

15. Schwermetalle im Grund- und Sickerwasser unter forst- und ackerbaulicher Nutzung

Kupfer, Blei, Cadmium, Zink, Uran

ANNEGRET FIER, ANOUCHKA JANKOWSKI,
BIRTE SCHELER & HENNING MEESENBURG

15.1. Einleitung

Schwermetalle kommen natürlicherweise in allen Böden und Gesteinen vor. Durch anthropogene Einträge, z. B. in Form von Düngung und Deposition, können sich die Gehalte deutlich erhöhen. Lithogene Schwermetalle sind im Wesentlichen fest in der Kristallstruktur primärer Minerale gebunden. Durch anthropogene Immissionen eingetragene Schwermetalle sind hingegen eher an Huminstoffen oder organomineralischen Oberflächen angelagert und leichter löslich. Wie mobil diese Schwermetalle im Boden sind, hängt von verschiedenen Bodeneigenschaften ab, wie z. B. dem Redoxpotential, der Textur und dem Humusgehalt, ganz besonders aber vom pH-Wert. Liegen Schwermetalle in erhöhten Konzentrationen vor, können sie die mikrobielle Population empfindlich stören (AMELUNG et al. 2018). Außerdem kann der Austrag von Schwermetallen über das Sickerwasser zu einer Belastung des Grundwassers führen. Daher werden die gemessenen Konzentrationen dahingehend beurteilt, ob Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser bzw. Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser überschritten werden. Weiterhin wird untersucht, ob es wesentliche Unterschiede zwischen den Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser von Wald- und Ackerstandorten gibt und worauf diese zurückzuführen sind.

15.2. Material und Methoden

15.2.1. Forstlich genutzte BDF (BDF-F)

Auf den forstlich genutzten Intensiv-BDF wird kontinuierlich Bodenlösung mit Hilfe von keramischen Saugkerzen bei einem Unterdruck von ca. 0,4 kPa gewonnen und in Glasflaschen ge-

sammelt. Ob Bodenlösung tatsächlich gewonnen wird, hängt wesentlich von der Witterung und dem Bodenwassergehalt ab. Die Probenahme erfolgt 14tägig. Schwermetalle werden auf drei Flächen unterhalb des Hauptwurzelraums bestimmt, auf der BDF-F F006SLB1 in 90 cm Tiefe mit bis zu drei Wiederholungen, auf der BDF-F F007SLF1 in 100 cm Tiefe mit bis zu vier Wiederholungen sowie auf der BDF-F F021AUK1 in 250 cm Tiefe mit bis zu sechs Wiederholungen. Am Ende eines Quartals wird je Wiederholung aus allen vorhandenen Teilproben eine mengengewichtete Mischprobe hergestellt und analysiert. Die Konzentrationen von Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) wurden bis 2018 mittels ICP-OES (FORTMANN & KÖNIG 1999–2008), seit 2019 mittels ICP-MS bestimmt (Veröffentlichung in Vorbereitung).

15.2.2. Landwirtschaftlich genutzte BDF (BDF-L)

An elf landwirtschaftlichen Bodendauerbeobachtungsstandorten (davon zehn Intensiv-BDF) wird mit Hilfe von Saugsonden das Sickerwasser gewonnen. In der Sickerwasserperiode wird das Sickerwasser in ca. 14tägigem Rhythmus durch Anlegen eines Unterdrucks beprobt und u. a. auf Schwermetalle untersucht. Beginn und Ende der Sickerwasserperiode hängen sowohl von der Witterung als auch dem Wasserspeichervermögen des Bodens ab, häufig beginnt sie im Herbst und endet im Frühling. Die Saugsonden, die hier ausgewertet werden, sind i. d. R. in einer Tiefe von ca. 80 cm im ungesättigten Bereich eingebaut. An den Standorten L012BUEH und L037SCHL sind die Saugsonden auf Grund von hohen Grundwasserständen in 45 cm bzw. 35 cm Tiefe verbaut. An den Standorten L065JUEH und L070SEHL befinden sich je zwei Saugsonden in einem Doppellysimeter in einer Tiefe von 1 m. An allen anderen Standorten sind mindestens vier Saugsonden vorhanden. Die Spitzen der Saugkerzen sind aus Glas oder Kunststoff gefertigt und für die Beprobung von Schwermetallen geeignet. Die Analyse der Schwermetalle der BDF-L erfolgt nach DIN 38406-E29 mittels ICP-Massenspektrometrie.

15.2.3. Forst- und landwirtschaftlich genutzte BDF

Die folgenden Abbildungen 15.1 bis 15.10 zeigen die Mediane der Schwermetallgehalte vom Herbst 2012 bis zum Frühjahr 2019 (L035KIRC vom Herbst 2015 bis zum Frühjahr 2019). Für die BDF-F-Flächen umfasst die Darstellung den Zeitraum Januar 2009 bis Herbst 2019. Zusätzlich sind das 1. und 3. Quartil (Box) und die

Quantile bei 10 % und 90 % (Antennen) abgebildet. In separaten Abbildungen sind die Schwermetallgehalte (Median) in Abhängigkeit vom pH-Wert dargestellt. In allen Abbildungen wird der pH-Wert (CaCl₂) in der Einbautiefe der Saugsonden aus der Grundinventur herangezogen, da davon ausgegangen wird, dass er einen größeren Einfluss auf die gemessenen Konzentrationen bzw. die Schwermetallmobilität hat als z. B. der pH-Wert im Oberboden oder im Sickerwasser.

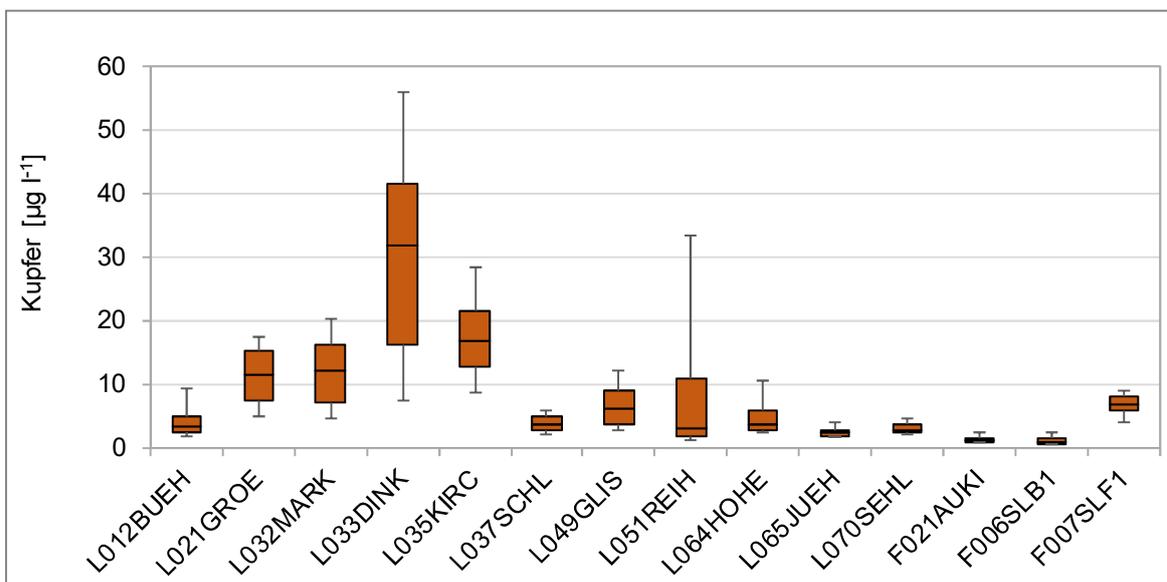


Abb. 15.1: Mittlere Kupfergehalte (Median) im Sickerwasser sowie das 1. und 3. Quartil (Box) und die Quantile bei 10 % und 90 % (Antennen), Zeitraum BDF-F: Herbst 2009 bis Frühjahr 2019, Zeitraum BDF-L: Herbst 2012 bis Frühjahr 2019 (L035KIRC von Herbst 2015 bis Frühjahr 2019).

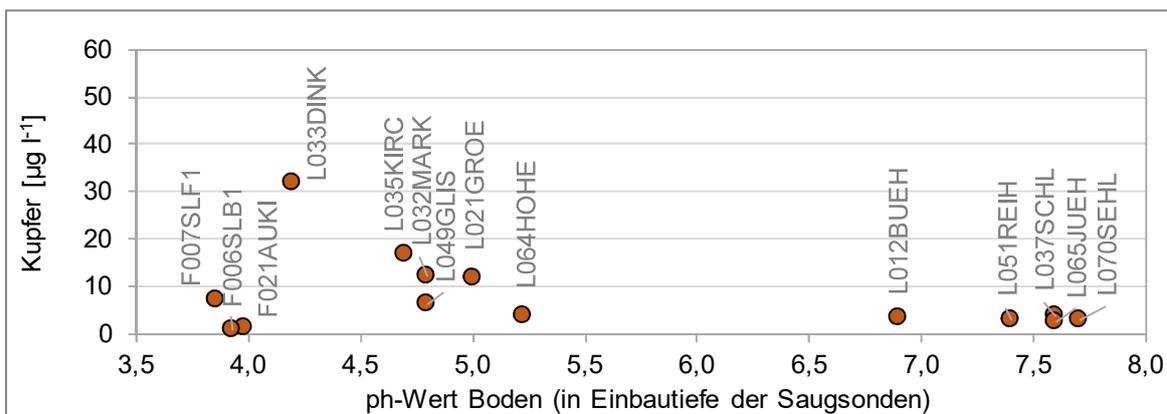


Abb. 15.2: Mittlere Kupfergehalte (Median) im Sickerwasser in Abhängigkeit vom pH(CaCl₂)-Wert (gemessen in der Einbautiefe der Saugsonden).

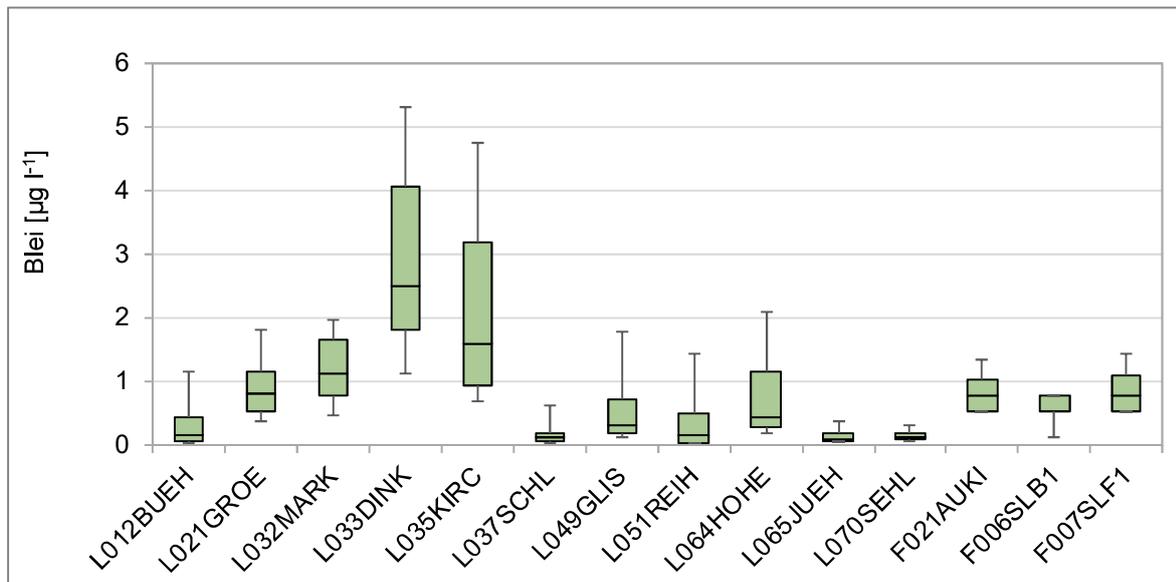


Abb. 15.3: Mittlere Bleigehalte (Median) im Sickerwasser sowie das 1. und 3. Quartil (Box) und die Quantile bei 10 % und 90 % (Antennen), Zeitraum BDF-F: Herbst 2009 bis Frühjahr 2019, Zeitraum BDF-L: Herbst 2012 bis Frühjahr 2019 (L035KIRC von Herbst 2015 bis Frühjahr 2019).

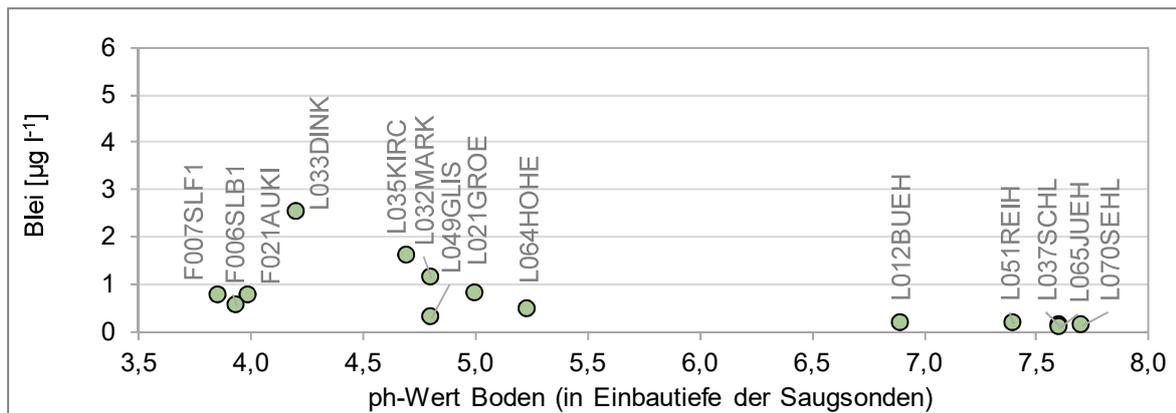


Abb. 15.4: Mittlere Bleigehalte (Median) im Sickerwasser in Abhängigkeit vom pH(CaCl₂)-Wert (gemessen in der Einbautiefe der Saugsonden).

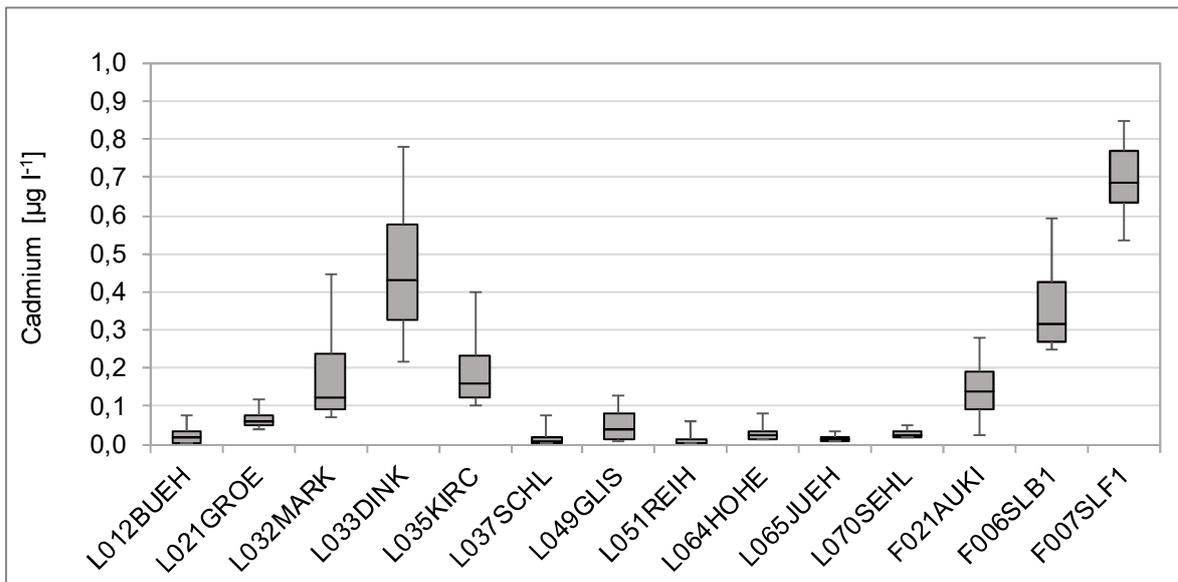


Abb. 15.5: Mittlere Cadmiumgehalte (Median) im Sickerwasser sowie das 1. und 3. Quartil (Box) und die Quantile bei 10 % und 90 % (Antennen), Zeitraum BDF-F: Herbst 2009 bis Frühjahr 2019, Zeitraum BDF-L: Herbst 2012 bis Frühjahr 2019 (L035KIRC von Herbst 2015 bis Frühjahr 2019).

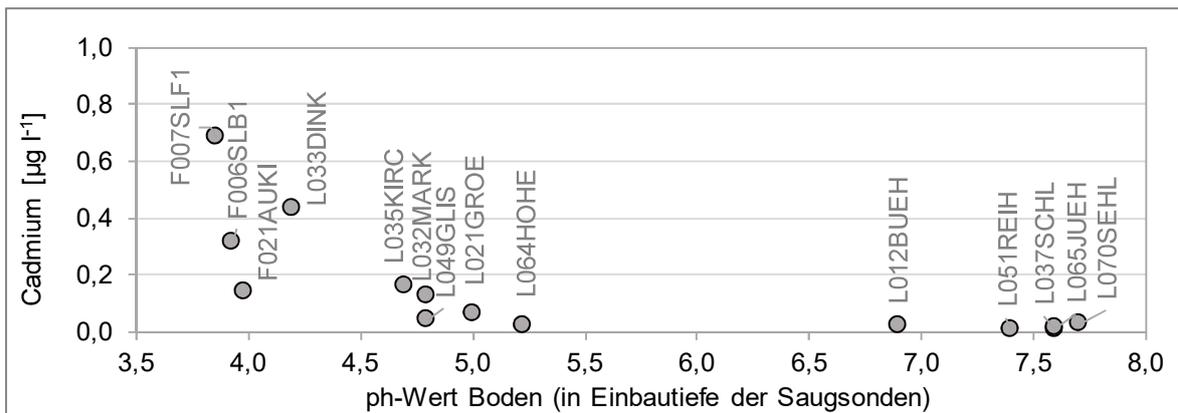


Abb. 15.6: Mittlere Cadmiumgehalte (Median) im Sickerwasser in Abhängigkeit vom pH(CaCl₂)-Wert (gemessen in der Einbautiefe der Saugsonden).

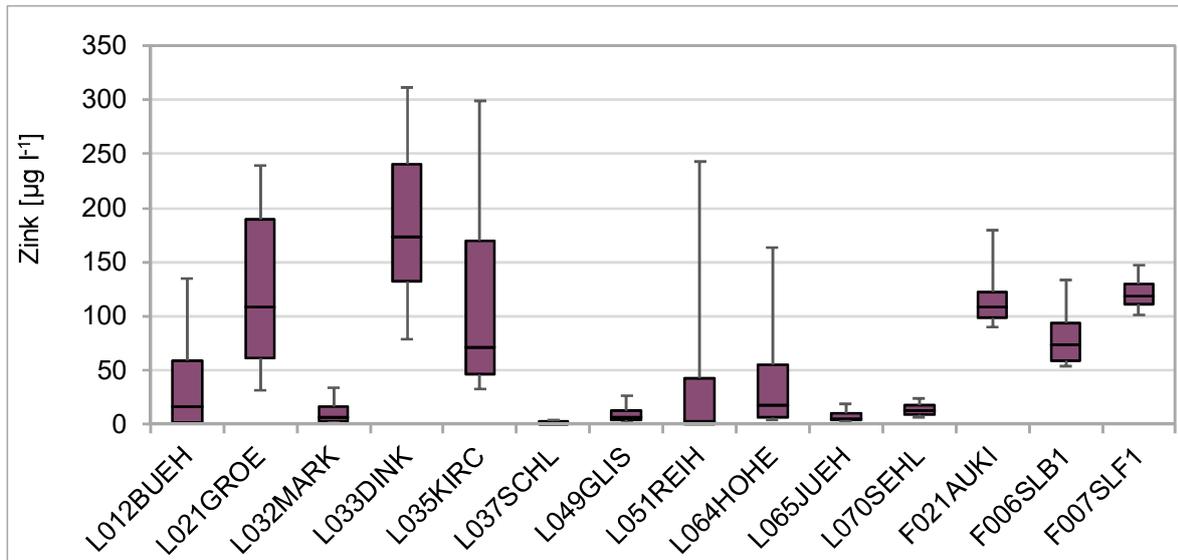


Abb. 15.7: Mittlere Zinkgehalte (Median) im Sickerwasser sowie das 1. und 3. Quartil (Box) und die Quantile bei 10 % und 90 % (Antennen). Zeitraum BDF-F: Herbst 2009 bis Frühjahr 2019, Zeitraum BDF-L: Herbst 2012 bis Frühjahr 2019 (L035KIRC von Herbst 2015 bis Frühjahr 2019).

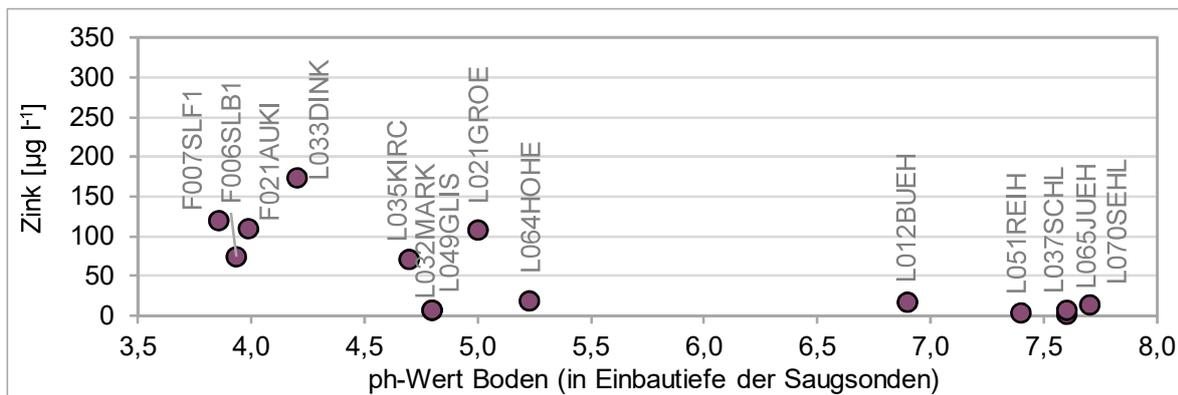


Abb. 15.8: Mittlere Zinkgehalte (Median) im Sickerwasser in Abhängigkeit vom pH(CaCl₂)-Wert (gemessen in der Einbautiefe der Saugsonden).

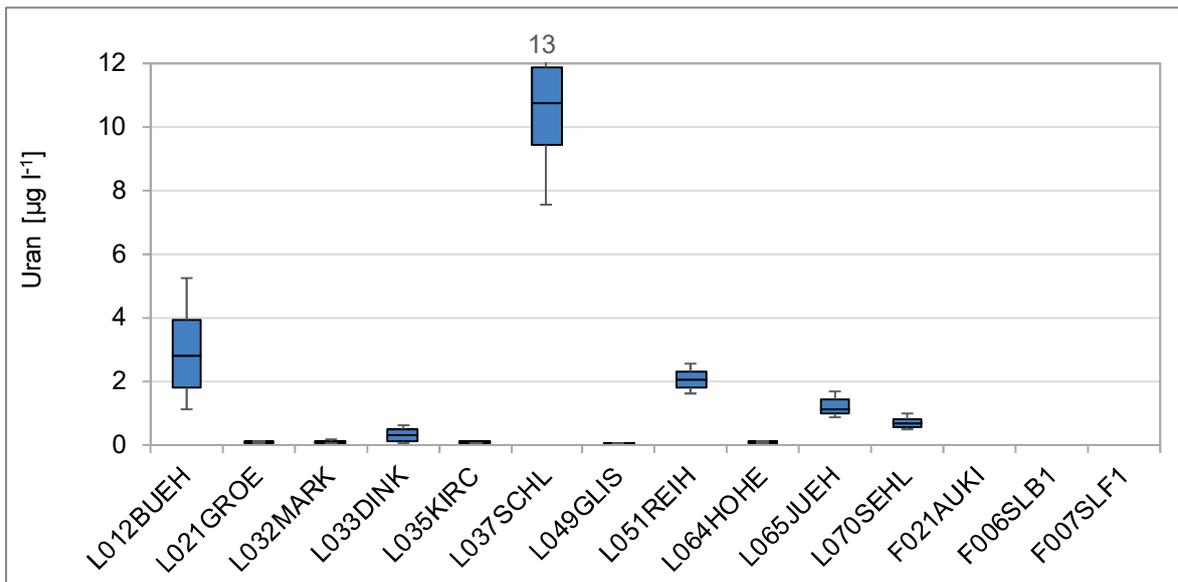


Abb. 15.9: Mittlere Urangelhalte (Median) im Sickerwasser sowie das 1. und 3. Quartil (Box) und die Quantile bei 10 % und 90 % (Antennen), BDF-F: nicht analysiert, Zeitraum BDF-L: Herbst 2012 bis Frühjahr 2019 (L035KIRC von Herbst 2015 bis Frühjahr 2019).

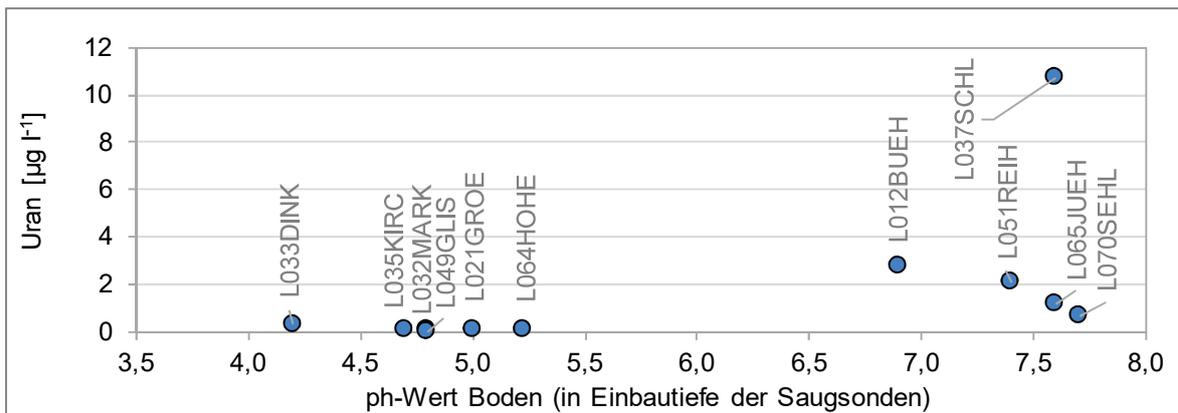


Abb. 15.10: Mittlere Urangelhalte (Median) im Sickerwasser in Abhängigkeit vom pH(CaCl₂)-Wert (gemessen in der Einbautiefe der Saugsonden).

Um die Messwerte besser einordnen zu können, werden sie mit den Geringfügigkeitschwellenwerten nach LAWA (2016) verglichen (Tab. 15.1). Bei Überschreitung der Schwellenwerte wird von einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers aus human- und ökotoxikologischer Sicht ausgegangen. Es ist allerdings zu beachten, dass es sich bei den hier dargestellten Ergebnissen um Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser und nicht

im Grundwasser handelt. Daher werden zusätzlich die Prüfwerte des Wirkungspfades Boden – Grundwasser der Bundesbodenschutzverordnung herangezogen (BBODSCHV 1999). Sie beziehen sich auf das Wasser im Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Bodenzone.

Tab. 15.1: Geringfügigkeitsschwellenwerte (LAWA 2016) und Prüfwerte (BBodSchV 1999).

Konzentration [$\mu\text{g l}^{-1}$]	Geringfügigkeitsschwellenwerte (LAWA 2016)	Prüfwerte Wirkungspfad Boden-Grundwasser (BBodSchV 1999)
Blei	1,2	25
Cadmium	0,3	5
Kupfer	5,4	50
Uran	-	-
Zink	60	500

Tabelle 15.2 zeigt die mittleren Schwermetall-Gesamtgehalte im Oberboden der betrachteten Standorte sowie deren Hauptbodenart. Die Gehalte stammen aus der ersten Wiederholungsinventur und werden im Folgenden herangezogen, um die im Sickerwasser gemessenen Schwermetallkonzentrationen besser einordnen zu können.

Tab. 15.2: BDF-L: Bodenart und Schwermetall-Gesamtgehalte (Königswasserextrakt, mg kg^{-1}) im Ap-Horizont (0–20 cm) bei der ersten Wiederholungsinventur (2001 bis 2010, die gelb hinterlegten Zahlen stammen aus der Grundinventur, da keine Werte aus der Wiederholungsinventur vorliegen), Mittelwerte der vier Kernflächen, fett gedruckte Werte überschreiten den Vorsorgewert nach BBODSCHV (1999); BDF-F: Bodenart und Schwermetall-Gesamtgehalte (Königswasserextrakt, mg kg^{-1}) in 0–20 cm Tiefe bei der Wiederholungsinventur (2010 bzw. 2014) (n. a. nicht analysiert).

Standort	B.-art	Cd	Cu	Pb	Zn	U
L012BUEH	T	0,09	16,4	27	72	1,12
L021GROE	S	0,16	10,8	11	28	0,28
L032MARK	S	0,17	12,8	10	16	0,33
L033DINK	S	0,09	10,3	8	17	0,21
L035KIRC	S	0,05	4,0	13	11	0,21
L037SCHL	T	14,43	444,4	3648	4154	1,34
L049GLIS	S	0,07	5,2	15	30	0,43
L051REIH	T	0,20	20,6	29	76	2,14
L064HOHE	S	0,04	2,3	10	15	0,34
L065JUEH	T	0,17	20,7	51	113	1,18
L070SEHL	U	0,89	26,4	118	214	0,89
F006SLB1	U	0,04	3,8	35	19	n.a.
F007SLF1	U	0,04	15,6	51	36	n.a.
F021AUKI	S	0,12	1,2	13	3	n.a.

15.3. Grundwasseruntersuchungen

Für sechs der in Tabelle 15.2 aufgeführten landwirtschaftlich genutzten BDF liegen insgesamt sieben Grundwassermessstellen (GWM) vor. Die Grundwasseruntersuchungen erfolgten gemäß des GÜN-Messnetzkonzeptes „Güte- und Standmessnetz Grundwasser“ (NLWKN 2014). Die Grundwasser-Probenentnahme erfolgt in der Regel jährlich bzw. maximal zweimal im Jahr. Die Schwermetalle sind Kenngrößen des Ergänzungsprogrammes und werden i. d. R. nur alle drei Jahre untersucht. Uran wurde lediglich im Rahmen einer Sonderuntersuchung von 2009–2013 untersucht, deshalb liegen hier nur wenige Messergebnisse vor (NLWKN 2015). Ausgewertet werden Messdaten über den Zeitraum von 2008–2018, sofern hierzu Daten vorliegen (Tab. 15.3). Die Analytik auf Blei (Pb), Cadmium (Cd) und Kupfer (Cu) erfolgte nach DIN EN ISO 17294-2 oder 15586-E4. Zink (Zn) wurde gemäß DIN EN ISO 17294-2 oder DIN 38406-E8 untersucht und Uran (U) ebenfalls nach DIN EN ISO 17294-2.

Tab. 15.3: Grundwassermessstellen (GWM) mit Schwermetalluntersuchungen (Blei, Cadmium, Kupfer, Zink) und Untersuchungen auf Uran im Zeitraum 2008–2018 an sechs BDF-L-Standorten.

GWM an BDF-L	Zeitraum ausgewertete Messergebnisse	Anzahl Messwerte je Parameter	
		Schwermetalle Ausnahmen in Klammern	Uran *Uran gelöst
L012BUEH-I	2008-2018	5	1*
L012BUEH-II	2008-2016	9	4*
L021GROE	2012-2018	5 (Pb: 4)	1*
L032MARK	2008-2018	5 (Cu/Zn: 6)	1*
L033DINK	2009-2016 (Pb: 2009-2015)	7 (Pb: 6)	1
L037SCHL	2008-2017	8 (Pb/Zn: 6)	5 / 6*
L049GLIS	2009-2018	9 (Cd: 7)	2*

15.4. Ergebnisse im Sickerwasser

15.4.1. Kupfer

Forstlich genutzte BDF

In Abbildung 15.1 sind die Kupferkonzentrationen im Sickerwasser von elf BDF-L und drei BDF-F dargestellt. Auf den BDF-F F021AUKI und F006SLB1 liegt das 90-%-Quantil unter der Geringfügigkeitsschwelle von $5,4 \mu\text{g l}^{-1}$ (LAWA 2016), auf F007SLF1 liegen Median und 90-%-Quantil mit $6,9 \mu\text{g l}^{-1}$ bzw. $9 \mu\text{g l}^{-1}$ zwischen der Geringfügigkeitsschwelle und dem Prüfwert der Bundesbodenschutzverordnung für den Pfad Boden – Grundwasser von $50 \mu\text{g l}^{-1}$ (BBODSCHV 1999). Im Vergleich zum Zeitraum 1993–2000 (hier nicht dargestellt) haben die Konzentrationen auf allen BDF-F abgenommen. Dies ist vermutlich eine Folge des gesunkenen atmosphärischen Kupfereintrags, der einzigen bedeutenden Eintragsquelle für Kupfer in Waldböden. Er weist seit Jahren einen abnehmenden Trend auf und betrug im Mittel der Jahre 2009–2018 mit der Kronentraufe zwischen $17 \text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (F021AUKI) und $28 \text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (F007SLF1).

Landwirtschaftlich genutzte BDF

Bei den landwirtschaftlich genutzten BDF weisen die Standorte L033DINK und L035KIRC mit $31,7 \mu\text{g l}^{-1}$ und $16,7 \mu\text{g l}^{-1}$ die höchsten Mediane auf (Abb. 15.1). Das 90-%-Quantil von L033DINK übersteigt den Prüfwert von $50 \mu\text{g l}^{-1}$ der Bundesbodenschutzverordnung für den Pfad Boden – Grundwasser (BBODSCHV 1999). Werden die Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser (LAWA 2016) angesetzt, liegen alle 90-%-Quantile mit Ausnahme der Standorte L065JUEH und L070SEHL oberhalb des Schwellenwertes von $5,4 \mu\text{g l}^{-1}$. Da die Saugkerzen im ungesättigten Bereich eingebaut sind, können die hier gemessenen Konzentrationen deutlich von denen im Grundwasser abweichen (s. Kap. 15.5).

Bedeutende Eintragsquellen für Kupfer in den Boden sind Gülle und Mist, da Kupfer als Futtermittelzusatzstoff insbesondere in der Schweinemast eingesetzt wird. Die Standorte L012BUEH, L032MARK, L033DINK und L049GLIS haben in den vergangenen zwei Jahrzehnten häufig Schweine- und Mischgülle erhalten. Im ökologischen Landbau werden Kupferpräparate als Pflanzenschutzmittel eingesetzt. Die BDF L021GROE wird seit 1989

ökologisch bewirtschaftet. Dort wurden beispielsweise allein im Zeitraum 1998 bis 2006 im Mittel $568 \text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ über Pflanzenschutzmittel zugeführt und $140 \text{g Cu ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ über kupferhaltige Mineraldünger (KAMERMANN, GROH & HÖPER 2015). Die Summe der Kupfereinträge lag damit über den Kupfereinträgen der häufig mit Schweine- und Mischgülle gedüngten Standorte wie L032MARK und L033DINK.

Tabelle 15.2 zeigt die mittleren Schwermetall-Gesamtgehalt im Oberboden der betrachteten Standorte. Es fällt auf, dass der Standort L035KIRC trotz geringer Kupfergehalte im Ap-Horizont von nur 4mg kg^{-1} Kupfer erhöhte Kupferkonzentrationen im Sickerwasser aufweist. Umgekehrt verhält es sich am Standort L037SCHL. Mit im Mittel 444mg kg^{-1} Kupfer im Oberboden findet man hier den mit Abstand höchsten Kupfergehalt im Oberboden aller Standorte. Dies ist auf schwermetallhaltige Aensedimente zurückzuführen, die aus der historischen Bergbautätigkeit im Harz stammen. Trotzdem sind die Kupferkonzentrationen im Sickerwasser vergleichsweise niedrig. Das lässt sich zu großen Teilen erklären, wenn die Kupferkonzentrationen in Abhängigkeit vom pH-Wert dargestellt werden (Abb. 15.2). Die landwirtschaftlich genutzten BDF zeigen einen Trend zu höheren Kupferkonzentrationen im Sickerwasser bei niedrigeren pH-Werten. Bei hohen pH-Werten wird Kupfer hauptsächlich durch Mn- und Fe-Oxide und organische Substanz gebunden (ROSS 1994). Der Vergleich mit den BDF-F zeigt, dass die Höhe des Eintrags an mobilem Kupfer ebenfalls großen Einfluss auf die Höhe der Konzentration im Sickerwasser hat. Ohne weitere Kupfereinträge und bei gleichbleibendem pH-Wert wird mit der Zeit nur noch das Kupfer ausgewaschen, das aus den Tonmineralen freigesetzt wird.

15.4.2. Blei

Forstlich genutzte BDF

In Abbildung 15.3 sind die Bleikonzentrationen im Sickerwasser dargestellt. Trotz sehr niedriger pH-Werte im Boden (Abb. 15.4) und Bleigehalten über dem Hintergrundwert in der Humusaufgabe auf den Flächen F006SLB1 und F007SLF1 (FORTMANN & MEESENBURG 2020) liegt der Median im Sickerwasser der drei untersuchten BDF-F unter der Geringfügigkeitsschwelle (LAWA 2016). Auf der Fläche

F006SLB1 liegt auch das 90%-Quantil darunter, auf den Flächen F007SLF1 und F021AUKI wird es mit 0,1 bzw. 0,2 $\mu\text{g l}^{-1}$ geringfügig überschritten.

Bedeutender Eintragspfad für Blei war in der Vergangenheit der atmosphärische Eintrag mit der Kronentraufe, der Anfang der 1980er Jahre auf der Fläche F007SLF1 bis zu 320 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ betrug (UTERMANN et al. 2019). Mit dem Verbot von bleihaltigem Benzin ab dem 01.02.1988 (BzBLG 1971) ging der Bleieintrag drastisch zurück und lag im Mittel der Jahre 2009–2019 nur noch zwischen 10 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (F021AUKI) und 23 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (F007SLF1). Im Vergleich zum Zeitraum 1993–2000 ist der Median (F021AUKI) bzw. das 90%-Quantil (F006SLB1) geringfügig angestiegen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass in der Humusaufgabe gebundenes Blei in Lösung geht und mit dem Sickerwasser in den Mineralboden verlagert wird (FORTMANN & MEESENBURG 2020).

Landwirtschaftlich genutzte BDF

Von den landwirtschaftlich genutzten BDF weist L033DINK mit 2,5 $\mu\text{g l}^{-1}$ den höchsten Median auf, gefolgt von L035KIRC und L032MARK mit 1,6 $\mu\text{g l}^{-1}$ und 1,1 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Abb. 15.3). An keinem Standort überschreitet das 90%-Quantil den Prüfwert für Blei von 25 $\mu\text{g l}^{-1}$ der Bundesbodenschutzverordnung für den Pfad Boden – Grundwasser (BBODSCHV 1999). Wird eine Beurteilung nach den Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser (LAWA 2016) vorgenommen, liegen die 90%-Quantile aller Standorte mit Ausnahme von L012BUEH, L037SCHL, L065JUEH und L070SEHL oberhalb des Schwellenwertes von 1,2 $\mu\text{g l}^{-1}$.

Ein bedeutender Eintragspfad für Blei in landwirtschaftlich genutzte Böden sind Klärschlämme. Allerdings hat keiner der hier betrachteten Standorte seit der Grundinventur Klärschlamm erhalten. Sowohl in organischen als auch mineralischen Düngern kann Blei enthalten sein. Eine Auswertung der Bleisalden für den Zeitraum von der Grundinventur bis zur 1. Wiederholungsinventur (ca. 10 Jahre) hat keine Überschreitung der zulässigen zusätzlichen jährlichen Blei-Fracht über alle Wirkungspfade nach BBODSCHV (1999) ergeben (KAMERMANN, GROH & HÖPER 2015). Für den Ackerstandort L070SEHL und den Grünlandstandort L035KIRC liegt diese Auswertung nicht vor.

Eine Überschreitung ist aber aufgrund der Düngertypen und des Düngenniveaus nicht zu erwarten.

Die höchsten Bleigehalte im Oberboden weist die Fläche L037SCHL mit im Mittel 3648 mg kg^{-1} Blei auf, gefolgt von L070SEHL mit 118 mg kg^{-1} (Tab. 15.2). Während das Blei am Standort L037SCHL eine anthropogene Ursache hat (Herkunft siehe Kupfer) ist es am Standort L070SEHL überwiegend geogen bedingt. Beide Standorte überschreiten den Vorsorgewert nach BBODSCHV (1999) für Blei von 100 mg kg^{-1} für Tonböden bzw. 70 mg kg^{-1} für Schluffböden. Dennoch sind die mittleren Bleikonzentrationen im Sickerwasser mit 0,11 $\mu\text{g l}^{-1}$ und 0,12 $\mu\text{g l}^{-1}$ vergleichsweise niedrig. Abbildung 15.4 zeigt, dass beide Standorte hohe pH-Werte über 7,5 aufweisen. Dieser Sachverhalt und das tonige bzw. schluffige Ausgangsmaterial der Bodenbildung setzt die Bleimobilität deutlich herab. Die drei Standorte L033DINK, L035KIRC und L032MARK mit den höchsten Blei-Konzentrationen im Sickerwasser weisen besonders niedrige pH-Werte zwischen 4,2 und 4,8 auf.

15.4.3. Cadmium

Forstlich genutzte BDF

Abbildung 15.5 zeigt die Cadmiumkonzentrationen im Sickerwasser der forstlich und landwirtschaftlich genutzten BDF. Auffallend sind die sehr hohen Cadmiumkonzentrationen auf den BDF-F F007SLF1 und F006SLB1, obwohl die Cadmium-Gehalte im Oberboden (0–5 cm) und in der Humusaufgabe deutlich unter den Hintergrundwerten liegen und die Flächen insgesamt geringe Cadmium-Gehalte bis 1 m Tiefe aufweisen (FORTMANN & MEESENBURG 2020). Die Cadmium-Konzentrationen im Sickerwasser der BDF-F F007SLF1 sind höher als auf allen anderen untersuchten BDF, die BDF F007SLB1 weist nach der Fläche L033DINK die dritthöchsten Konzentrationen auf. Dies dürfte auf die ehemals hohen anthropogenen Cadmiumeinträge mit der Kronentraufe zurückzuführen sein. Dieser Eintrag hat zwar seit Mitte der 1990er Jahre stark abgenommen und betrug im Mittel der Jahre 2009–2018 mit der Kronentraufe nur noch zwischen 0,5 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (F021AUKI, F006SLB1) und 1,0 $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (F007SLF1) (UTERMANN et al. 2019). Cadmium aus Einträgen früherer Jahre kann aber auf Grund der

sehr niedrigen pH-Werte (Abb. 15.6) der betroffenen Flächen gelöst worden sein, und zu den hohen Konzentrationen in der Bodenlösung führen. Die Geringfügigkeitsschwelle in Höhe von $0,3 \mu\text{g l}^{-1}$ (LAWA 2016) wird sowohl vom Median als auch dem 90%-Quantil überschritten. Auf der Fläche F021AUKI wird die Geringfügigkeitsschwelle durch das 90%-Quantil trotz höherer Gesamtgehalte im Boden eingehalten. Ursache hierfür könnte die größere Messtiefe sowie die Festlegung aufgrund einer hier erfolgten Kalkung sein. Der Prüfwert für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser wird auf allen drei BDF-F beim 90%-Quantil hingegen eingehalten. Auf allen drei BDF-F hat die Cadmiumkonzentration deutlich abgenommen. Auf Grund der zurückgegangenen atmosphärischen Stoffeinträge und der abnehmenden Konzentrationen im Sickerwasser ist derzeit nicht davon auszugehen, dass die zulässige Cadmiumfracht über alle Wirkungspfade (§ 8 Abs. 2 Nr. 2 BBODSCHG) überschritten wird.

Landwirtschaftlich genutzte BDF

Den höchsten Median der landwirtschaftlich genutzten BDF weist L033DINK mit $0,43 \mu\text{g l}^{-1}$ auf, gefolgt von L035KIRC und L032MARK mit $0,16 \mu\text{g l}^{-1}$ und $0,12 \mu\text{g l}^{-1}$ (Abb. 15.5). An keinem Standort überschreitet das 90%-Quantil den Prüfwert für Cadmium von $5 \mu\text{g l}^{-1}$ der Bundesbodenschutzverordnung für den Pfad Boden – Grundwasser (BBODSCHV 1999). Werden die Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser (LAWA 2016) herangezogen, liegen die 90%-Quantile der Standorte L032MARK, L033DINK und L035KIRC oberhalb des Schwellenwertes von $0,3 \mu\text{g l}^{-1}$.

Cadmium wird häufig über die mineralische Düngung in landwirtschaftlich genutzte Böden eingetragen, da es in mineralischen Phosphordüngern enthalten sein kann. Die Gehalte schwanken je nach Lagerstätte bzw. geologischer Herkunft des Rohphosphats (AMELUNG et al. 2018). Erst ab 2022 gilt EU-weit ein Grenzwert von 60 mg Cadmium pro kg Phosphatdünger (VERORDNUNG (EU) 2019/1009). Auch die atmosphärische Deposition ist ein Eintragungspfad. Zwischen 2000 und 2006 lagen die mittleren jährlichen Cadmiumdepositionen, gemessen an Freilandmessstellen der BDF-L, zwischen $0,4 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $1,2 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (KAMERMANN, GROH & HÖPER 2015), sind seitdem aber gesunken (KEUFFEL-TÜRK et al. 2021). Eine Auswertung der Cadmiumsalden für den Zeitraum von der

Grundinventur bis zur 1. Wiederholungsinventur (ca. 10 Jahre) hat keine Überschreitung der zulässigen zusätzlichen jährlichen Cadmiumfracht über alle Wirkungspfade nach BBODSCHV (1999) ergeben (KAMERMANN, GROH & HÖPER 2015). Für den Ackerstandort L070SEHL und den Grünlandstandort L035KIRC liegt diese Auswertung allerdings nicht vor. Eine Überschreitung ist aber auf Grund des Düngeneiveaus nicht zu erwarten.

Die Cadmiumgehalte im Oberboden (Tab. 15.2) überschreiten nur am Standort L037SCHL mit $14,4 \text{ mg kg}^{-1}$ aufgrund der schwermetallreichen Auensedimente (Herkunft siehe Kupfer) die Vorsorgewerte nach BBODSCHV (1999). Die Konzentrationen im Sickerwasser sind jedoch pH-Wert-bedingt vergleichsweise niedrig. Wie schon zuvor bei Kupfer und Blei steigen auch beim Cadmium die Konzentrationen im Sickerwasser bei sinkendem pH-Wert an (Abb. 15.6). Die drei Standorte mit den höchsten mittleren Cadmiumkonzentrationen im Sickerwasser (L033DINK, L035KIRC, L032MARK) weisen die niedrigsten pH-Werte der BDF-L zwischen 4,2 und 4,8 in der Einbautiefe der Saugsonden auf. Im Vergleich zu Kupfer, Zink und Blei wird Cadmium verhältnismäßig schwach an Tonminerale und organische Substanz gebunden (ROSS 1994).

15.4.4. Zink

Forstlich genutzte BDF

Abbildung 15.7 zeigt, dass der Median der Konzentrationen der beiden mit Nadelbäumen bestandenen BDF F007SLF1 und F021AUKI in der gleichen Größenordnung liegt, wie die der am höchsten belasteten BDF-L-Flächen. Mit 90%-Quantilen zwischen $133 \mu\text{g l}^{-1}$ (F006SLB1) und $180 \mu\text{g l}^{-1}$ (F021AUKI) liegen die Zinkkonzentrationen im Sickerwasser auf allen drei BDF-F deutlich über der Geringfügigkeitsschwelle (LAWA 2016). Der Prüfwert wird hingegen selbst von den maximal gemessenen Zinkkonzentrationen nicht überschritten. Zeitlich betrachtet hat die Zinkkonzentration in der Bodenlösung insbesondere auf der Fichten- und Kiefern-BDF deutlich abgenommen. Das 90%-Quantil war im Zeitraum 2009–2019 auf den beiden Nadelbaumflächen 40 % bzw. 60 % geringer als die Werte des Zeitraums 1993–2000. Hierin spiegelt sich der Rückgang des anthropogen bedingten luftbürtigen Stoffeintrags wieder.

Seit Mitte der 1980er Jahre hat der Zinkeintrag um bis zu 80 % abgenommen. Im Mittel der Jahre 2009–2018 betrug er zwischen $98 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (F006SLB1) und $144 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (F007 SLF1).

Landwirtschaftlich genutzte BDF

Abbildung 15.7 ist zu entnehmen, dass die Standorte L033DINK und L021GROE mit $173 \mu\text{g l}^{-1}$ und $109 \mu\text{g l}^{-1}$ Zink die höchsten mittleren Konzentrationen aufweisen, gefolgt von L035KIRC mit $71 \mu\text{g l}^{-1}$ Zink. An keinem Standort überschreitet das 90%-Quantil den Prüfwert für Zink von $500 \mu\text{g l}^{-1}$ der Bundesbodenschutzverordnung für den Pfad Boden – Grundwasser (BBODSCHV 1999). Wird eine Beurteilung nach den Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser (LAWA 2016) vorgenommen, liegen die 90%-Quantile aller Standorte mit Ausnahme von L032MARK, L037SCHL, L049GLIS, L065JUEH und L070SEHL oberhalb des Schwellenwertes von $60 \mu\text{g l}^{-1}$.

Zink ist ein essenzielles Spurenelement und wird u. a. über organische Dünger eingetragen. Besonders Schweinegülle kann hohe Konzentrationen aufweisen. Auch über die Deposition werden erhebliche Mengen zugeführt. Eine Auswertung der Zinksalden für den Zeitraum von der Grundinventur bis zur 1. Wiederholungsinventur (ca. 10 Jahre) ergab für den Standort L032MARK mit $1389 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und den Standort L033DINK mit $2202 \text{ g Zn ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ die höchsten Zinksalden der betrachteten BDF (KAMERMANN, GROH & HÖPER 2015). Diese beiden BDF-L überschreiten im genannten Zeitraum die zulässige zusätzliche jährliche Zinkfracht von $1200 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ über alle Wirkungspfade nach BBODSCHV (1999). Für den Ackerstandort L070SEHL und den Grünlandstandort L035KIRC liegt diese Auswertung nicht vor. Allerdings ist für den Standort L070SEHL eine Überschreitung der zulässigen zusätzlichen jährlichen Fracht auf Grund der ausschließlich mineralischen Düngung nicht zu erwarten. Das gilt auch für L035KIRC, da hier ausschließlich Rindergülle als organischer Dünger eingesetzt wird, die deutlich weniger Zink enthält als Schweinegülle.

In den Oberböden der betrachteten landwirtschaftlich genutzten BDF werden die Vorsorgewerte für Zink nach BBODSCHV (1999) an den Flächen L037SCHL und L070SEHL mit 4154 mg kg^{-1} und 214 mg kg^{-1} überschritten (Tab. 15.2). Beide Standorte weisen aber mit $1,2 \mu\text{g l}^{-1}$ (L037SCHL) und $13,1 \mu\text{g l}^{-1}$

(L070SEHL) Zink verhältnismäßig niedrige mittlere Zinkkonzentrationen im Sickerwasser auf. Während in L037SCHL Ton als Hauptbodenart vorliegt, ist es in L070SEHL Schluff, der pH-Wert liegt dort bei 7,7 und damit etwas höher als in L037SCHL mit 7,6 (Abb. 15.8). Die Kombination aus hohem Tongehalt und hohem pH-Wert reduziert die Zinkmobilität erheblich. Wie bereits bei den zuvor betrachteten Schwermetallen steigen die gemessenen Konzentrationen mit sinkendem pH-Wert an. Auffällig sind jedoch L032MARK und L049GLIS; trotz eines niedrigen pH-Wertes von 4,8 sind die mittleren Zinkkonzentrationen mit $6,5 \mu\text{g l}^{-1}$ und $6,3 \mu\text{g l}^{-1}$ verhältnismäßig niedrig. Was der Grund hierfür ist, kann vorläufig nicht geklärt werden. Weder die Zinkgehalte in den Oberböden (Tab. 15.2) noch in den Unterböden sind ungewöhnlich niedrig, und beide Standorte werden organisch gedüngt.

15.4.5. Uran

Landwirtschaftlich genutzte BDF

Abbildung 15.9 zeigt die mittleren Urankonzentrationen im Sickerwasser der landwirtschaftlich genutzten BDF. Auf den BDF-F wurde Uran nicht untersucht. Den höchsten Mittelwert (Median) weist L037SCHL mit $10,7 \mu\text{g l}^{-1}$ auf, gefolgt von L012BUEH mit $2,8 \mu\text{g l}^{-1}$. Für Uran existieren weder Vorsorgewerte nach BBODSCHV (1999) noch Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser (LAWA 2016). Seit dem 1. November 2011 gilt ein Grenzwert von $10 \mu\text{g l}^{-1}$ für Uran im Trinkwasser (TRINKWV 2017). Das 90%-Quantil der BDF L037SCHL würde diesen Grenzwert überschreiten.

Uran kommt natürlicherweise in unterschiedlichen Konzentrationen in Böden vor. Hohe Werte weisen Festgesteinsböden aus sauren Magmatiten und Metamorphiten, Tongesteinen sowie Kalk- und Mergelgesteinen auf (DIENEMANN & UTERMANN 2012). Der Standort L037SCHL, in der Okeraue gelegen, ist durch mittelalterlichen Bergbau mit Schwermetallen und auch mit Uran belastet, wobei die Uranbelastung vergleichsweise gering ausfällt. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass sich Uran auch aus mineralischen Phosphordüngern im Boden anreichern kann (DIENEMANN & UTERMANN 2012, SCHNUG & HANEKLAUS 2008, SMIDT

2011). Die Höhe des Urangelhaltes im Phosphordünger hängt von der jeweiligen Lagerstätte ab, besonders hoch ist er in Sedimentgesteinen (BATURIN & KOCHENOV 2001). Ob bzw. wie stark Uran aus Phosphordünger die Uranausträge mit dem Sickerwasser erhöht, ist noch nicht hinreichend untersucht (SMIDT 2011, DIENEMANN & UTERMANN 2012).

Den höchsten Urangelhalt im Oberboden weist die Fläche L051REIH mit 2,14 mg kg⁻¹ auf, gefolgt von L037SCHL, L012BUEH und L065JUEH (Tab. 15.2). Abbildung 15.10 zeigt die Urangelhalte im Sickerwasser (Median) in Abhängigkeit vom pH-Wert. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Schwermetallen erhöht sich die Urankonzentration im Sickerwasser mit steigendem pH-Wert. Die Urankonzentration im Sickerwasser der BDF L037SCHL weist allerdings einen deutlich höheren Median auf als Standorte wie L065JUEH und L070SEHL mit einem ähnlich hohen pH-Wert. Die Ursache für die erhöhte Mobilität ist unklar.

15.5. Ergebnisse im Grundwasser

Es wurden Messwerte von sieben Grundwassermessstellen (GWM) an sechs BDF-L ausgewertet. Für die BDF L012BUEH wurden mit L012BUEH-I und -II zwei Grundwassermessstellen herangezogen. Auf eine grafische Auswertung wird beim Grundwasser im Vergleich zum Sickerwasser verzichtet, da oftmals alle Messwerte einer Grundwassermessstelle kleiner der Bestimmungsgrenze sind oder nur wenige Messwerte über der Bestimmungsgrenze vorliegen. Zudem liegen für die Schwermetalle mit vier bis neun Messergebnissen je nach Parameter und Grundwassermessstelle (Tab. 15.3) vergleichsweise wenig auswertbare Messdaten vor, so dass im Folgenden auf die Boxplot-Darstellung verzichtet wird und nur die Medianwerte dargestellt werden (Tab. 15.4).

Entsprechendes gilt für die Auswertungen zu Uran. Aufgrund der geringen Messergebnisse zu Uran bzw. Uran gelöst sind nur für die Grundwassermessstellen L012BUEH-II und L037SCHL mit vier bis sechs Messergebnissen (Tab. 15.3) Medianwerte ermittelt worden.

Tab. 15.4: Medianwerte der Nachweise zu den Schwermetallen Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) sowie Uran (U) für sieben Grundwassermessstellen (GWM) im Zeitraum 2008–2018 im Vergleich zu den Schwellenwerten der Grundwasserverordnung (GRWV 2017) und den Geringfügigkeitsschwellenwerten (GfS) der LAWA (LAWA 2016).

Literatur bzw. GWM an BDF-L	Schwellenwerte bzw. Medianwerte in µg l ⁻¹ (fett: Nachweise > Bestimmungsgrenze; gelb: Überschreitungen des GfS)				
	Pb	Cd	Cu	Zn	U und *U gelöst
GrwV 2017	10	0,5	–	–	–
GfS 2016	1,2	0,3	5,4	60	–
L012BUEH-I	<1	0,05	1,05	<10	–
L012BUEH-II	<1	<0,05	<1	<10	0,11*
L021GROE	<1	0,19	4,4	37,5	–
L032MARK	<1	0,34	7,4	44	–
L033DINK	<1	<0,05	<1	<10	–
L037SCHL	<1	0,04	2,1	9,9	19,5 / 19*
L049GLIS	<1	0,07	<1	<10	–

In der Tabelle 15.4 sind die Medianwerte der Nachweise zu den Schwermetallen Blei, Cadmium, Kupfer und Zink sowie Uran bzw. Uran gelöst den Schwellenwerten der Grundwasserverordnung (GRWV 2017) und den Geringfügigkeitsschwellenwerten (GfS) der LAWA (LAWA 2016) gegenübergestellt. In der Grundwasserverordnung ist für Uran kein Schwellenwert angegeben, und es wurde auch kein Geringfügigkeitsschwellenwert für Uran im Grundwasser abgeleitet. Somit liegt keine Bewertungsgrundlage für Uran im Grundwasser vor. Zur Bewertung bietet es sich daher an, den gesundheitlichen Grenzwert von 10 µg l⁻¹ aus der Trinkwasserverordnung (TRINKWV 2017) heranzuziehen.

Insgesamt ergibt sich ein heterogenes Bild (Tab. 15.4). Standortunterschiede sind deutlich erkennbar. Am Standort L033DINK sind alle sechs bzw. sieben analysierten Messwerte für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink unter der Bestimmungsgrenze. Entsprechend sind die Medianwerte für die Schwermetalle ebenfalls unter der Bestimmungsgrenze. Im Gegensatz dazu sind am Standort L032MARK alle fünf bzw. sechs ermittelten Messwerte für Cadmium, Kupfer und Zink über der Bestimmungsgrenze. Der Medianwert für Cadmium überschreitet geringfügig den Geringfügigkeitsschwellenwert von 0,3 µg l⁻¹. Der Medianwert für Kupfer hingegen wird deutlich überschritten. Die höchsten Medianwerte liegen für Zink an den Standorten L021GROE und L032MARK mit 37,5 bzw. 44 µg l⁻¹ vor. Die Medianwerte für Blei sind an allen Grundwassermessstellen kleiner 1 µg l⁻¹.

Die Schwellenwerte der Grundwasserverordnung für Blei und Cadmium werden an keiner Grundwassermessstelle von den Medianwerten überschritten. Überschreitungen der Geringfügigkeitsschwellenwerte (LAWA 2016) treten nur am Standort L032MARK bei Cadmium und Kupfer auf. Dieses Ergebnis überrascht, denn im Sickerwasser fällt besonders der Standort L033DINK durch hohe Konzentrationen bei Blei, Cadmium, Kupfer und Zink auf. Allerdings ist bei den Grundwasseranalysen zu beachten, dass die Grundwassermessstellen ein deutlich größeres Einzugsgebiet haben als die verwendeten Saugsonden. Wechselnde Bodenverhältnisse und Verdünnungseffekte können zu abweichenden Ergebnissen zwischen Sicker- und Grundwasser führen. Das Einzugsgebiet der Grundwassermessstelle L032MARK umfasst zudem Wald- und Siedlungsflächen, die ganz andere Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser aufweisen können als landwirtschaftlich genutzte Flächen.

Interessant sind die Ergebnisse zu Uran im Grundwasser: Im Sickerwasser weist L037SCHL deutlich höhere Uran-Konzentrationen als L012BUEH auf. Das findet sich so auch im Grundwasser wieder. An der Messstelle L012BUEH-II liegt der Medianwert für Uran gelöst deutlich unter dem Trinkwassergrenzwert von $10 \mu\text{g l}^{-1}$. Gleiches gilt für die flacher verfilterte Messstelle (L012BUEH-I), hier liegt nur ein Messwert von 2013 von $0,93 \mu\text{g l}^{-1}$ vor. Demgegenüber wird der Trinkwassergrenzwert für Uran an der Grundwassermessstelle L037SCHL fast um das Doppelte überschritten.

15.6. Zusammenfassung

15.6.1. Forstlich genutzte BDF

Löslichkeit und Mobilität anthropogen eingetragener Schwermetalle werden neben dem Humus- und Tonmineralgehalt stark vom pH-Wert der Böden beeinflusst. Die pH-Werte ($\text{pH}(\text{CaCl}_2)$) der ausgewerteten BDF-F sind mit Werten zwischen 3,9 und 4,0 sehr gering und deutlich niedriger als auf allen BDF-L. Trotz höherer luftbürtiger anthropogen bedingter Blei- und Kupfer-Einträge sind die Konzentrationen dieser Elemente im Sickerwasser der BDF-F geringer als bei den BDF-L mit niedrigen pH-Werten. Ursache hierfür dürfte sein, dass im Rahmen der Bewirtschaftung von Wäldern keine Schwermetalle durch Düngung oder

Pflanzenschutzmittel in den Boden gelangen. Im Vergleich zum Zeitraum 1993–2000 (hier nicht dargestellt) haben die Konzentrationen im Sickerwasser von Cadmium, Kupfer und Zink auf allen drei BDF-F in Folge sinkender atmosphärischer Einträge abgenommen. Bei Blei deutet sich hingegen auf den BDF-F eine Zunahme der Konzentration an, die sich auf F021AUKI in einem höheren Median, auf F006SLB1 in einem höheren 90%-Quantil oder auf F007SLF1 in gestiegenen maximalen Konzentrationen zeigt.

15.6.2. Landwirtschaftlich genutzte BDF

Eine Überschreitung der Prüfwerte für den Pfad Boden – Grundwasser (BBODSCHV 1999) wird lediglich für das Schwermetall Kupfer am Standort L033DINK festgestellt. Alle anderen Schwermetalle bzw. Standorte halten die Prüfwerte ein. Da der Standort sowohl im Unterboden als auch Oberboden sehr niedrige pH-Werte unter 4,5 aufweist, würde eine stufenweise Aufkalkung auf den Ziel-pH von 5,5 (MÜLLER & WALDECK 2011) den Austrag mit dem Sickerwasser vermutlich deutlich reduzieren. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte der Schwermetalle Kupfer, Zink, Cadmium und Blei werden insbesondere an den Standorten mit niedrigem pH-Wert häufig überschritten. Allerdings dienen diese Schwellenwerte bei der Bewertung von Gehalten im Sickerwasser nur zur Orientierung, da sie für das Grundwasser abgeleitet wurden. Dennoch ist auch in diesen Fällen eine Aufkalkung der Oberböden hin zum Ziel-pH-Wert erstrebenswert.

15.6.3. Grundwasser

Bezüglich der BDF mit Saugsondenanlagen zur Sickerwassergewinnung gibt es Grundwassermessstellen mit Schwermetallanalysen nur an den BDF-L L012BUEH, L021GROE, L032MARK, L033DINK, L037SCHL und L049GLIS. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte im Grundwasser werden nur am Standort L032MARK von Cadmium und Kupfer überschritten. Mögliche Gründe für die Abweichungen zwischen Grund- und Sickerwasser sind das größere Einzugsgebiet der Grundwassermessstellen mit teilweise anderer Flächennutzung und Verdünnungseffekte.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwermetallausträge mit dem Sickerwasser stark vom pH-Wert beeinflusst sind. Die Standorte mit einem sandigem Ausgangsmaterial für die Bodenbildung weisen hier die niedrigsten pH-Werte in der Einbautiefe der Saugsonden auf. Das erhöht mit Ausnahme von Uran die Schwermetallmobilität bzw. -auswaschung deutlich. Wieviel mit dem Sickerwasser ausgetragen wird, hängt gerade bei niedrigen pH-Werten aber auch vom Schwermetalleintrag ab. Ist dieser niedrig, kann bei gleichbleibendem pH-Wert nur noch die Schwermetallmenge ausgewaschen werden, die im Laufe eines Jahres aus der Verwitterung freigesetzt wird.

15.7. Literatur

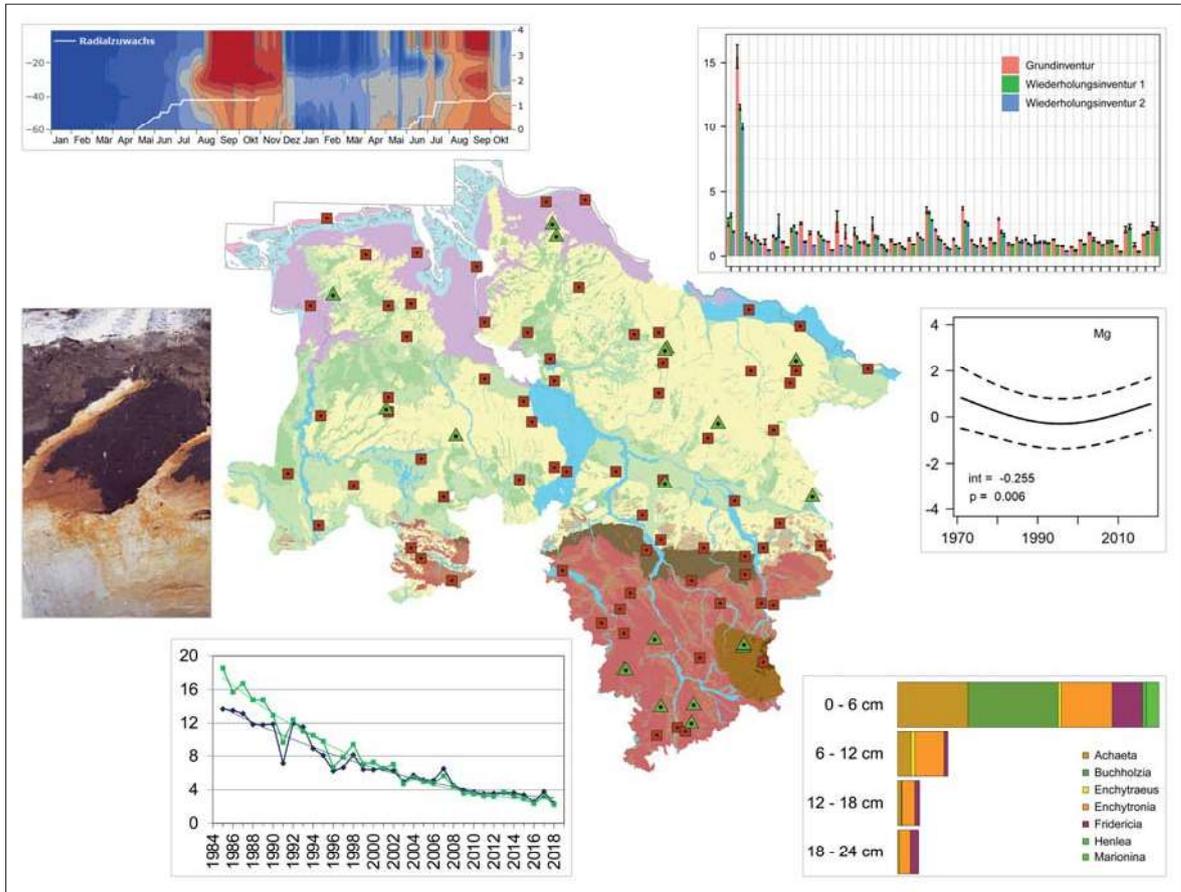
- AMELUNG, W., BLUME, H.-P., FLEIGE, H., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2018): Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde. – 17. überarbeitete Auflage; Berlin (Springer).
- BATURIN, G. N. & KOCHENOV, A. V. (2001): Uranium in Phosphorites. – *Lithology and Mineral Resources* **36/4**: 303–321.
- BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I: 502), das zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I: 3465) geändert worden ist. – <<https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BJNR050210998.html>>.
- BUNDES-BODENSCHUTZ- UND ALTLASTENVERORDNUNG – BBODSCHV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I: 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I: 1328) geändert worden ist. – <<https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv/BJNR155400999.html>>.
- BZBLG —GESETZ ZUR VERMINDERUNG VON LUFTVERUNREINIGUNGEN DURCH BLEIVERBINDUNGEN IN OTTOKRAFTSTOFFEN FÜR KRAFTFAHRZEUGMOTOREN (BENZINBLEIGESETZ) (1971): Benzinbleigesetz vom 5. August 1971 (BGBl. I: 1234), das zuletzt durch Artikel 73 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I: 1474) geändert worden ist. – <<https://www.gesetze-im-internet.de/bzblg/BJNR012340971.html>>.
- DIENEMANN, C. & UTERMANN, J. (2012): Uran in Boden und Wasser. – Umweltbundesamt, Texte **37/2012**; Dessau-Roßlau, Download unter <<http://www.uba.de/uba-info-medien/4336.html>>.
- FORTMANN, H. & KÖNIG, N. (1999–2008): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltlabors der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, 2. Ergänzung, Teil 1–4. – Forschungszentrum Waldökosysteme Reihe B, Bd. **75–78**.

- FORTMANN, H. & MEESENBURG, H. (2020): Schwermetallgehalte und -vorräte in Böden forstlich genutzter niedersächsischer Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF-F). – *GeoBerichte* (dieser Band, Kap. 6).
- GRWV – GRUNDWASSERVERORDNUNG (2017): Verordnung zum Schutz des Grundwassers vom 9. November 2010, zuletzt geändert durch die Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I: 1044) Bonn. – <https://www.gesetze-im-internet.de/grwv_2010/GrwV.pdf>.
- KAMERMANN, D., GROH, H. & HÖPER, H. (2015): Schwermetallein- und -austräge niedersächsischer Boden-Dauerbeobachtungsflächen. – *GeoBerichte* **30**: 56 S., 4 Abb., 29 Tab., Anh.; Hannover (LBEG).
- KEUFFEL-TÜRK, A. B., SCHELER, B., HÖPER, H., AHRENDTS, B. & MEESENBURG, H. (2021): Stoffeinträge durch Deposition. – *GeoBerichte* (dieser Band, Kap. 14).
- LAWA (2016): Ableitung von Geringfügigkeitschwellenwerten für das Grundwasser. – aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart.
- MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – *GeoBerichte* **19**: 415 S., 37 Abb., 335 Tab.; Hannover (LBEG).
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2014): Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) - Güte- und Standmessnetz Grundwasser. – Reihe Grundwasser **18**: 46 S.
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2015): Themenbericht Uran - Sonderuntersuchungen im Grundwasser, Datenauswertung 2009–2013. – Reihe Grundwasser **22**, 18 S.
- ROSS, S. M. (1994): Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. – In: Ross, S. M. (Ed.): *Toxic metals in soil-plant systems*. – p. 63–152; Chichester (Wiley).
- SCHNUG, E. & HANEKLAUS, S. (2008): Dispersion of uranium in the environment by fertilization. – In: MERKEL, B. J. & HASCHE-BERGER, A. (Hrsg.): *Uranium, Mining and Hydrogeology*. – p. 45–53; Berlin (Springer).
- SMIDT, G. A. (2011): Mobility of fertiliser-derived uranium in arable soils and its contribution to uranium concentrations in groundwater and tap water. – Dissertation, Jacobs University; Download unter <<https://opus.jacobs-university.de/frontdoor/index/index/docId/82>>.
- TRINKWV – TRINKWASSERVERORDNUNG (2017): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch vom 21.05.2001, zuletzt geändert am 17.07.2017 – BGBl I: 2615; Bonn.
- UTERMANN, J., AYDIN, C. T., BISCHOFF, N., BÖTTCHER, J., EICKENSCHIEDT, N., GEHRMANN, J., KÖNIG, N., SCHELER, B., STANGE, F. & WELLBROCK, N. (2019): Heavy Metal Stocks and Concentrations in Forest Soils. – In: WELLBROCK, N. & BOLTE, A. (Hrsg.): *Status and Dynamics of Forests in Germany*. – S. 199–203; Cham (Springer).
- VERORDNUNG (EU) (2019/1009): Verordnung (EU) 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003. – Amtsblatt der Europäischen Union **L170** vom 25.06.2019.

GeoBerichte 39



LANDESAMT FÜR
BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE



30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen



Niedersachsen



GeoBerichte 39

Landesamt für
Bergbau, Energie und Geologie

30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen

HEINRICH HÖPER & HENNING MEESENBURG
(Hrsg.)

Hannover 2021

Impressum

Herausgeber: © Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Stilleweg 2
30655 Hannover
Tel. (0511) 643-0
Fax (0511) 643-2304

Download unter www.lbeg.niedersachsen.de

1. Auflage.

Version: 29.09.2021

Redaktion: Ricarda Nettelmann

Mail: bodenkundlicheberatung@lbeg.niedersachsen.de

Titelbild: BDF auf Bodengroßlandschaften, Deposition Sulfat, Profilgrube L056MEIN, Radialzuwachs Fichte, Organika BDF-L, Nährstoffbilanz Mg, Bodenfauna (Collage: H. Höper, LBEG).

ISSN 1864–6891 (Print)

ISSN 1864–7529 (digital)

DOI 10.48476/geober_39_2021