	2.0	1.1	3.5	4.8	3.6	2.6	4.6
Median	0.8	1.5	1.0	1.1	1.2	1.0	1.9	1.6	1.8	1.8	0.9	1.6	0.7	0.9	0.9	0.9	1.2	0.6	0.6	0.5	1.0	1.0	0.8	0.7	0.6	2.1	3.0	1.5	1.8	2.1
10-P	0.6	1.0	0.7	0.8	0.7	0.5	1.4	0.8	1.0	0.8	0.6	1.0	0.4	0.6	0.4	0.6	0.8	0.2	0.3	0.3	0.7	0.7	0.3	0.6	0.4	1.2	1.6	0.7	1.0	0.8
Min	0.5	0.7	0.5	0.4	0.6	0.1	1.4	0.4	0.6	0.6	0.4	0.8	0.3	0.6	0.1	0.6	0.5	0.2	0.3	0.2	0.7	0.6	0.3	0.3	0.4	1.1	1.3	0.3	0.9	0.5
Mittelwert	0.8	1.7	1.2	1.3	1.4	1.8	2.6	1.7	1.6	1.9	1.1	1.7	0.9	1.2	0.9	0.9	1.3	0.9	0.8	0.6	1.4	1.3	1.0	1.1	1.0	2.4	3.0	1.9	1.8	2.4

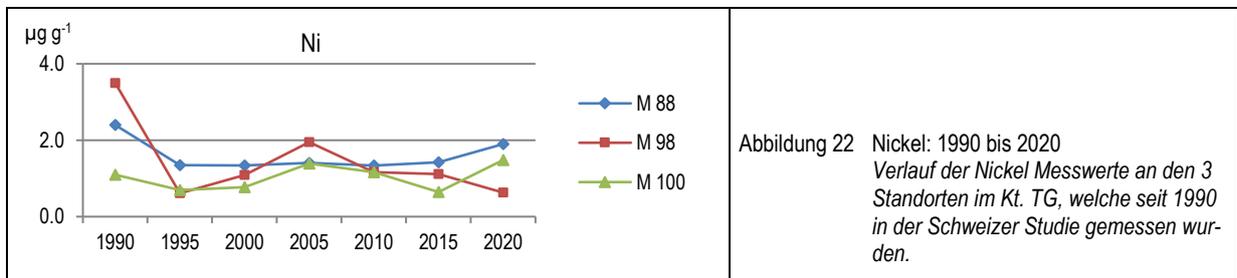


Abbildung 22 Nickel: 1990 bis 2020
Verlauf der Nickel Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.6 Pb - Blei

Atommasse 207.2 u, Dichte 11.34 g cm⁻³

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Der durchschnittliche Bleigehalt in der Erdkruste beträgt ca. 16 g t⁻¹. Blei ist in der Natur praktisch allgegenwärtig, es kommt gelegentlich als gediegenes Metall, hauptsächlich jedoch in Form von anorganischen Verbindungen vor. Blei wird hauptsächlich aus Bleiglantz (PbS) gewonnen. Die weltweite Bleiproduktion (aus Minen) betrug 2019 4.7 Mio Tonnen (U.S. Geological Survey 2021).

Trotz seiner Toxizität hat Blei auch heute noch viele Anwendungen. Ein grosser Teil des Bleis wird in Batterien und für Munition verwendet. Aufgrund seiner Korrosionsfestigkeit dient es weiter zur Umarmelung von Kabeln und chemischen Reaktionsgefässen. Wegen seiner Eigenschaft, Schwingungen zu absorbieren, wird Blei auch für den Erdbebenschutz von Gebäuden verwendet. Blei ist zudem ein wichtiger Bestandteil einer Vielzahl von Legierungen. Der Einsatz von Blei als Antiklopfmittel im Benzin, als Pigment in Korrosionsschutzanstrichen (Bleimennig) sowie als Insektizidbestandteil ist stark zurückgegangen (Trueb 1996).

Emissionssituation

Blei und Blei-Verbindungen können bei der Gewinnung und Verarbeitung der Erze sowie bei der Herstellung, Verwendung oder Beseitigung bleihaltiger Materialien in die Umwelt gelangen. Der grösste Teil der Bleiemissionen gelangt in die Atmosphäre. 1983 wurden die anthropogenen Emissionen weltweit auf 330'000 t Jahr⁻¹, 1995 auf 120'000 t Jahr⁻¹ geschätzt (Pacyna & Pacyna 2001), die natürlichen auf 5'800 t Jahr⁻¹ (Lantzy & Mackenzie 1979). Diese sehr hohen anthropogen bedingten Emissionen zeigten sich auch in der Studie von Thöni et al. (1999). Blei war im Depositionstaub 9 bis 28 x konzentrierter als in der Erdkruste. In Europa sanken die Emissionen von 58'000 t Jahr⁻¹ (1990) auf 28'000 t Jahr⁻¹ (1995) (Pacyna & Pacyna 2001, et al. 2002) und 13'000 t Jahr⁻¹ (2000) (Pacyna et al. 2007).

In der Schweiz waren die Bleiemissionen nach einem sprunghaften Anstieg zwischen 1950 und 1970 von 1985 bis 2000 stark, dann moderat rückläufig und stagnieren seit 2003. Die Verbesserung der Emissionssituation ist primär auf die stufenweise vorangetriebene Reduktion des Bleigehaltes in Super- und Normalbenzin und später die Einführung von bleifreiem Benzin, sowie auf die Sanierungen in der Metallindustrie zurückzuführen. 1970 gelangten in der Schweiz 2'200 t Blei pro Jahr in die Atmosphäre (BUWAL 1995). Für das Jahr 1990 wurden die Bleiemissionen noch auf 352 t Jahr⁻¹ geschätzt, im Jahr 2005 auf 21 t Jahr⁻¹, 2010 auf 17 t Jahr⁻¹ und 2019 auf 15 t Jahr⁻¹ (FOEN 2021).

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Ein hoher Bleigehalt im Boden kann bei Pflanzen zu unspezifischen Chlorosen und starken Wachstumsschäden an Wurzeln und oberirdischen Pflanzenteilen führen. Im Vergleich zu anderen Schwermetallen weist Blei jedoch eine relativ geringe Toxizität auf (Scheffer & Schachtschabel 1984).

Tiere und Mensch: Blei wird vom Menschen vor allem über die Nahrung und Atemluft aufgenommen. Blei ist ein Enzymgift und blockiert die Thiolgruppen in Proteinen. Dies hemmt u.a. die zum Aufbau von Hämoglobin und Myoglobin benötigten Enzyme und kann zu Gewichtsverlust und der Ausbildung von Anämien führen. Akute Vergiftungsfälle äussern sich in Erbrechen, Darmkoliken, Nierenversagen und enden in schweren Fällen mit dem Tod (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen	5 mg m ⁻³
	- Immissionsgrenzwerte:	
	Schwebestaub (PM 10), (Jahresmittel)	500 ng m ⁻³
	Staubniederschlag	100 µg m ⁻² Tag ⁻¹
	- Bodenrichtwert (Totalgehalt)	50 mg kg ⁻¹ TS
	- Qualitätsziel oberirdische Gewässer	0.01 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Einleitung in Gewässer	0.5 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Grenzwert Trinkwasser	0.01 mg l ⁻¹

Resultate und Diskussion

Abbildung 23 zeigt die Pb-Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020 in Karten dargestellt, in Abbildung 24 und Tabelle 6 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt.

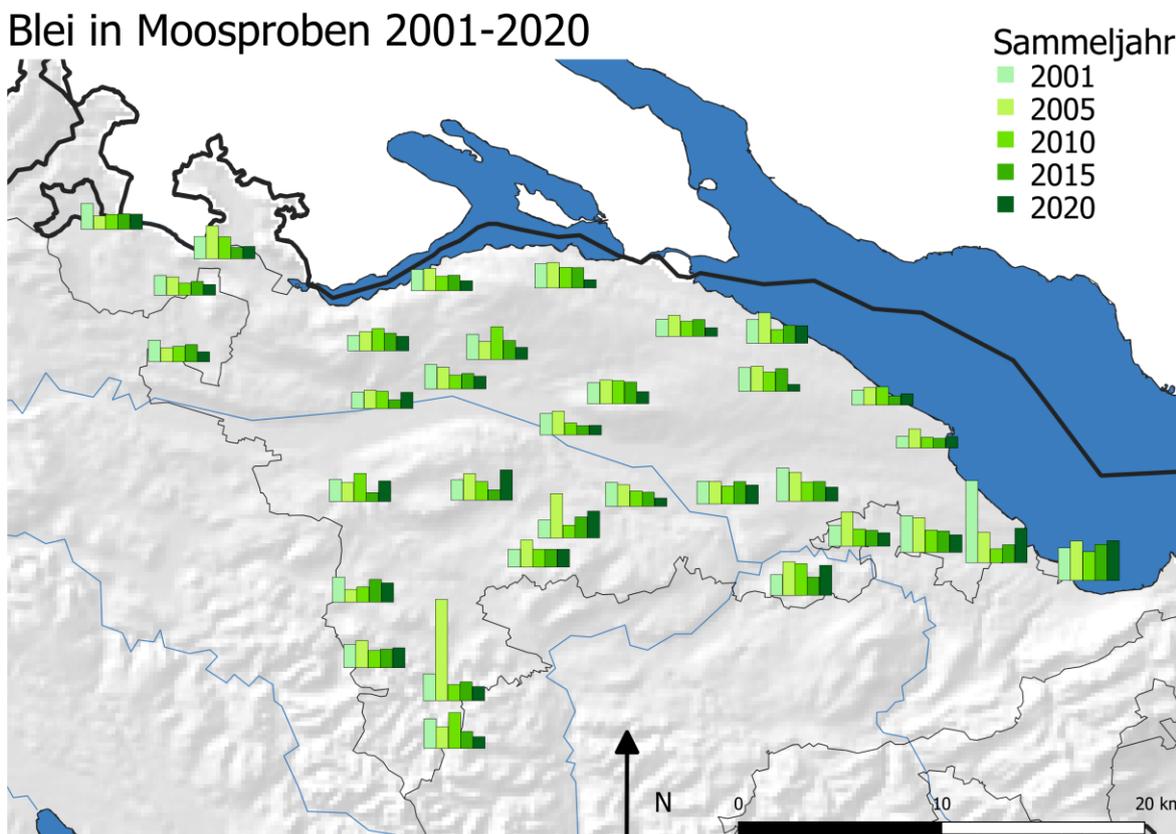


Abbildung 23 Balkendiagramme der Bleikonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020
 Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2005 gemessen und beträgt $11.3 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Blei im Kanton Thurgau sind ähnlich wie diejenigen in den Nordalpen, höher als in den Zentralalpen, aber niedriger als Mittelland und Jura (Ausnahme 2020) und deutlich niedriger als diejenigen in der Südalpen.

In der Schweiz haben die Blei-Konzentrationen zwischen 2000 und 2020 deutlich abgenommen (im Kt. Thurgau um ca. 30%).

Die Abnahme zwischen 1990 und 2020 an den 3 Standorten im Thurgau, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden war im Durchschnitt 85 % (Abbildung 25). Dies spiegelt die Änderungen der Emissionen mit 93 % Abnahme zwischen 1980 und 2013 sehr gut wider (FOEN 2015), wobei die Hauptabnahme zwischen 1990 und 1995 war. Die starke Abnahme vor allem in den 1990er Jahren sind hauptsächlich auf die Einführung und der schnellen Verbreitung des bleifreien Benzins zurückzuführen.

Aufgrund der Mooskonzentration wurden Abschätzungen gemacht, wie hoch die Blei-Deposition im Kanton Thurgau an quellenfernen Standorten ist (Tabelle 9). Die geschätzten Werte sind an diesen quellenfernen Standorten unter dem LRV-Grenzwert.

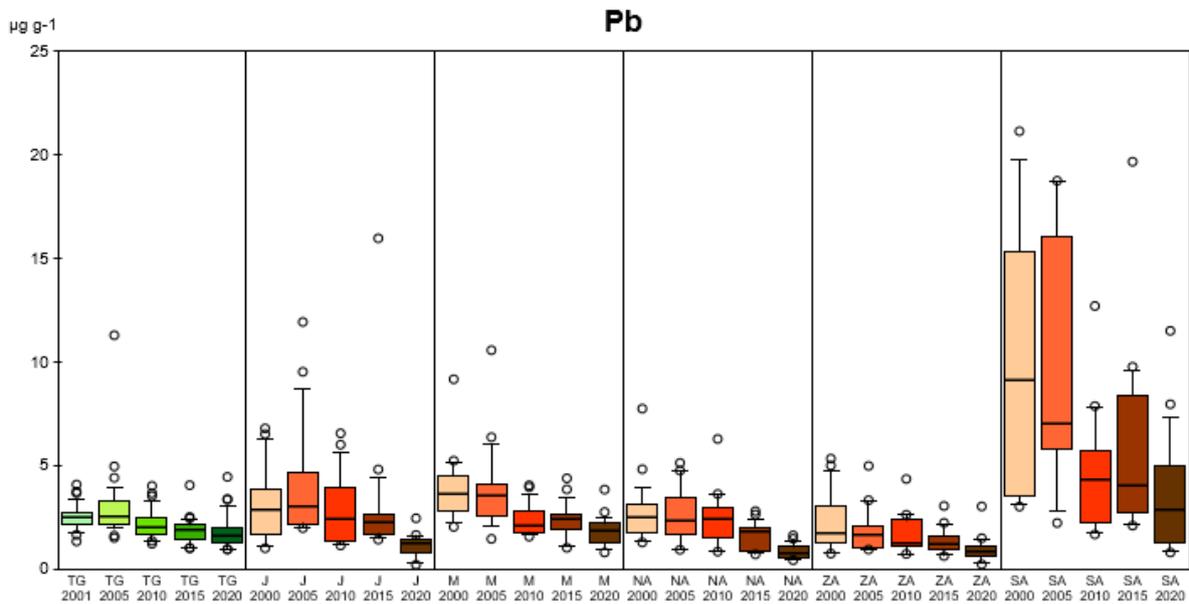


Abbildung 24 Blei: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 6 Blei: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

Pb µg g ⁻¹	TG					M					J					NA					ZA					SA				
	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	4.1	11.3	4.0	4.0	4.4	4.3	10.5	4.0	4.4	3.8	6.8	11.9	6.5	15.9	2.4	4.8	5.1	6.3	2.8	1.6	5.3	11.1	4.3	3.0	3.0	30.9	31.6	12.7	19.6	11.5
90-P	3.3	3.9	3.3	2.4	3.0	3.0	6.1	3.6	3.5	2.5	6.4	10.3	5.8	4.6	1.6	3.3	4.7	3.6	2.4	1.3	4.8	4.6	2.6	2.1	1.4	20.2	18.7	7.8	9.6	7.5
Median	2.5	2.6	2.0	1.9	1.5	1.5	3.5	2.0	2.4	1.7	2.9	3.2	2.4	2.2	1.3	2.4	2.2	2.1	1.8	0.8	1.8	1.8	1.3	1.2	0.9	9.0	9.1	4.3	4.0	2.9
10-P	1.8	2.0	1.4	1.0	1.1	0.8	2.2	1.7	1.1	1.2	1.6	2.1	1.3	1.7	0.7	1.4	1.2	1.1	0.8	0.5	0.9	1.0	0.8	0.8	0.5	3.4	5.7	1.9	2.5	1.1
Min	1.3	1.5	1.2	1.0	0.9	0.2	1.4	1.6	1.0	0.8	1.0	2.0	1.1	1.4	0.2	1.3	0.9	0.8	0.7	0.4	0.7	0.9	0.7	0.6	0.2	3.0	2.2	1.7	2.1	0.8
Mittelwert	2.5	3.1	2.2	1.9	1.8	2.9	3.9	2.4	2.4	1.8	3.4	5.0	3.0	3.4	1.2	2.5	2.6	2.4	1.7	0.9	2.6	2.7	1.7	1.4	1.0	11.2	11.9	4.9	6.2	3.8

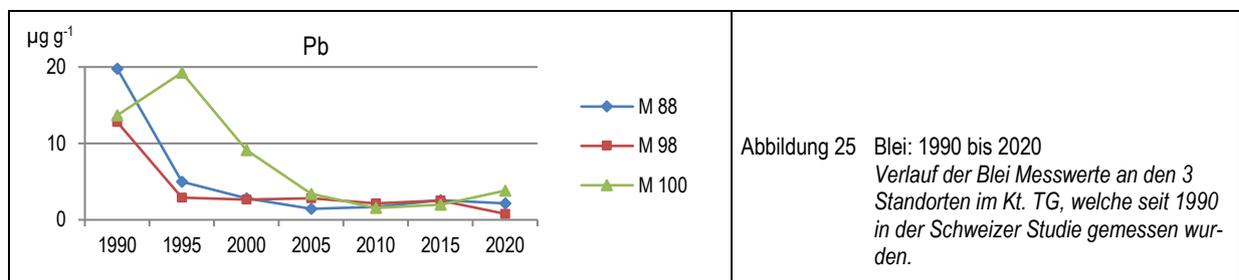


Abbildung 25 Blei: 1990 bis 2020
Verlauf der Blei Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.7 V - Vanadium

Atommasse 50.94 u, Dichte 6.11 g cm⁻¹

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Mit einem Gehalt von 90 g t⁻¹ gehört Vanadium zu den häufigeren Elementen in der Erdkruste, ähnlich häufig wie Zink. Vanadium kommt in verschiedenen Uran-, Blei-, Eisen-, Zink- und weiteren Erzen vor, jedoch mit einem Anteil von weniger als 3 % (Merian 1984). 2019 wurden weltweit ca. 87'000 t gefördert (U.S. Geological Survey 2021).

Vanadium wird hauptsächlich zur Herstellung von zähem Stahl und sehr harten Titanlegierungen sowie als Katalysator verwendet (Merian 1984).

Emissionssituation

Die anthropogenen Vanadium-Emissionen wurden in den siebziger Jahren auf 210'000 t Jahr⁻¹ geschätzt, die natürlichen auf 65'000 t Jahr⁻¹ (Lantzy & Mackenzie 1979). Pacyna & Pacyna (2001) schätzten die Emissionen von 1983 auf 86'000 t Jahr⁻¹ (ev. ein Druckfehler, 286'000 t Jahr⁻¹?), 1995 auf 240'000 t Jahr⁻¹. Für Europa liegt die Schätzung für 1995 bei 57'000 t Jahr⁻¹. Vanadium gelangt neben den industriellen Partikelemissionen vor allem durch die Verbrennung von Kohle und Erdöl in die Erdatmosphäre (Merian 1984). In der Studie von Thöni et al. (1999) waren die Konzentrationen im Depositionsstaub 0.3 bis 0.9 x so gross wie diejenigen in der Erdkruste, was ebenfalls auf eine leicht erhöhte anthropogene Emissionsrate hinweist. Bei Elementen mit vorwiegend natürlichen Emissionen wie Aluminium waren diese nur 0.1 bis 0.3 x so gross. Über Emissionen in der Schweiz liegen keine Angaben vor.

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Ob Vanadium für Pflanzen essentiell ist, ist nicht gesichert. Hingegen soll ein vanadiumhaltiges Enzym für die Fixierung von Stickstoff aus der Luft durch Bakterien verantwortlich sein (Trueb 1996). Über Mangelerscheinungen ist nichts bekannt. Es kann in relativ geringen Mengen (schon ab 0.5 µg ml⁻¹) im Nährmedium toxisch wirken und zu Chlorosen führen (Bergmann 1988).

Tiere und Mensch: Es ist umstritten, ob Vanadium essentiell ist. Es wird ihm eine kariesvermindernde Wirkung nachgesagt. Auch soll es eine Steuerungsfunktion im Herzmuskel haben (Trueb 1996). Bei hoher Belastung können Atemwegserkrankungen und Schäden an Leber und Nieren auftreten. Zudem wurde eine mutagene Wirkung gefunden (Bronzetti & Galli 1992).

Grenzwerte: - Emissionsgrenzwert für stationäre Anlagen: 5 mg m⁻³

Resultate und Diskussion

Abbildung 26 zeigt die Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020 in Karten dargestellt, in Abbildung 27 und Tabelle 7 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt. Wie bereits bei Arsen und Chrom waren einzelne Vanadiumwerte erhöht, was möglicherweise auf eine Verschmutzung durch Erde oder Staub zurückgeführt werden kann.

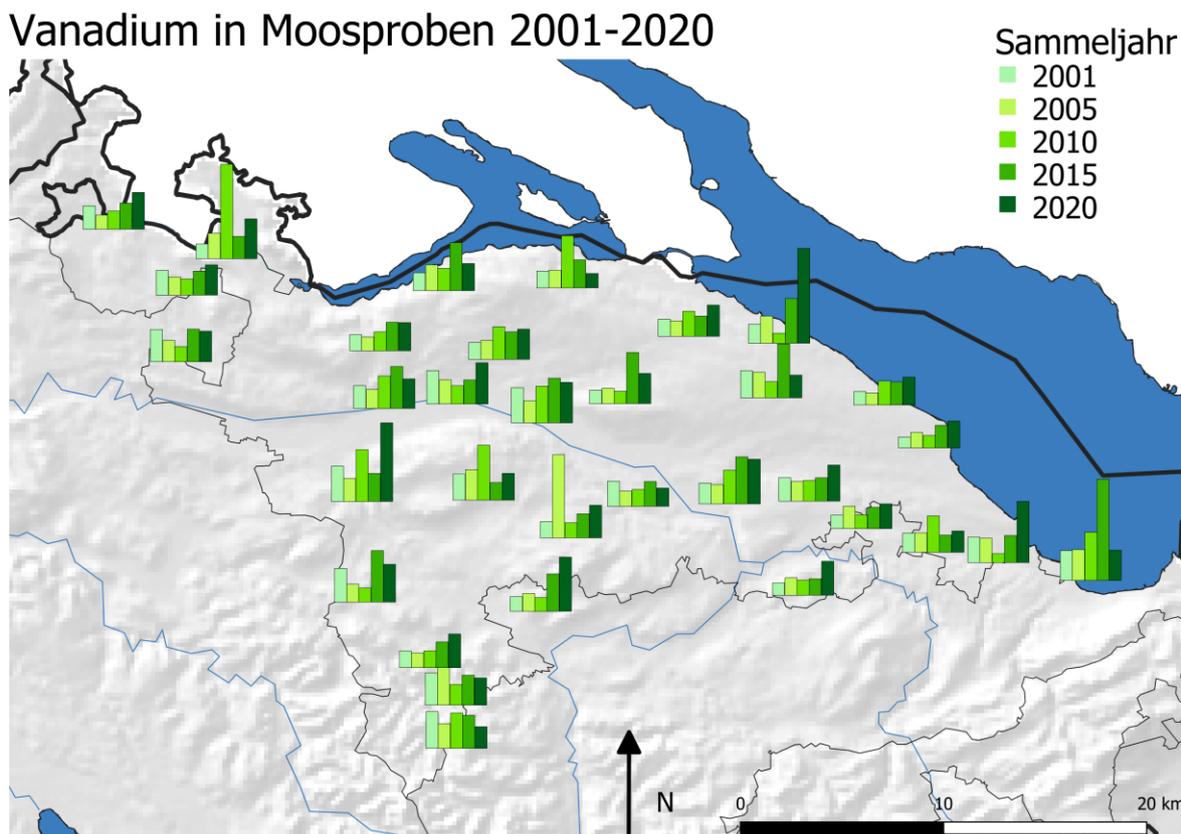


Abbildung 26 Balkendiagramme der Vanadiumkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020
 Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2005 gemessen und beträgt $2.57 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Vanadium im Kanton Thurgau liegen im ähnlichen Rahmen wie die Konzentrationen in der übrigen Schweiz, abgesehen von den Südalpen, welche deutlich höhere Konzentrationen aufweist.

Im Kanton Thurgau blieben die Werte zwischen 2001 und 2010 etwa konstant und stiegen dann bis 2020 leicht an. In den Naturräumen der Schweiz ist 2020 keine Zunahme von Vanadium gemessen worden.

An den 3 Standorten im Thurgau, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden, zeigte sich zwischen 1990 und 1995 eine starke Minderung der Konzentrationen um rund 75 % (Abbildung 28); nach einem kleinen Anstieg 2000 gingen die Werte zurück, um 2015 wieder deutlich anzusteigen. 2020 zeigt sich eine Abnahme bei zwei der drei Standorte. Wieder ist es der Standort M100, welcher eine ungewöhnliche Zunahme zeigt.

Der starke Rückgang in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts kann auf bessere Filtertechniken bei Emittenten, auf den Rückgang der Kohle- und Schweröverbrennung sowie auf Schliessung von Industrieanlagen zurückgeführt werden.

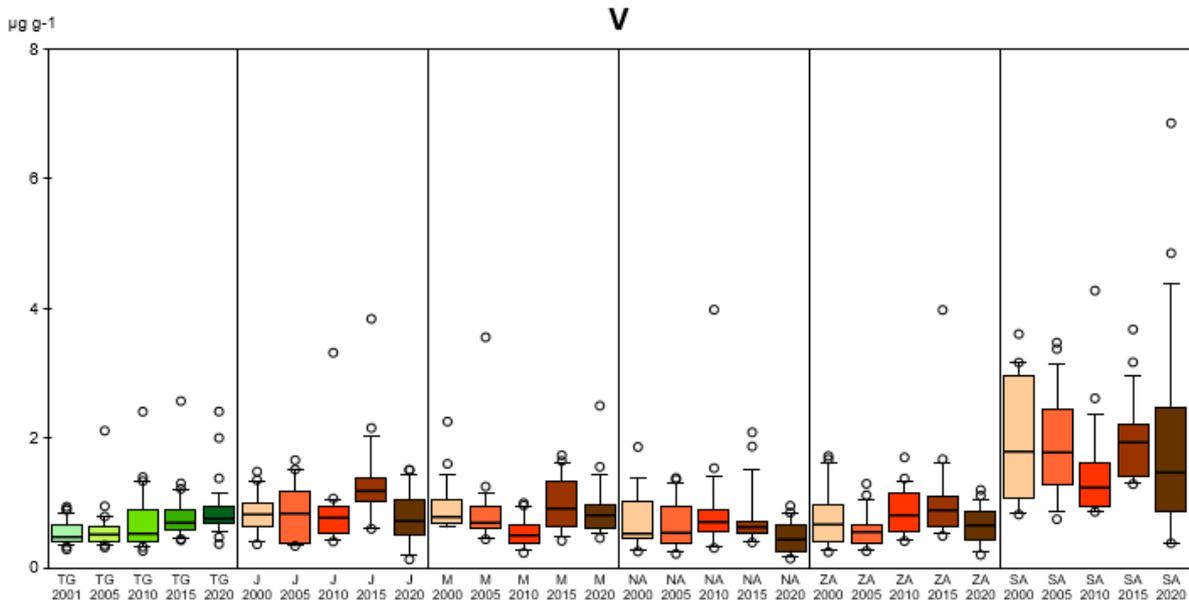


Abbildung 27 Vanadium: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 7 Vanadium: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

V	TG					M					J					NA					ZA					SA				
µg g ⁻¹	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	0.94	2.11	2.40	2.57	2.41	1.51	3.55	1.00	1.73	2.49	1.48	1.84	3.31	3.83	1.51	1.38	1.36	3.97	2.09	0.95	1.72	1.29	1.70	3.97	1.20	3.68	3.47	4.27	3.67	6.85
90-P	0.85	0.78	1.33	1.20	1.16	1.21	1.17	0.94	1.62	1.44	1.34	1.64	1.06	2.09	1.47	1.22	1.20	1.32	1.57	0.84	1.63	1.20	1.35	1.63	1.07	3.51	3.22	2.44	3.03	4.52
Median	0.49	0.49	0.53	0.68	0.77	0.74	0.67	0.51	0.93	0.83	0.81	0.94	0.76	1.16	0.71	0.54	0.49	0.67	0.64	0.42	0.65	0.64	0.82	0.89	0.67	1.80	1.88	1.22	1.92	1.45
10-P	0.34	0.38	0.35	0.51	0.55	0.49	0.51	0.33	0.58	0.57	0.58	0.40	0.50	0.65	0.49	0.36	0.30	0.32	0.41	0.21	0.38	0.35	0.51	0.61	0.36	0.91	1.14	0.89	1.33	0.49
Min	0.28	0.31	0.26	0.42	0.37	0.13	0.44	0.23	0.41	0.46	0.36	0.33	0.40	0.60	0.13	0.25	0.21	0.30	0.39	0.14	0.24	0.25	0.41	0.49	0.20	0.82	0.75	0.86	1.29	0.38
Mittelwert	0.55	0.58	0.71	0.81	0.89	0.77	0.89	0.56	1.01	0.97	0.89	1.02	0.96	1.41	0.81	0.70	0.64	0.91	0.80	0.48	0.83	0.68	0.89	1.14	0.68	2.08	2.00	1.55	1.99	2.16

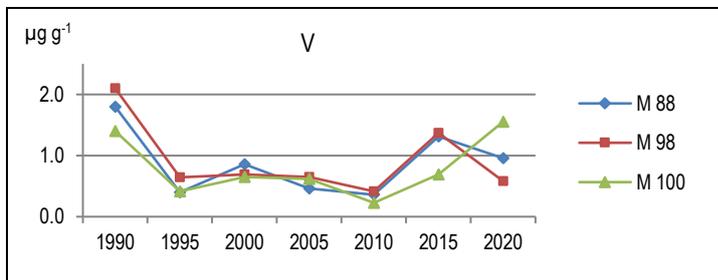


Abbildung 28 Vanadium: 1990 bis 2020
Verlauf der Vanadium Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.1.8 Zn – Zink

Atommasse 65.34 u, Dichte 7.13 g cm⁻¹

Vorkommen, Gewinnung und Verwendung

Der durchschnittliche Zinkgehalt in der Erdkruste beträgt ca. 83 g t⁻¹. Es sind mehr als 80 Zinkminerale bekannt, kommerziell werden vor allem Sulfide zur Gewinnung verwendet (Merian 1984, Trueb 1996). Die weltweite Zinkproduktion betrug 2019 ca. 12.7 Mio Tonnen (U.S. Geological Survey 2021).

Zink und seine Verbindungen werden in vielen Produkten verwendet. Die wichtigste Verwendung ist der Korrosionsschutz von Eisen- und Stahlprodukten. Wichtig sind auch Legierungen (z.B. Messing). Zinkoxid wird zum Vulkanisieren, für Katalysatoren, für Pigmente, für das Fotokopieren und in der Wundheilung verwendet. Weitere Verbindungen werden in Trockenbatterien, als Leuchtstoffe, Schmiermittel, Fungizide und vieles mehr eingesetzt (Merian 1984, Trueb 1996)

Emissionssituation

Die Hauptquellen der anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre sind Staub-Emissionen aus Produktion und Verarbeitung sowie aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. In den siebziger Jahren wurden die anthropogenen Emissionen weltweit auf 840'000 t Jahr⁻¹ geschätzt, die natürlichen auf 35'800 t Jahr⁻¹ (Lantzy & Mackenzie 1979). In Pacyna & Pacyna (2001) werden für 1983 132'000 t Jahr⁻¹ und 1995 57'000 t Jahr⁻¹ anthropogene Emissionen geschätzt, die natürlichen auf 45'000 t Jahr⁻¹. Die hohen anthropogen bedingten Emissionen zeigten sich auch in der Studie von Thöni et al. (1999): Zink war im Depositionsstaub 5 bis 16x konzentrierter als in der Erdkruste. In Europa wurden 1995 7'700 t Jahr⁻¹ emittiert. In der Schweiz stammten 1970 90 % der Zinkemissionen aus Industrie und Gewerbe. Seither sind sie dank emissionsmindernden Massnahmen bei Stahlwerken und Kehrichtverbrennungsanlagen rückläufig. Der gegenläufige Trend ist beim Emittenten Verkehr zu finden (Benzinverbrauch, Reifenabrieb). Im Gesamten sind die Zinkemissionen jedoch rückläufig. 1970 gelangten in der Schweiz 1'750 t Zink pro Jahr in die Atmosphäre, 1980 1'280 t Jahr⁻¹, 1990 860 t Jahr⁻¹ und 1995 wurde der Zinkausstoss noch auf 629 t Jahr⁻¹ geschätzt, wobei derjenige aus dem Verkehr mit 301 t Jahr⁻¹ fast gleich hoch war wie derjenige aus Industrie und Gewerbe mit 322 t Jahr⁻¹ (BU-WAL 1995). Für 2000 wurden total noch 558 t Jahr⁻¹ angegeben (Hettelingh et al. 2006)

Toxizität und Grenzwerte

Pflanzen: Zink ist ein sehr wichtiger essentieller Pflanzennährstoff. Bekannter als toxische Effekte sind Mangelkrankheiten bei Pflanzen. Toxische Effekte sind bei hohen Bodenbelastungen gefunden worden (Merian 1984, Bergmann 1988).

Tiere und Mensch: Zink ist auch für Tier und Mensch ein unentbehrliches Element. Störungen im Zinkhaushalt sind praktisch immer eine Folge von Zinkmangel und nicht von zu hoher Belastung. Toxische Wirkungen bei normaler Ernährung sind nicht zu erwarten. Bei Überdosierung (z.B. durch Nahrungsergänzungsmittel) können zu einer Interferenz mit dem Kupferstoffwechsel führen. (Vohr 2010).

Grenzwerte:	- Immissionsgrenzwert	
	Staubniederschlag (Jahresmittelwert)	400 µg m ⁻² Tag ⁻¹
	- Bodenrichtwert (Totalgehalt)	150 mg kg ⁻¹ TS
	- Qualitätsziel oberirdische Gewässer	0.02 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Einleitung in Gewässer	2 mg l ⁻¹ (gesamt)
	- Toleranzwert Trinkwasser	5 mg l ⁻¹

Resultate und Diskussion

Abbildung 29 zeigt in Karten dargestellt die Messwerte im Kanton Thurgau von 2001, 2005, 2010, 2015 und 2020, in Abbildung 30 und Tabelle 8 sind die Vergleiche mit Schweizer Daten aufgezeigt.

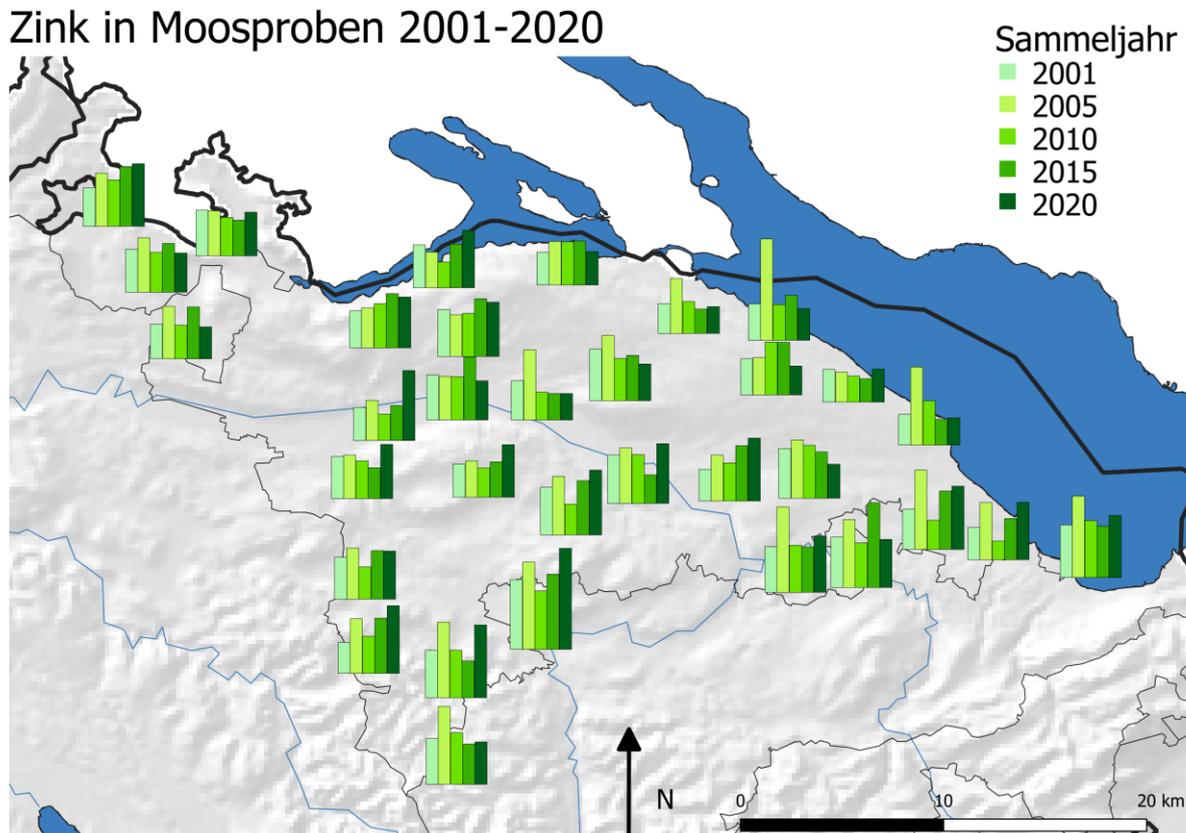


Abbildung 29 Balkendiagramme der Zinkkonzentrationen an den einzelnen Standorten im Kt. Thurgau 2001, 2005, 2010, 2015, 2020
 Die Höhe der Balken ist proportional zu den Messwerten (Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ Moos TS). Balkenhöhe ist auf den Maximalwert aller Perioden skaliert. Der höchste Wert wurde 2005 gemessen und beträgt $59.9 \mu\text{g g}^{-1}$

Die Konzentrationen von Zink im Kanton Thurgau sind ähnlich wie diejenigen vom Mittelland. Jura, Nordalpen und Zentralalpen zeigen etwas tiefere, die Südalpen deutlich höhere Werte.

Im Kanton Thurgau wie überall in der Schweiz ausser im Jura, nahmen die Zink-Konzentrationen zwischen 2001 und 2005 zu und dann im Jahr 2010 wieder ab. Seit 2010 bis 2020 zeigen der Kanton Thurgau, wie auch das Mittelland und die Nordalpen wieder eine Zunahme in der Zink-Konzentration, wohingegen der Jura und die Zentralalpen keine grossen Änderungen seit 2010 zu verzeichnen haben und die Südalpen sogar einen abnehmenden Trend zeigen.

An den 3 Standorten im Thurgau, die bereits seit 1990 im Rahmen der gesamtschweizerischen Studie beprobt wurden, zeigte sich ein stabilisierender Trend (Abbildung 31).

Aufgrund der Mooskonzentration wurden Abschätzungen gemacht, wie hoch die Zink-Deposition im Kanton Thurgau an quellenfernen Standorten ist (Tabelle 9). Die geschätzten Werte liegen unterhalb des LRV-Grenzwertes.

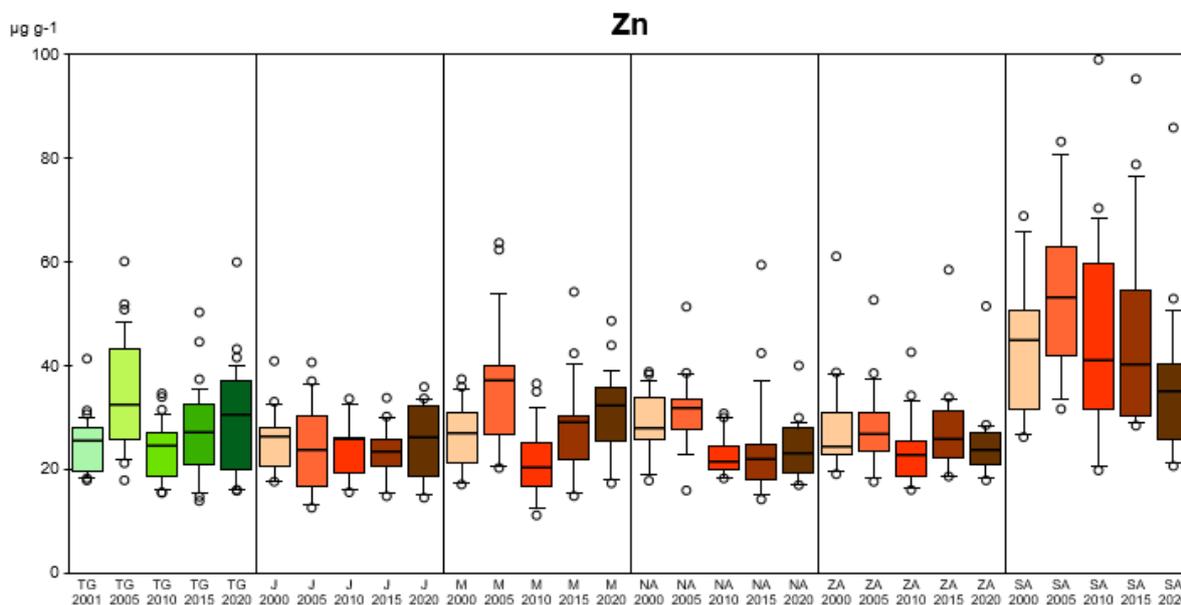


Abbildung 30 Zink: Boxplot-Vergleich
Vergleich der 5 Perioden untereinander und mit Werten aus der übrigen Schweiz.

Tabelle 8 Zink: Eckdaten
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte aufgeteilt nach Messperioden und Regionen

Zn	TG					M					J					NA					ZA					SA				
µg g ⁻¹	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020	2000	2005	2010	2015	2020
Anz. Werte	30	30	30	30	30	7	19	19	19	19	12	12	12	12	12	16	16	16	16	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Max	41	60	35	50	60	36	64	36	54	48	41	41	170	34	36	39	51	31	59	40	61	53	42	58	51	117	179	99	95	86
90-P	30	48	31	36	40	34	55	32	40	39	33	37	33	30	33	37	42	30	38	29	38	40	33	34	28	67	81	69	77	51
Median	25	33	24	27	31	25	37	20	29	30	26	24	26	24	26	29	32	22	22	23	24	28	23	26	24	45	53	41	40	35
10-P	19	23	17	16	19	17	22	14	16	19	18	15	17	18	17	20	27	19	16	17	21	22	18	19	19	29	38	24	30	23
Min	18	18	15	14	16	14	20	11	15	17	18	12	15	15	14	18	16	18	14	17	19	18	16	19	18	26	32	20	28	21
Mittelwert	25	35	24	27	30	25	37	22	29	31	26	25	36	24	26	29	33	23	25	24	29	30	24	28	25	49	63	47	48	38

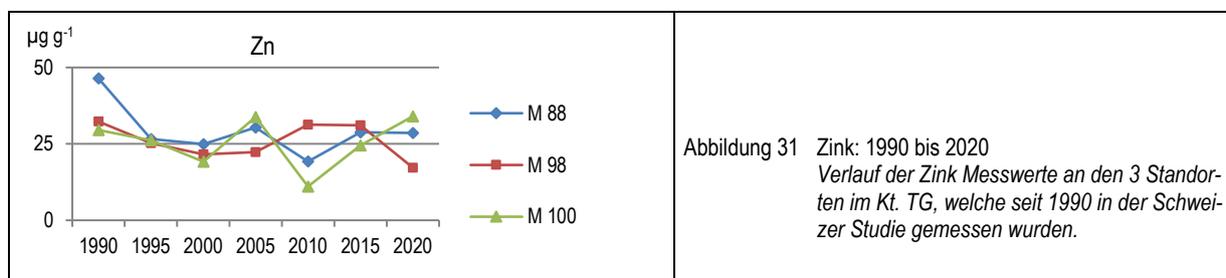


Abbildung 31 Zink: 1990 bis 2020
Verlauf der Zink Messwerte an den 3 Standorten im Kt. TG, welche seit 1990 in der Schweizer Studie gemessen wurden.

5.2 Abschätzung der Deposition

Mit Hilfe der Vergleichsuntersuchungen von Schwermetallen in Moosen und in der Deposition (mit Bergerhoff erfasst) (Thöni et al. 1996, Thöni & Seitler 2004), kann aus den Mooskonzentrationen die Deposition der Metalle grob abgeschätzt werden (siehe auch Abbildung 2). Im Anhang 8.1.4 sind die geschätzten Werte aufgelistet. Tabelle 9 zeigt die Mediane, die Maximal-, Minimal- und Mittelwerte und die 90er- und 10er-Perzentilen der Schätzwerte. Die Resultate sind meist in der gleichen Größenordnung wie diejenigen, die im NABEL-Netz an ländlichen Standorten unter 1000 m gemessen wurden (BAFU/Empa 2021), wie zum Beispiel in Magadino 2020: As: 0.34, Cd: 0.44, Cu: 5.4, Ni: 1.73, Pb: 2.1, Zn: 18 $\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Lediglich die Zink-Konzentrationen sind im Kt. Thurgau deutlich höher und entsprechen eher den Verkehrsnahen oder Vorstädtischen Standorten.

Die Schwermetalldeposition ist im Kanton Thurgau allgemein relativ tief. Bei den Elementen Cadmium, Blei und Zink existiert ein LRV-Grenzwert, der mit den geschätzten Depositionsfrachten verglichen werden kann (siehe Tabelle 9). Die Thurgauer Werte liegen an emittentenerfernen Standorten bei allen drei Schwermetallen deutlich darunter.

Tabelle 9 Geschätzte Depositionsfrachten an emittentenerfernen Standorten im Kanton Thurgau zusammengefasst aus 33 Werten

$\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	As					Cd					Cr					Cu				
	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020
Moos (TG)																				
Max	0.33	0.69	0.99	0.64	0.54	0.37	0.41	0.32	0.43	0.72	2.09	5.93	3.22	2.19	2.88	9.2	11.3	11.1	9.9	10.1
90-P	0.30	0.35	0.40	0.32	0.41	0.27	0.22	0.28	0.25	0.22	1.13	1.42	1.08	1.03	1.76	6.6	7.6	7.1	8.5	8.6
Median	0.24	0.27	0.24	0.27	0.29	0.16	0.14	0.17	0.15	0.16	0.72	0.66	0.51	0.74	0.87	5.7	6.4	6.1	7.4	7.0
10-P	0.21	0.25	0.21	0.23	0.25	0.09	0.08	0.09	0.08	0.07	0.61	0.53	0.30	0.53	0.73	5.2	5.9	5.6	6.6	6.0
Min	0.20	0.23	0.19	0.21	0.23	0.06	0.07	0.05	0.03	0.05	0.54	0.34	0.23	0.49	0.43	4.8	5.2	5.0	6.2	5.2
Mittelwert	0.25	0.31	0.29	0.28	0.32	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17	0.81	0.98	0.64	0.80	1.09	6.0	6.7	6.4	7.5	7.1
LRV-Grenzwert	2																			
$\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	Ni					Pb					V					Zn				
	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020
Moos (TG)																				
Max	1.17	4.33	2.89	7.12	5.50	15.6	19.3	6.8	6.9	7.6	0.87	1.84	2.09	2.22	2.09	40.9	62.1	33.3	51.0	62.0
90-P	0.90	2.70	2.23	1.42	1.88	6.1	6.6	5.5	4.3	5.6	0.80	0.72	1.17	1.15	1.19	27.9	48.4	29.5	34.0	39.1
Median	0.59	1.30	0.83	0.84	1.01	4.3	4.5	3.3	3.3	2.7	0.53	0.50	0.49	0.67	0.73	22.3	30.9	20.9	24.6	28.4
10-P	0.34	0.77	0.43	0.51	0.39	3.2	3.3	2.5	1.8	1.7	0.37	0.40	0.36	0.52	0.55	15.4	19.7	12.2	12.2	14.0
Min	0.21	0.49	0.26	0.15	0.29	2.3	2.5	2.1	1.7	1.3	0.32	0.34	0.27	0.44	0.39	14.2	14.3	6.6	9.7	12.0
Mittelwert	0.61	1.52	1.03	1.07	1.24	4.7	5.1	3.6	3.3	3.1	0.56	0.57	0.65	0.78	0.83	21.9	32.8	20.7	25.1	27.5
LRV-Grenzwert						100										400				

6 Schlussfolgerungen

Die Schätzung der Schwermetalldeposition (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) mit Hilfe der Moose zeigt, dass an emittentfernen Standorten des Kantons Thurgau keine grosse Belastung zu erwarten ist. Die Konzentrationen im Moos des Kantons Thurgau waren im Vergleich zu der restlichen Schweiz im ähnlichen Rahmen wie in im Jura, Mittelland und Nordalpen. Die Standorte des Kt. Thurgau gehören über alle Standorte gesehen eher zu den nicht stark belasteten Standorten der Schweiz. Die Unterschiede der einzelnen Schwermetallbelastungen zwischen den vergangenen fünf Perioden sind meist nicht gross (siehe auch Abbildung 1, Gesamtbelastung in der Zusammenfassung).

Die Konzentrationen der untersuchten Schwermetalle zeigen Unterschiede in ihrem zeitlichen Verlauf. Einzelne Elemente (As, Cr, V und Zn) zeigen seit 2010 einen Anstieg in der Konzentration, wohingegen Pb seit Beginn der Messungen eine stetige Abnahme verzeichnet. Cd und Ni hingegen scheinen sich auf einem Niveau einzupendeln und Cu weist nach einem Anstieg zwischen 2010 und 2015 wieder tiefere Werte in der Messperiode 2020 auf.

Deutliche Verminderungen gab es aber seit den ersten Messungen von 1990 (=100 %) bei den Elementen As 58 %, Cd 70 %, Ni 43 %, Pb 85 %, V 42 %. Bei Cu, Cr und Zn sind die Änderungen nicht einheitlich bzw. weisen z.T. grössere Schwankungen von Periode zu Periode auf.

Bei den Elementen Cd, Pb und Zn, konnte die aus den Mooskonzentrationen geschätzte Deposition mit dem LRV-Grenzwert verglichen werden. Die Werte lagen deutlich darunter.

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass mit der relativ günstigen „Moos-Methode“ sowohl regionale Unterschiede wie auch zeitliche Entwicklungen der Deposition von Metallen gut geschätzt werden können. Es können damit Rückschlüsse auf die Emissionen gezogen werden. So konnte bei Elementen, bei welchen spezifische Massnahmen ergriffen wurden (As: Verbot von Bioziden und Malpigmenten, Cd: Sanierung KVAs, Ni: Sanierung von Metallindustrien, Pb: Bleifreies Benzin, V: Minderung Schweröverbrennung usw.), entsprechende Konzentrationsreduktion mit den Moosanalysen dokumentiert werden. Die Moosmethode ist damit ein kostengünstiges Mittel für die Erfolgskontrolle von Massnahmen im Umweltschutz.

7 Literatur

- BAFU/Empa 2021: NABEL – Luftbelastung 2014. Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe NABEL. Messergebnisse 2020. Zusammengefasst im Bericht Umweltzustand 2114, 2021.
- Berg, T., Røyset, O., Steinnes, E. 1995: Moss (*Hylocomium splendens*) used as biomonitor of atmospheric trace element deposition: estimation of uptake efficiencies. *Atmospheric Environment* 29, 353-360
- Bergmann, W. (ed.) 1988: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 762 S.
- Bronzetti, G., Galli, A. 1992: Vanadium: An element with rediscovered interest, particularly regarding metabolism a mutagenicity. *Metal compounds in environment and life* 4, 207-211
- Buse, A., Norris D., Harmens, H., Büker, P., Ashenden, T., Mills, G. 2003: Heavy Metals in European Mosses: 2000/2001 Survey. ICP Vegetation Coordination Centre, CEH Bangor, UK. ISBN: 1 870393 70 8
- BUWAL 1995: Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 256, BUWAL, Bern 1995, 121 S.
- EMEP/CEIP 2014 Present state of emission data:
http://www.ceip.at/webdab_emepdatabase/reported_emissiondata/
- FOEN 2021: Switzerland's informative inventory report 2021 (IIR). Submission of March 2021 to the United Nations ECE Secretariat. www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/Switzerlands-Informative-Inventory-Report-2019.pdf.download.pdf/switzerlands-informative-rep-2021.pdf
- Frontasyeva, M., Harmens, H., Uzhisky, A., Chaligava, O. and the participants of the moss survey 2020: Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation, 136 pp. ISBN 978-5-9530-0508-1
<https://icpvegetation.ceh.ac.uk/sites/default/files/REPORT-Frontasyeva.pdf>
- Garg, N., Singla, P. 2011: Arsenic toxicity in crop plants: physiological effects and tolerance mechanisms. *Environmental Chemistry Letters* 9, 303-321. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10311-011-0313-7>
- Gydesen, H., Pilegaard, K., Rasmussen, L., Rühling, Å. 1983: Moss analysis used as a mean of surveying the atmospheric heavy metal deposition in Sweden, Denmark and Greenland 1980. National Swedish Environmental Protection Board - Bulletin, ssv pm 1670, 44 S.
- Harmens, H., Norris, D. and the participants of the moss survey 2008: Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in Mosses in Europe (1990-2005). ICP Vegetation Coordination Centre, Centre of Ecology and Hydrology (CEH) Bangor, UK. ISBN: 1 870393 70 8. <http://icpvegetation.ceh.ac.uk>
- Harmens, H., Norris, D., Mills, G. and the participants of the moss survey 2013: Heavy metals and nitrogen in mosses: spatial patterns 2010/2011 and long-term temporal trends in Europe. ICP Vegetation Programme Coordination Centre, Centre of Ecology and Hydrology (CEH) Bangor, UK. ISBN: 978-1-906698-38-670 8. <http://icpvegetation.ceh.ac.uk>
- Hettelingh, J.P., Sliggers, J., van het Blocher, M., Denier van der Gon, H., Groenenberg, B.J., Ilyin, I., Reinds, G.J., Sloothweg, J., Travníkov, O., Visschedijk, A., de Vries, W. 2006. Heavy Metal Emissions, Depositions, Critical Loads and Exceedances in Europe,
http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/TaskForce/tfhm/COMBINED_HM_REPORT.pdf
- IARC-Monographs 2012 – (International Agency for Research on Cancer): IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risks to humans. Vol. 100 C, Arsenic, Metals, Fibers and Dusts Lyon, France, 2012.
- Kosonen, Z., Thöni, L., Seitler, E. 2016: Deposition von Luftschadstoffen im Kanton Thurgau – Moosanalysen 2001 bis 2015. Bericht an das Amt für Umweltschutz Kt. TG. 48 Seiten
- Kosonen, Z., Thimonier, A., Schnyder, E., Thöni L. 2018. Nitrogen concentration in moss compared with N load in precipitation and with total N deposition in Switzerland. *Environmental Pollution* 239, 169-178
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.063>
- Lantzy, R.J., Mackenzie, F.T. 1979: Atmospheric trace metals: global cycles and assessment of man's impact. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, 511-525

- Merian, E. (ed.) 1984: *Metalle in der Umwelt, Verteilung, Analytik und biologische Relevanz*. Verlag Chemie, Weinheim, 722 S.
- Pacyna, E.G., Barret, K.J., Pacyna, J.M. 2002: Comparison of emissions with concentrations in the air and precipitation of Mercury, Lead and Cadmium measured at selected EMEP Stations. EMEP/CCC-Note 1, 15pp
- Pacyna, J.M., Pacyna, E.G. 2001: An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Canadian Journal of Environmental Reviews (Environ. Rev.)* 9, 269-298
- Pacyna, E.G., Pacyna, J.M., Fudalac, J., Strzelecka-Jastrzabc, E., Hlawiczka, S., Panasiuk, D., Nittere, S., Peggere, T., Pfeiffer, H., Friedrich R. 2007: Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe. *Atmospheric Environment* Vol 41, 38 p. 8557-8566
- Rösler, H.J., Lange H. 1975: *Geochemische Tabellen*. 2. edit., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 675 S.
- Ross, H.B. 1990: On the use of mosses (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) for estimating atmospheric trace metal deposition. *Water, Air, Soil Pollution* 50, 63-76
- Rühling, Å., Tyler, G. 1973: Heavy metal deposition in Scandinavia. *Water, Air, Soil Pollution* 2, 445-455
- Rühling, Å., Tyler, G. 1984: Recent changes in the deposition of heavy metals in northern Europe. *Water, Air, Soil Pollution* 22, 173-180
- Rühling, Å., Rasmussen, L., Pilegaard, K., Mäkinen, A., Steinnes, E. 1987: Survey of atmospheric heavy metal deposition in the Nordic countries in 1985 - monitored by moss analyses. *NORD* 1987: 21, 44 S.
- Rühling, Å. (ed.) 1994: Atmospheric heavy metal deposition in Europe - estimations based on moss analysis. *NORD* 1994: 9, 53 S.
- Rühling, Å., Steinnes, E. (ed) 1998: Atmospheric heavy metal deposition in Europe 1995-1996. *NORD* 1998: 15, 66 S.
- Scheffer, P., Schachtschabel, P., 1984: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 11. Auflage Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 491 S.
- Schmid-Grob, I., Thöni, L., Hertz, J. 1993: Bestimmung der Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz mit Moosanalysen. *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 194 - Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (ed.), Bern, Januar 1993, 173 S.
- Steinnes, E. 1985: Use of mosses in heavy metal deposition studies. EMEP/CCC-Report 3/85, 161-170
- Steinnes, E., Rühling, Å., Lippo, H., Mäkinen, A. 1997: Reference materials for large-scale metal deposition surveys. *Accred Qual Assur* 2, 343-249
- Stoeppler, M., 1991: Cadmium. In: Merian, E. (ed.): *Metals and their compounds in the environment – occurrence, analysis and biological relevance*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 803-851
- Thöni, L. 1996: Vergleich der Elementkonzentrationen in drei Biomonitormoosen untereinander und mit Depositionsfrachten im Bultsammler nach Bergerhoff. *BUWAL* (ed.), Bern, Juli 1996, 89 S.
- Thöni, L. 1998: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990 / 1995. *Umwelt-Materialien* Nr. 101 – Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Bern (ed) 1998, 119 S.
- Thöni, L., Krieg, F., Siewers, U. 1999: Testing the Bergerhoff method to determine the bulk deposition loads of 49 elements. *Atmospheric Environment* 33, 337-344
- Thöni, L., Seitler, E. 2001: Deposition von Luftschadstoffen im Kanton Thurgau – Moosanalysen 2001. Bericht an das Amt für Umweltschutz Kt. TG. 56 Seiten
- Thöni, L., Seitler, E. 2004: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990 - 2000. *Umwelt-Materialien* Nr. 180 – Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Bern (ed) 2004, 140 S.
- Thöni, L., Matthaei, D. 2006: Deposition von Luftschadstoffen im Kanton Thurgau – Moosanalysen 2001 und 2005. Bericht an das Amt für Umweltschutz Kt. TG. 62 Seiten

- Thöni, L., Seitler, E. 2008: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990 - 2005. Umwelt-Zustand Nr 0827 – Luft, Bundesamt für Umwelt, Bern (ed), 150 S.
- Thöni, L., Seitler, E. 2011: Deposition von Luftschadstoffen im Kanton Thurgau – Moosanalysen 2001, 2005, und 2010. Bericht an das Amt für Umweltschutz Kt. TG. 52 Seiten
- Thöni, L., Seitler, E., Schnyder, E., Ehrenmann, J. 2013: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990 - 2010. Umwelt-Zustand Nr 1328 – Luft, Bundesamt für Umwelt, Bern (ed), 170 S.
- Thöni, L., Kosonen, Z. 2018: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz – Moosanalysen 1990 - 2015. Umwelt-Zustand Nr 1818 – Luft, Bundesamt für Umwelt, Bern (ed), 134 S.
- Trueb, L.F. (ed.), 1996: Die chemischen Elemente. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, Leipzig, 416 S.
- U.S. Geological Survey 2021: Minerals Commodity Summaries – 2021. U.S. Department of the Interior <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- VDZ, Verein Deutscher Zementwerke e.V. 1999: Die Bedeutung des Chromates in Zementen und zementhaltigen Zubereitungen. Sachstandsbericht, Fassung vom 5.1.1999, 77 S.
- Vohr, H-W. (ed) 2010: Toxikologie, Band 2: Toxikologie der Stoffe. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. ISBN 978-3-527-32385-2, 295 S.
- Von Arx, U. 2006 : Kupfer: Verbrauch, Umwelteinträge und Vorkommen. Umweltwissen Nr. 0601, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

8 Anhang

8.1 Geografische Angaben und Werte, tabellarisch

8.1.1 Legende

Region:	TG: Kanton Thurgau
	M: Mittelland
	J: Jura
	NA: Nordalpen
	ZA: Zentralalpen
	SA: Südalpen
LK-Nr.:	Nummern der Landeskarten 1:25'000
Koordinaten:	Schweizerische Landeskoordinaten
Topog.:	Topographie:
	E: Ebene
	H: Hang
Moosarten:	Hc: <i>Hypnum cupressiforme</i>

Berechnung Deposition

M:	Konzentration im Moos in $\mu\text{g g}^{-1}$
D:	Depositionsfracht in $\mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$
s:	Steigung
a:	Achsenabschnitt

Standortdaten (inkl. Koordinaten) und Qualitätsuntersuchungen von 2001, 2005, 2010 resp. 2015 sind in den Berichten Thöni & Seitler (2001), Thöni & Matthaei (2006), Thöni & Seitler (2011) und Kosonen, Thöni & Seitler (2016) zu finden.

8.1.2 Geografische Angaben zu den Standorten

Tabelle 10 Standortangaben 2020

Moosart: *Hypnum cupressiforme* (Hc)

Standort	Gemeinde	Flurname	LK_NR	Koordinaten 2020		Höhe m ü. M	Topo- graphie	Stao 2005 zu	Stao 2010 zu	Stao 2015 zu	Stao 2020 zu
				Stao 2001	Stao 2005			Stao 2010	Stao 2015		
TG 1	Warth-Weiningen	Tootebüel	1053	710.52	271.83	440	Ebene	2	1	±1	±1
TG 2	Basadingen-Schlattingen	Brandhölzli	1032	698.73	278.66	445	Ebene	±1	2	1	1
TG 3	Schlatt	Schaare	1032	694.36	282.62	402	Ebene	1	1	1	±1
TG 4	Tobel-Tägersche	Looholz	1073	719.87	262.46	596	Ebene	±1	±1	1	1
TG 5	Bichelsee-Balterswil	Hackebärg	1073	713.24	256.20	675	Hang	±1	±1	1	±1
TG 6	Fischingen	Stadelbärg	1093	714.29	251.34	626	Hang	2	1	1	1
TG 7	Horn	Homer Wäldli	1075	752.72	261.45	407	Ebene	1	±1	1	1
TG 8	Egnach	Winderholz	1075	745.14	263.15	499	Hang	1	1	1	±1
TG 9	Romanshorn	Hootschwiiler Hau	1055	743.06	269.45	436	Ebene	±1	2	1	±1
TG 10	Kesswil	Manewis	1054	740.39	272.02	465	Ebene	1	1	±1	±1
TG 11	Zhilschlacht-Sitterdorf	Hudelmoos	1074	739.02	265.33	515	Ebene	±1	1	1	1
TG 12	Kemmental	Bömmerstig	1054	728.70	276.17	537	Ebene	±1	1	±1	±1
TG 13	Pfyn	Hörnliwald	1053	710.26	275.30	519	Ebene	±1	1	1	2
TG 14	Münsterlingen	Langholz	1054	734.10	275.76	493	Hang	±1	1	1	2
TG 15	Erlen	Höölmos	1054	735.90	266.24	545	Ebene	±1	±1	1	±1
TG 16	Bischofszell	Bischofsberg	1074	735.53	260.56	578	Hang	2	1	1	1
TG 17	Märstetten	Waad	1054	724.61	272.11	604	Ebene	1	2	3	±1
TG 18	Sulgen	Auholz	1054	731.14	266.07	448	Ebene	1	2	±1	±1
TG 19	Salenstein	Roggwilen	1033	721.45	279.08	516	Ebene	±1	±1	1	2
TG 20	Affeltrangen	Geierholz	1073	721.66	264.03	598	Hang	1	1	2	2
TG 21	Steckborn	Schmeller Winter-Halde	1033	714.07	278.91	516	Ebene	2	±1	1	2
TG 22	Müllheim		1053	717.37	274.79	498	Hang	1	1	1	2
TG 23	Bussnang	Eichholz	1074	725.68	265.93	545	Ebene	±1	1	2	±1
TG 24	Wigoltingen	Tuurvorland	1053	721.77	270.95	416	Ebene	±1	1	±1	±1
TG 25	Pfyn	Huewise	1053	714.89	274.28	476	Ebene	1	1	1	2
TG 26	Thundorf	Ganter	1053	716.46	266.29	622	Kuppe	1	1	1	±1
TG 27	Neunforn	Grüe	1052	698.38	274.63	470	Hang	±1	1	1	1
TG 28	Diessenhofen	Rodebärg	1032	701.09	280.84	520	Hang	±1	1	2	2
TG 29	Frauenfeld	Hungersbüel	1053	709.19	266.21	502	Ebene	±1	1	1	2
TG 30	Fischingen	Walteschberg	1073	714.79	254.22	633	Hang	1	1	1	±1
M 88	Aadorf	Späggholz	1054	733.63	272.86	550	Ebene	1	1	1	±1
M 98	Längwil	Brandforen	1073	709.37	260.14	606	Hang	1	±1	±1	±1
M 100	Roggwil	Walchi	1075	747.19	262.53	476	Hang	2	1	±1	±1

Legende zu den Spalten "Stao 2005 zu 2001" bis Stao "2020 zu Stao 2015"

1 = gleicher Standort wie in der Vorperiode

±1 = vergleichbarer Standort wie in der Vorperiode oder in der Nähe des letzten Standorts aber nicht genau am gleichen Ort

2 = bedingt vergleichbarer Standort im Vergleich zum Standort der Vorperiode

3 = Standort nicht gleich der in der Vorperiode

8.1.3 Elementkonzentrationen: Einzelwerte

Tabelle 11 Elementkonzentrationen
Einzelwerte, Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte. Bei den relativ hohen kursiven und mit Farbe unterlegten Werten, welche nicht zu den übrigen Messwerten des Standortes in der Zeitreihe zu passen scheinen, kann es sich um Kontamination mit u.a. Staub handeln.

Moos (TG)	As								Cd								Cr								Cu								Ni								Pb								V								Zn							
	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020																			
TG 1	0.12	0.11	0.14	0.13	0.13	0.06	0.17	0.10	0.09	0.18	1.03	0.84	0.74	0.87	1.00	3.6	3.2	3.2	3.6	5.3	0.60	1.47	2.46	0.88	1.19	1.8	2.0	1.9	1.0	1.8	0.58	0.48	0.82	1.07	0.75	19.6	23.8	15.8	20.7	41.4																								
TG 2	0.09	0.10	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.15	0.45	0.10	0.94	0.82	0.34	0.64	0.98	3.1	3.0	3.0	4.3	3.8	0.83	1.52	0.75	1.11	1.23	2.2	2.0	1.4	1.6	1.2	0.63	0.47	0.41	0.61	0.77	25.5	32.1	23.6	28.9	23.3																								
TG 3	0.12	0.10	0.09	0.12	0.19	0.09	0.14	0.27	0.18	0.20	0.81	0.59	0.34	0.78	1.27	2.4	3.6	3.4	4.5	4.2	0.71	1.12	0.92	1.40	2.11	2.9	1.5	1.7	1.7	1.7	0.60	0.36	0.47	0.67	0.94	22.8	31.6	27.5	35.4	37.0																								
TG 4	0.06	0.10	0.08	0.15	0.20	0.17	0.12	0.18	0.24	0.17	0.65	0.61	0.32	0.95	1.87	2.5	3.9	3.2	5.3	4.0	0.68	1.11	0.72	1.45	1.60	2.0	3.0	2.0	2.0	0.38	0.46	0.35	0.95	1.38	41.2	51.7	34.5	44.5	58.8																									
TG 5	0.06	0.08	0.06	0.10	0.14	0.14	0.13	0.25	0.19	0.18	0.82	0.70	0.41	0.81	1.29	2.8	3.3	4.1	4.4	5.7	0.63	1.20	1.23	1.19	1.90	2.6	3.0	1.9	2.1	2.2	0.43	0.38	0.43	0.66	0.86	18.3	32.4	22.0	32.7	40.0																								
TG 6	0.14	0.15	0.12	0.11	0.10	0.14	0.22	0.23	0.17	0.10	1.42	1.06	0.72	0.92	0.83	4.6	4.5	4.3	4.5	4.4	1.35	1.72	1.61	1.06	1.10	3.3	2.4	4.0	1.9	1.3	0.94	0.63	0.90	0.84	0.55	27.0	46.1	30.6	23.9	25.1																								
TG 7	0.16	0.47	0.31	0.45	0.17	0.13	0.14	0.15	0.13	0.08	1.40	3.55	1.13	2.58	1.77	4.7	7.8	7.6	5.8	6.8	0.94	4.20	1.04	1.45	1.30	3.7	4.4	3.2	4.0	4.4	0.76	0.79	1.22	2.57	0.77	31.2	48.1	33.8	30.5	36.8																								
TG 8	0.09	0.10	0.10	0.08	0.10	0.35	0.23	0.16	0.26	0.18	0.89	0.67	0.75	0.59	0.76	6.0	4.3	2.5	4.8	4.6	0.57	1.55	0.59	0.77	0.61	4.1	3.9	2.5	2.4	2.0	0.49	0.50	0.93	0.44	0.54	23.9	46.9	17.4	34.6	37.4																								
TG 9	0.05	0.10	0.06	0.09	0.11	0.12	0.42	0.21	0.09	0.07	0.77	0.99	0.32	0.68	0.88	3.1	3.8	3.2	4.5	3.9	0.64	1.72	0.79	1.23	0.82	1.3	2.1	1.2	1.1	1.3	0.28	0.40	0.32	0.58	0.68	18.2	46.1	26.3	15.4	16.1																								
TG 10	0.07	0.11	0.09	0.09	0.13	0.13	0.08	0.06	0.08	0.17	0.78	0.67	0.59	0.85	0.90	2.9	3.6	4.3	3.8	3.2	1.03	0.98	0.78	0.63	1.04	1.6	1.9	2.0	1.0	1.3	0.34	0.31	0.61	0.59	0.71	19.4	17.8	15.5	13.8	19.6																								
TG 11	0.05	0.11	0.05	0.12	0.14	0.15	0.14	0.23	0.17	0.19	0.74	0.67	0.33	0.74	0.89	3.1	4.0	3.9	4.1	4.1	0.61	0.99	0.80	0.44	0.56	2.3	3.8	1.9	1.8	1.5	0.34	0.57	0.35	0.54	0.63	29.9	40.2	26.5	50.2	28.6																								
TG 12	0.10	0.09	0.10	0.09	0.12	0.19	0.16	0.11	0.09	0.09	0.87	0.77	0.61	0.63	0.95	3.1	4.7	4.1	4.0	3.4	0.78	1.75	1.34	1.56	0.87	1.9	2.4	1.7	1.9	1.0	0.44	0.40	0.64	0.52	0.80	17.8	32.6	18.9	14.6	16.0																								
TG 13	0.07	0.11	0.07	0.15	0.12	0.10	0.14	0.21	0.23	0.19	0.70	0.65	0.45	0.77	2.87	2.7	3.5	3.1	4.7	3.7	0.49	2.03	1.28	1.06	1.84	1.8	2.2	2.5	2.0	1.6	0.41	0.35	0.48	0.73	0.72	22.1	23.6	26.2	32.2	30.2																								
TG 14	0.08	0.16	0.06	0.16	0.28	0.20	0.15	0.18	0.19	0.17	0.77	0.93	0.23	1.12	3.42	3.4	6.0	3.5	5.2	4.7	0.81	1.37	0.72	1.11	5.25	2.6	3.4	1.6	2.0	2.0	0.48	0.69	0.26	1.14	2.41	21.7	59.9	21.1	26.6	18.8																								
TG 15	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.25	0.19	0.30	0.26	0.08	1.09	0.74	0.45	0.74	1.09	3.3	4.0	3.5	4.8	4.9	0.86	1.52	0.97	0.93	0.72	3.7	3.2	2.2	2.2	1.6	0.60	0.50	0.53	0.60	0.92	29.6	34.6	31.4	27.5	28.1																								
TG 16	0.08	0.26	0.07	0.06	0.17	0.23	0.41	0.29	0.18	0.26	0.73	0.62	0.63	0.57	0.99	3.2	4.6	4.0	3.9	4.2	0.89	1.31	1.07	0.79	1.42	2.3	3.7	3.5	2.0	3.3	0.32	0.45	0.38	0.42	0.87	27.1	50.7	27.8	26.9	33.3																								
TG 17	0.07	0.09	0.06	0.15	0.12	0.18	0.18	0.18	0.25	0.20	0.72	0.56	0.26	1.30	0.94	3.9	3.7	4.2	4.8	4.4	0.85	2.04	0.94	1.88	1.21	2.4	2.6	2.6	2.4	1.4	0.34	0.40	0.32	1.30	0.77	30.5	38.6	25.0	26.9	21.8																								
TG 18	0.09	0.09	0.16	0.13	0.20	0.10	0.07	0.09	0.08	0.05	0.95	0.68	1.09	1.13	1.28	3.6	3.8	3.8	6.3	4.6	0.54	0.74	0.68	0.75	1.06	2.5	2.5	2.0	2.5	2.1	0.53	0.49	0.86	1.20	1.14	18.7	27.3	22.6	32.8	37.3																								
TG 19	0.07	0.10	0.25	0.11	0.08	0.15	0.10	0.33	0.36	0.14	0.67	0.70	1.37	0.90	0.48	2.8	2.7	3.4	6.6	2.7	1.11	2.82	2.26	1.98	1.03	2.7	2.8	2.3	2.3	0.9	0.43	0.45	1.33	0.72	0.37	19.4	25.8	25.7	26.0	19.8																								
TG 20	0.07	0.49	0.07	0.08	0.13	0.20	0.14	0.12	0.23	0.59	0.71	2.82	0.39	0.73	1.18	3.0	4.1	3.1	4.5	5.6	0.65	2.80	0.54	1.32	1.80	2.0	4.9	1.4	2.4	3.0	0.42	2.11	0.39	0.61	0.83	0.63	28.3	34.8	18.4	32.1	38.5																							
TG 21	0.09	0.13	0.11	0.16	0.10	0.18	0.11	0.11	0.16	0.20	0.79	0.94	0.57	1.12	0.87	3.5	3.5	3.4	5.1	3.4	0.84	2.98	2.90	6.70	1.85	2.4	2.5	1.6	1.7	1.1	0.46	0.66	0.57	1.22	0.69	25.4	21.1	15.4	25.8	33.9																								
TG 22	0.09	0.12	0.12	0.11	0.11	0.31	0.15	0.20	0.15	0.15	0.69	0.75	0.72	0.84	1.07	2.9	3.6	3.6	5.2	4.7	0.77	1.01	1.07	0.96	2.00	2.8	2.0	3.6	2.1	1.4	0.43	0.48	0.83	0.70	0.77	27.7	24.7	25.4	34.1	32.2																								
TG 23	0.10	0.09	0.07	0.08	0.08	0.20	0.15	0.32	0.10	0.74	0.80	0.44	0.65	0.66	0.62	3.8	3.4	4.0	4.2	3.5	0.81	1.05	1.00	0.90	0.62	2.7	2.4	1.7	1.6	0.9	0.64	0.39	0.43	0.63	0.47	28.7	33.0	28.9	16.9	35.5																								
TG 24	0.14	0.13	0.17	0.13	0.17	0.10	0.08	0.06	0.03	0.06	2.47	0.75	0.87	1.06	1.35	3.1	3.8	3.7	4.3	3.6	0.90	0.79	0.82	0.76	0.83	2.4	2.6	1.3	1.1	1.1	0.89	0.56	0.94	1.14	1.03	23.2	41.4	16.6	15.8	15.8																								
TG 25	0.13	0.13	0.09	0.09	0.29	0.26	0.27	0.16	0.18	0.08	1.19	0.86	0.42	0.86	1.63	2.4	3.3	3.5	4.2	4.4	1.11	1.27	1.05	0.78	1.96	2.7	2.4	1.5	1.7	1.4	0.85	0.61	0.47	0.61	1.05	26.7	25.8	25.6	37.3	23.2																								
TG 26	0.11	0.14	0.23	0.07	0.14	0.21	0.15	0.11	0.18	0.10	0.97	0.93	1.75	0.55	0.90	3.0	3.3	3.1	3.5	3.1	0.83	1.45	2.31	1.58	1.06	2.3	3.0	2.1	1.1	3.4	0.67	0.78	1.40	0.45	0.68	19.7	21.7	17.3	21.0	31.1																								
TG 27	0.17	0.12	0.08	0.12	0.14	0.12	0.14	0.18	0.13	0.08	0.98	0.70	0.37	0.93	0.89	3.1	3.9	3.9	5.4	3.9	1.06	1.33	1.28	1.21	0.98	2.4	1.6	1.7	1.9	1.1	0.82	0.54	0.38	0.83	0.78	20.5	31.1	19.9	30.7	18.9																								
TG 28	0.07	0.19	0.76	0.13	0.25	0.23	0.09	0.17	0.16	0.22	0.61	0.37	3.82	0.59	1.20	3.8	3.0	4.5	4.0	4.1	0.66	2.28	2.72	0.97	1.22	2.5	3.7	2.5	1.3	1.4	0.38	0.65	2.40	0.57	1.01	27.1	26.6	22.9	21.1	25.9																								
TG 29	0.12	0.14	0.22	0.11	0.36	0.15	0.16	0.20	0.14	0.20	1.35	7.06	1.29	1.13	2.49	3.4	4.3	3.7	3.9	4.0	1.31	2.43	1.73	0.78	2.72	2.5	2.1	3.1	1.0	2.3	0.90	0.59	1.32	0.72	2.00	24.9	25.9	22.5	18.3	32.1																								
TG 30	0.11	0.17	0.09	0.10	0.13	0.23	0.12	0.07	0.12	0.07	0.99	1.38	0.53	0.93	0.94	3.0	4.8	3.5	4.5	4.3	0.92	1.68	0.57	0.82	0.73	3.0	11.3	1.8	2.1	1.6	0.82	0.95	0.53	0.76	0.69	28.0	44.7	28.1	21.8	43.1																								
M 88	0.11	0.09	0.07	0.18	0.14	0.38	0.15	0.12	0.13	0.14	0.88	0.66	0.34	1.30	1.26	3.6	3.5	3.6	4.8	4.4	1.34	1.41	1.34	1.42	1.90	2.8	1.4	1.7	2.6	2.2	0.86	0.46	0.36	1.31	0.96	24.9	30.4	19.2	28.8	28.6																								
M 98	0.12	0.17	0.11	0.15	0.09	0.19	0.16	0.20	0.15	0.06	0.83	1.74	0.65																																																			

8.1.4 Abschätzung der Elementfrachten: Einzelwerte

Tabelle 13 Abschätzung der Depositionen
Median, Mittelwert sowie Maximal-, Minimalwert, 90er- / 10er-Perzentil der Messwerte

µg m ⁻² d ⁻¹ Moos (TG)	As					Cd					Cr					Cu					Ni					Pb					V					Zn				
	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020	2001	2005	2010	2015	2020
	D=(M-(-0.13))/0.9					D=M/1.033					D=(M-(-0.04))/1.2					D=(M-(-1.6))/0.83					D=(M-(-0.3))/0.9					D=M/0.58					D=(M-(-0.1))/1.2					D=(M-(-5.2))/0.88				
TG 1	0.28	0.26	0.30	0.29	0.29	0.06	0.16	0.10	0.08	0.17	0.89	0.73	0.65	0.76	0.87	6.3	5.9	5.8	6.3	8.3	0.33	1.30	2.40	0.65	0.99	3.1	3.5	3.3	1.7	3.1	0.57	0.48	0.77	0.98	0.71	16	21	12	18	41
TG 2	0.24	0.26	0.22	0.26	0.28	0.08	0.08	0.14	0.43	0.09	0.82	0.72	0.32	0.57	0.85	5.7	5.6	5.6	7.1	6.5	0.59	1.35	0.50	0.89	1.04	3.8	3.5	2.3	2.7	2.1	0.61	0.47	0.43	0.60	0.72	23	31	21	27	20
TG 3	0.28	0.26	0.25	0.28	0.35	0.09	0.13	0.26	0.17	0.20	0.71	0.53	0.32	0.69	1.09	4.9	6.3	6.1	7.3	7.0	0.46	0.92	0.69	1.22	2.01	4.9	2.6	2.8	3.0	2.9	0.58	0.38	0.47	0.64	0.87	20	30	25	34	36
TG 4	0.21	0.25	0.24	0.31	0.37	0.16	0.12	0.17	0.24	0.16	0.58	0.54	0.30	0.82	1.59	5.0	6.6	5.8	8.3	6.8	0.42	0.90	0.47	1.27	1.45	3.4	5.2	3.4	3.4	3.5	0.40	0.47	0.38	0.88	1.23	41	53	33	45	62
TG 5	0.21	0.23	0.21	0.25	0.30	0.14	0.12	0.25	0.18	0.17	0.72	0.62	0.38	0.71	1.11	5.3	5.9	6.9	7.2	8.8	0.37	1.00	1.03	0.99	1.78	4.5	5.2	3.3	3.5	3.8	0.44	0.40	0.45	0.63	0.80	15	31	19	31	39
TG 6	0.30	0.31	0.28	0.26	0.25	0.14	0.22	0.22	0.17	0.10	1.22	0.92	0.63	0.80	0.72	7.5	7.3	7.1	7.4	7.3	1.17	1.58	1.45	0.84	0.89	5.7	4.2	6.8	3.3	2.3	0.87	0.61	0.83	0.78	0.55	25	46	29	21	23
TG 7	0.32	0.67	0.49	0.64	0.34	0.13	0.13	0.14	0.12	0.08	1.20	2.99	0.98	2.19	1.51	7.6	11.3	11.1	8.9	10.1	0.71	4.33	0.82	1.28	1.11	6.2	7.5	5.5	6.9	7.6	0.72	0.74	1.10	2.22	0.73	30	49	32	29	36
TG 8	0.24	0.26	0.26	0.23	0.26	0.34	0.22	0.16	0.26	0.17	0.78	0.59	0.66	0.53	0.67	9.2	7.1	5.0	7.8	7.5	0.30	1.39	0.32	0.53	0.35	6.9	6.6	4.3	4.1	3.3	0.49	0.50	0.86	0.45	0.54	21	47	14	33	37
TG 9	0.20	0.26	0.21	0.25	0.26	0.12	0.41	0.21	0.09	0.06	0.68	0.86	0.30	0.60	0.77	5.7	6.5	5.8	7.4	6.6	0.38	1.58	0.55	1.03	0.58	2.3	3.6	2.1	1.9	2.2	0.32	0.41	0.35	0.57	0.65	15	46	24	11	12
TG 10	0.22	0.27	0.24	0.24	0.28	0.13	0.07	0.06	0.07	0.16	0.68	0.59	0.53	0.74	0.79	5.4	6.3	7.2	6.5	5.9	0.81	0.75	0.53	0.36	0.82	2.8	3.3	3.5	1.8	2.2	0.37	0.34	0.59	0.57	0.67	16	14	12	10	16
TG 11	0.20	0.27	0.20	0.27	0.30	0.15	0.14	0.23	0.17	0.18	0.65	0.59	0.31	0.65	0.77	5.6	6.8	6.6	6.9	6.9	0.34	0.77	0.56	0.15	0.29	4.0	6.5	3.3	3.0	2.6	0.37	0.56	0.38	0.53	0.61	28	40	24	51	27
TG 12	0.26	0.25	0.25	0.24	0.28	0.09	0.15	0.11	0.09	0.09	0.76	0.68	0.54	0.56	0.82	5.7	7.6	6.9	6.8	6.1	0.53	1.61	1.16	1.40	0.64	3.3	4.0	2.9	3.3	1.6	0.45	0.42	0.62	0.51	0.75	14	31	16	11	12
TG 13	0.22	0.27	0.23	0.31	0.28	0.10	0.13	0.20	0.22	0.18	0.62	0.57	0.41	0.68	2.42	5.1	6.2	5.6	7.6	6.4	0.21	1.93	1.08	0.84	1.72	3.0	3.7	4.3	3.3	2.8	0.43	0.37	0.49	0.69	0.68	19	21	24	31	28
TG 14	0.23	0.32	0.21	0.33	0.45	0.19	0.15	0.17	0.18	0.16	0.68	0.81	0.23	0.97	2.88	6.0	9.2	6.1	8.2	7.7	0.57	1.18	0.47	0.90	5.50	4.5	5.8	2.7	3.4	0.48	0.66	0.30	1.03	2.09	19	62	18	24	15	
TG 15	0.26	0.26	0.27	0.26	0.28	0.24	0.19	0.29	0.25	0.08	0.94	0.65	0.41	0.65	0.94	5.9	6.8	6.1	7.7	7.8	0.62	1.36	0.75	0.70	0.47	6.4	5.5	3.7	3.7	2.7	0.58	0.50	0.52	0.58	0.85	28	33	20	15	17
TG 16	0.23	0.44	0.23	0.21	0.34	0.22	0.39	0.28	0.18	0.25	0.64	0.55	0.56	0.51	0.86	5.8	7.5	6.8	6.6	7.0	0.66	1.13	0.85	0.55	1.24	4.0	6.4	6.0	3.5	5.7	0.35	0.46	0.40	0.44	0.81	25	52	26	25	32
TG 17	0.22	0.25	0.21	0.31	0.28	0.17	0.17	0.17	0.24	0.20	0.63	0.50	0.25	1.12	0.82	6.6	6.4	7.0	7.7	7.2	0.61	1.93	0.71	1.75	1.01	4.0	4.5	4.4	4.2	2.3	0.37	0.42	0.35	1.16	0.73	29	38	22	25	19
TG 18	0.24	0.24	0.32	0.29	0.37	0.10	0.07	0.08	0.08	0.05	0.83	0.60	0.94	0.97	1.10	6.2	6.5	6.5	9.5	7.5	0.27	0.49	0.42	0.50	0.84	4.3	4.3	3.4	4.3	3.6	0.53	0.49	0.80	1.08	1.03	15	25	20	31	36
TG 19	0.22	0.25	0.43	0.27	0.23	0.15	0.10	0.32	0.35	0.13	0.59	0.61	1.17	0.78	0.43	5.4	5.2	6.0	9.9	5.2	0.90	2.80	2.17	1.86	0.81	4.7	4.8	3.9	3.9	1.6	0.44	0.46	1.20	0.68	0.39	16	23	23	24	17
TG 20	0.22	0.69	0.22	0.23	0.29	0.19	0.13	0.12	0.22	0.57	0.63	2.38	0.36	0.64	1.02	5.5	6.9	5.7	7.4	8.7	0.39	2.78	0.26	1.14	1.66	3.4	8.4	2.5	4.0	5.1	0.43	1.84	0.41	0.59	0.77	26	34	15	31	38
TG 21	0.24	0.29	0.27	0.32	0.25	0.17	0.11	0.11	0.15	0.19	0.69	0.82	0.51	0.97	0.76	6.2	6.2	6.1	8.0	6.0	0.60	2.98	2.89	7.12	1.72	4.1	4.2	2.8	2.9	1.9	0.47	0.64	0.56	1.10	0.66	23	18	12	23	33
TG 22	0.24	0.28	0.28	0.27	0.27	0.30	0.14	0.19	0.15	0.14	0.61	0.66	0.63	0.73	0.93	5.4	6.3	6.3	8.2	7.1	0.52	0.79	0.86	0.73	1.88	4.8	3.4	6.2	3.6	2.3	0.44	0.49	0.78	0.67	0.73	26	22	23	33	31
TG 23	0.26	0.25	0.22	0.23	0.23	0.19	0.15	0.31	0.09	0.72	0.70	0.40	0.57	0.59	0.55	6.5	6.0	6.8	7.0	6.2	0.57	0.84	0.78	0.66	0.36	4.6	4.1	3.0	2.7	1.6	0.62	0.41	0.44	0.61	0.47	27	31	27	13	34
TG 24	0.30	0.28	0.34	0.29	0.34	0.10	0.08	0.05	0.03	0.06	2.09	0.66	0.76	0.92	1.16	5.7	6.5	6.4	7.1	6.3	0.67	0.55	0.58	0.51	0.59	4.1	4.5	2.3	1.8	1.9	0.83	0.55	0.87	1.03	0.94	20	41	13	12	12
TG 25	0.29	0.29	0.24	0.24	0.47	0.25	0.26	0.15	0.18	0.08	1.03	0.75	0.39	0.75	1.39	4.8	5.9	6.1	7.0	7.3	0.90	1.08	0.83	0.54	1.85	4.6	4.1	2.6	3.0	2.5	0.79	0.59	0.47	0.59	0.96	24	23	23	36	20
TG 26	0.27	0.30	0.40	0.22	0.30	0.20	0.14	0.11	0.17	0.10	0.84	0.81	1.49	0.49	0.79	5.6	5.9	5.7	6.2	5.7	0.59	1.28	2.24	1.42	0.85	3.9	5.1	3.6	2.0	5.8	0.64	0.74	1.25	0.46	0.65	16	19	14	18	29
TG 27	0.33	0.28	0.23	0.28	0.30	0.12	0.14	0.17	0.13	0.08	0.85	0.62	0.35	0.81	0.78	5.7	6.6	6.6	8.5	6.6	0.84	1.14	1.08	1.02	0.76	4.1	2.7	3.0	3.3	1.9	0.77	0.53	0.41	0.77	0.73	17	29	17	29	16
TG 28	0.22	0.35	0.99	0.29	0.42	0.22	0.08	0.16	0.15	0.21	0.54	0.34	3.22	0.52	1.03	6.6	5.6	7.4	6.7	6.9	0.40	2.20	2.69	0.74	1.02	4.3	6.3	4.2	2.2	2.4	0.40	0.63	2.09	0.56	0.92	25	24	20	18	23
TG 29	0.28	0.30	0.39	0.27	0.54	0.15	0.16	0.19	0.13	0.19	1.16	5.93	1.11	0.97	2.11	6.0	7.2	6.5	6.7	6.8	1.12	2.37	1.59	0.53	2.69	4.3	3.6	5.4	1.7	3.9	0.83	0.57	1.19	0.68	1.75	22	23	20	15	31
TG 30	0.27	0.33	0.24	0.26	0.29	0.22	0.11	0.07	0.12	0.07	0.86	1.18	0.48	0.81	0.82	5.6	7.7	6.1	7.4	7.2	0.69	1.54	0.30	0.57	0.48	5.1	19.3	3.1	3.6	2.7	0.77	0.87	0.53	0.72	0.66	26	45	26	19	43
M 88	0.27	0.24	0.22	0.34	0.30	0.37	0.14	0.11	0.12	0.14	0.77	0.58	0.31	1.11	1.09	6.3	6.2	6.3	7.7	7.2	1.16	1.23	1.15	1.25	1.78	4.8	2.5	2.9	4.4	3.7	0.80	0.47	0.38	1.18	0.88	22	29	16	27	27
M 98	0.28	0.33	0.27	0.31	0.25	0.18	0.16	0.19	0.15	0.06	0.73	1.48	0.57	1.04	0.74	5.9	6.0	6.0	7.4	6.3	0.88	1.83	0.96	0.91	0.37	4.5	4.8	3.7	4.3	1.3	0.66	0.63	0.43	1.23	0.57	19	19	30	29	14
M 100	0.26	0.28	0.19	0.27	0.41	0.27	0.19	0.12	0																															

8.2.1 Referenzproben

Tabelle 14 Gemessene Werte verglichen mit Referenzwerten der Moosproben M3 Hergestellt 1994 in Finnland (Steinnes et al. 1997)

2020	M3							
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
	$\mu\text{g g}^{-1}$							
Mittelwert	0.11	0.11	0.67	3.7	1.1	3.5	1.22	26
RSD %	9	3	5	4	6	5	3	5
Anzahl Messungen N	32	32	32	32	32	32	32	21
Diff Abs (Steinnes et al 1997)	0.00	0.01	0.00	-0.1	0.1	0.1	0.03	1
Diff rel % (Steinnes et al 1997)	0	6	0	-2	12	4	2	2
Referenz								
Steinnes et al. (1997)	0.11	0.11	0.67	3.8	1.0	3.3	1.19	25
SD	0.01	0.01	0.19	0.2	0.1	0.3	0.15	1
RSD %	7	5	28	6	8	8	13	4
Anzahl Messungen N	11	17	25	20	15	19	19	21
Smodis/Bleise (2007)	0.11	0.10	0.67	4.0	1.2	3.7	1.30	24
95% CI	0.01	0.01	0.14	0.6	0.2	0.2	0.08	1
R95% CI, %	11	13	21	14	19	6	6	6
Anzahl Messungen N	13	17	15	16	14	16	13	16

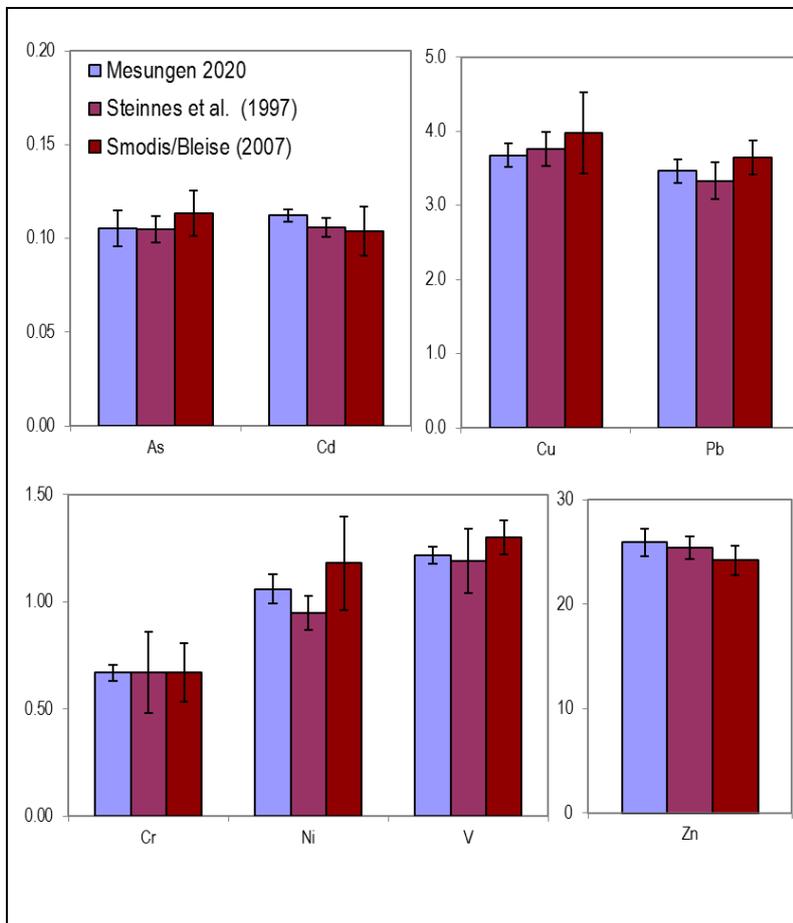


Abbildung 32 Vergleich mit Referenzwerten

M3 ist eine Referenzprobe, die in Finnland hergestellt wurde und in allen Labors, die an der Studie teilnahmen, bestimmt wurden (Steinnes et al. 1997). Die Werte sind in $\mu\text{g g}^{-1}$ TS angegeben.

8.2.2 Reproduzierbarkeit (Doppelproben)

Tabelle 15 Doppelproben 2020
Standardabweichung, Abweichung 1. Probe zu 2. Probe, die Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ TS

		As					Cd					Cr					Cu				
		1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %	1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %	1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %	1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %
J	3	0.10	0.07	0.08	0.02	27	0.08	0.08	0.08	0.00	5	0.85	0.66	0.75	0.14	18	3.6	3.6	3.6	0.0	0
J	18	0.09	0.07	0.08	0.01	16	0.14	0.12	0.13	0.01	9	1.64	0.90	1.27	0.53	41	7.3	5.4	6.4	1.3	21
M	4	0.18	0.22	0.20	0.03	15	0.12	0.10	0.11	0.01	12	3.25	3.76	3.50	0.36	10	4.2	4.3	4.2	0.0	0
M	80	0.12	0.11	0.12	0.01	7	0.09	0.09	0.09	0.00	2	1.88	1.55	1.72	0.23	14	5.6	6.0	5.8	0.3	4
NA	4	0.11	0.11	0.11	0.00	1	0.19	0.20	0.19	0.01	3	1.14	1.40	1.27	0.19	15	3.5	3.5	3.5	0.0	1
NA	72	0.09	0.15	0.12	0.04	32	0.07	0.08	0.08	0.01	10	0.88	1.03	0.96	0.11	11	4.4	3.5	4.0	0.6	16
ZA	19	0.12	0.13	0.13	0.01	5	0.05	0.05	0.05	0.00	0	4.08	4.95	4.51	0.62	14	6.5	5.8	6.1	0.5	8
ZA	54	0.15	0.14	0.15	0.01	5	0.09	0.12	0.11	0.02	16	0.67	0.73	0.70	0.04	6	3.8	4.1	4.0	0.2	5
SA	40	0.04	0.03	0.03	0.00	12	0.07	0.06	0.06	0.01	13	0.61	0.38	0.50	0.17	33	10.7	7.2	9.0	2.5	28
SA	99	0.22	0.23	0.23	0.00	2	0.06	0.07	0.06	0.00	3	1.43	1.49	1.46	0.04	3	3.1	3.3	3.2	0.1	3
Mittel		0.12	0.13			12	0.10	0.10			7	1.64	1.68		17	5.3	4.7			9	
Abweichung in %					3					0					2						-12

		Ni					Pb					V					Zn				
		1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %	1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %	1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %	1.M.	2.M.	Mw	SD	SD %
J	3	0.53	0.43	0.48	0.07	14	1.0	0.8	0.9	0.2	17	0.89	0.69	0.79	0.14	17	21	17	19	3	15
J	18	0.99	0.63	0.81	0.25	31	2.4	1.4	1.9	0.7	37	1.13	0.73	0.93	0.29	31	34	23	28	7	26
M	4	2.73	3.06	2.90	0.23	8	1.7	1.6	1.7	0.1	6	2.49	2.90	2.70	0.29	11	19	16	18	2	11
M	80	1.41	1.48	1.45	0.05	3	2.2	1.8	2.0	0.2	11	0.99	1.08	1.04	0.06	6	25	25	25	0	1
NA	4	1.47	1.59	1.53	0.09	6	1.2	1.0	1.1	0.2	15	0.95	1.04	1.00	0.06	6	29	25	27	2	9
NA	72	0.59	0.58	0.58	0.00	1	1.6	1.6	1.6	0.0	2	0.72	0.79	0.75	0.05	7	17	18	18	0	1
ZA	19	5.04	5.83	5.44	0.56	10	0.7	0.8	0.7	0.1	10	1.20	1.50	1.35	0.21	16	21	22	22	0	1
ZA	54	0.70	0.77	0.73	0.05	7	0.9	0.9	0.9	0.0	3	0.77	0.83	0.80	0.04	5	21	23	22	1	6
SA	40	0.54	0.40	0.47	0.10	21	0.8	0.5	0.6	0.2	31	0.38	0.31	0.35	0.04	13	26	23	25	2	9
SA	99	2.19	2.73	2.46	0.38	16	1.3	1.4	1.3	0.1	4	1.10	1.17	1.13	0.05	5	23	26	24	2	10
Mittel		1.62	1.75			12	1.4	1.2			14	1.06	1.10		12	24	22			9	
Abweichung in %					8					-15					4						-8

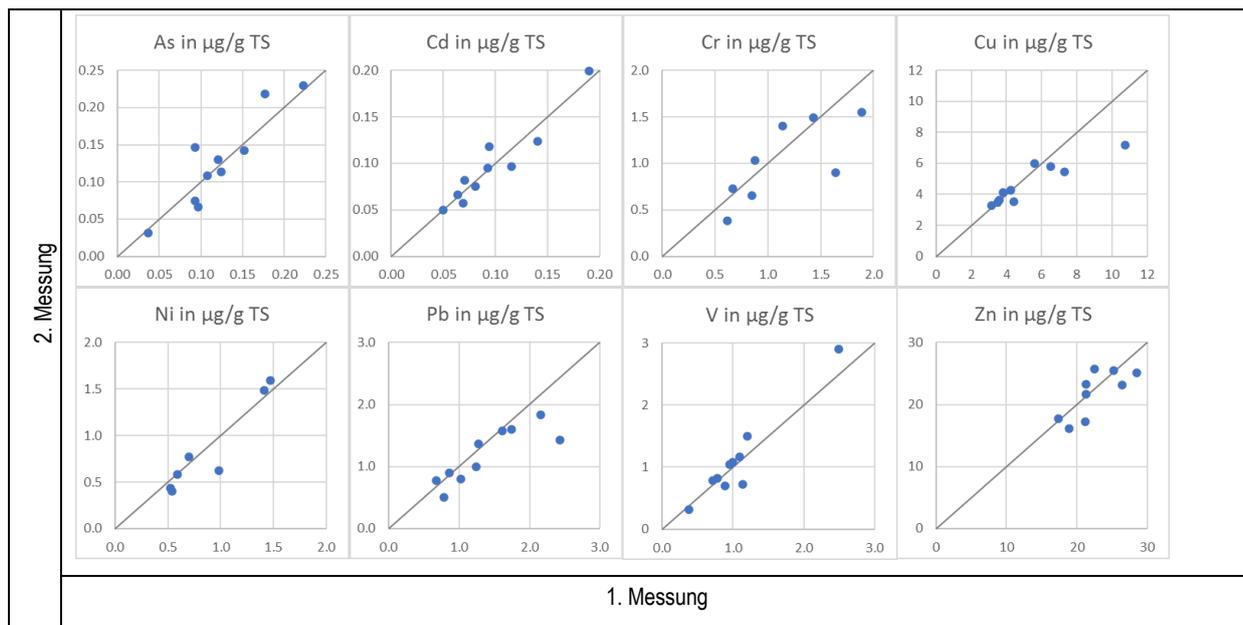
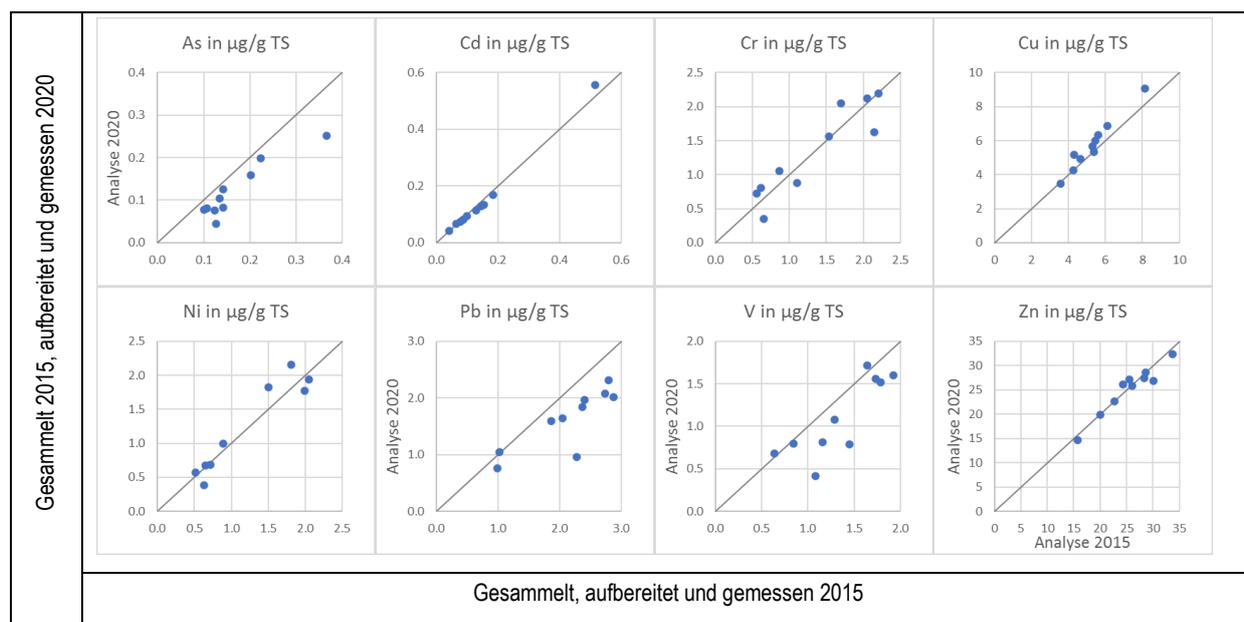


Abbildung 33 Doppelbestimmung Erhebung 2020
An 10 Standorten wurden die Moosproben zweimal aufgearbeitet und auf alle Metalle hin analysiert, um die Reproduzierbarkeit der Methode zu überprüfen. Die Werte sind in $\mu\text{g g}^{-1}$ TS angegeben.

8.2.3 Rückstellproben

 Tabelle 15 Rückstellproben
 Standardabweichung, Abweichung 2015er zu 2020er Proben, Werte in $\mu\text{g g}^{-1}$ TS

		As					Cd					Cr					Cu				
		2015	2020	Mw	SD	SD %	2015	2020	Mw	SD	SD %	2015	2020	Mw	SD	SD %	2015	2020	Mw	SD	SD %
J	10	0.13	0.04	0.09	0.06	67	0.10	0.09	0.10	0.00	4	0.65	0.35	0.50	0.21	42	5.6	6.3	6.0	0.5	9
J	18	0.12	0.08	0.10	0.03	34	0.18	0.17	0.18	0.01	6	1.10	0.88	0.99	0.16	16	5.4	5.3	5.4	0.0	0
M	4	0.14	0.13	0.13	0.01	9	0.13	0.11	0.12	0.01	10	1.70	2.05	1.87	0.25	13	4.3	4.2	4.3	0.0	1
M	80	0.20	0.16	0.18	0.03	17	0.14	0.13	0.14	0.01	8	2.20	2.19	2.20	0.01	0	6.1	6.9	6.5	0.5	8
NA	4	0.22	0.20	0.21	0.02	8	0.52	0.56	0.54	0.03	5	2.05	2.12	2.09	0.05	2	4.3	5.2	4.7	0.6	13
NA	73	0.13	0.10	0.12	0.02	17	0.15	0.13	0.14	0.01	9	0.61	0.81	0.71	0.14	19	3.6	3.5	3.5	0.1	2
ZA	19	0.14	0.08	0.11	0.04	37	0.06	0.07	0.06	0.00	2	2.15	1.62	1.89	0.37	20	5.5	6.0	5.7	0.4	7
ZA	54	0.11	0.08	0.09	0.02	20	0.04	0.04	0.04	0.00	0	0.56	0.73	0.64	0.12	19	5.3	5.7	5.5	0.3	5
ZA	40	0.10	0.08	0.09	0.02	18	0.09	0.08	0.08	0.00	4	0.86	1.05	0.96	0.14	14	8.1	9.1	8.6	0.7	8
SA	99	0.37	0.25	0.31	0.08	26	0.08	0.07	0.08	0.00	5	1.54	1.56	1.55	0.02	1	4.7	4.9	4.8	0.2	4
Mittel		0.17	0.12			25	0.15	0.15		5	1.34	1.34			15	5.3	5.7			6	
Abweichung in %												0					8				
		Ni					Pb					V					Zn				
		2015	2020	Mw	SD	SD %	2015	2020	Mw	SD	SD %	2015	2020	Mw	SD	SD %	2015	2020	Mw	SD	SD %
J	10	0.63	0.38	0.51	0.18	35	2.3	1.0	1.6	0.9	58	1.08	0.42	0.53	0.17	33	34	32	33	1	3
J	18	0.71	0.69	0.70	0.02	3	2.7	2.1	2.4	0.5	19	1.16	0.82	1.12	0.18	16	26	27	26	1	4
M	4	1.50	1.82	1.66	0.23	14	2.0	1.6	1.8	0.3	16	1.64	1.72	0.76	0.16	22	16	15	15	1	5
M	80	1.99	1.77	1.88	0.16	8	2.8	2.3	2.6	0.3	13	1.73	1.56	0.41	0.04	11	29	29	29	0	0
NA	4	1.81	2.16	1.98	0.25	13	2.4	1.8	2.1	0.4	18	1.79	1.52	3.52	0.65	18	20	20	20	0	0
NA	73	0.52	0.57	0.55	0.04	7	1.9	1.6	1.7	0.2	11	0.64	0.68	0.55	0.01	2	24	26	25	1	5
ZA	19	4.99	3.69	4.34	0.92	21	1.0	0.8	0.9	0.2	20	1.45	0.79	1.30	0.12	9	23	23	23	0	0
ZA	54	0.65	0.68	0.66	0.02	2	1.0	1.0	1.0	0.0	1	0.84	0.80	1.19	0.27	22	26	26	26	0	0
ZA	40	0.89	0.99	0.94	0.07	8	2.4	2.0	2.2	0.3	14	1.29	1.08	0.63	0.04	6	28	27	28	1	2
SA	99	2.05	1.94	2.00	0.08	4	2.9	2.0	2.4	0.6	25	1.92	1.60	1.40	0.25	18	30	27	28	2	8
Mittel		1.57	1.47			11	2.1	1.6		19	1.35	1.10		16	26	25				3	
Abweichung in %												-19					-1				


 Abbildung 34: Rückstellproben 2015
 Die Werte sind in $\mu\text{g g}^{-1}$ TS angegeben