Abschlussbericht

Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Gesamtgehalte von Haupt- und Spurenelementen in Böden

Finanziell unterstützt durch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen

Bericht abgegeben an das MUNLV am 31.08.2002; im Auftrag des Ministers für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen

Bearbeitung:

Dr. agr. Volker Hornburg

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen - Landesbetrieb

De- Greiff-Str. 195 - 47803 Krefeld

Postfach 10 07 63 - 47707 Krefeld

Tel.: 0 21 51 / 897 - 467
Fax.: 0 21 51 / 897 - 505
Mail: hornburg@gd.nrw.de
Internet: http://www.gd.nrw.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis und Text sind verknüpft!

"Bitte gehen Sie im Inhaltsverzeichnis auf den gewünschten Punkt. Per "Mausklick" auf das sich zeigende Handzeichen erreichen Sie die gewünschte Textseite."

1. EINFÜHRUNG
- 1.1 Problemstellung
- 1.2 Zielsetzung der Untersuchungen

2. MATERIAL UND METHODEN
- 2.1 Material
- 2.2 Methoden
  - 2.2.1 Bestimmung der allgemeinen Bodenkennwerte
  - 2.2.2 Aufschlussverfahren
  - 2.2.3 Messverfahren und Bestimmungsgrenzen
  - 2.2.4 Datenauswertung

3. ERGEBNISSE
- 3.1 Häufigkeitsverteilung der Böden nach verschiedenen Kriterien
- 3.2 Allgemeine Bodenkennwerte
- 3.3 Total- und Königswasser-extrahierbare Gehalte der untersuchten Elemente in den zum Methodenvergleich verwendeten Böden
- 3.4 Beziehungen zwischen den totalen und Königswasser-extrahierbaren Elementgehalten
  - 3.4.1 Blei
  - 3.4.2 Cadmium
  - 3.4.3 Chrom
  - 3.4.4 Kupfer
  - 3.4.5 Nickel
  - 3.4.6 Quecksilber
  - 3.4.7 Thallium
  - 3.4.8 Zink

4. ABSCHLIESSENDE BETRACHTUNGEN

5. ZUSAMMENFASSUNG

6. LITERATUR

Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Gesamtgehalte von Haupt- und Spurenelementen in Böden

von

Volker Hornburg

1 EINFÜHRUNG

1.1 PROBLEMSTELLUNG

In der bodenkundlichen Praxis stellt sich vermehrt die Frage nach der Vergleichbarkeit von Daten. Dies insbesondere dort, wo Daten aus verschiedenen Quellen gesammelt und ausgewertet werden. Dabei könnte die Transformation unterschiedlicher Daten auf eine Bezugsebene helfen Informationen zu verdichten, statistische Sicherheiten zu verbessern und analytische Kosten durch Nutzung mehrerer Datenquellen zu senken.

Bei der Untersuchung von Spuren- und Hauptelementen in Locker- und Festgesteinen werden je nach Untersuchungsziel verschiedene Total- und Teilaufschlussverfahren eingesetzt. Letztere erfassen, wie der Name schon sagt, lediglich Anteile der Totalkonzentration eines Elementes. Insgesamt werden diese Gehalte häufig als Gesamtgehalt, Gesamtkonzentration oder Gesamtfraktion bezeichnet, was insbesondere für den Bereich der Teilaufschlussverfahren gilt. Die Vergleichbarkeit der Methoden wird am besten durch Korrelationsrechnung mittels B-Wert (Bestimmtheitsmaß R^2 von 0 - 100 %) gekennzeichnet. Zu jeder Beziehung sollte der durch Eichung bestimmte B-Wert und der Gültigkeitsbereich (Minimum und Maximum der je Methode und Probenkollektiv erhaltenen Elementgehalte) angegeben werden. Eine gute Methode sollte mindestens B-Werte von 90% erreichen, wobei sich die Regressionsgleichung auf eine breite Matrix unterschiedlich zusammengesetzter und belasteter Bodenproben beziehen sollte. Beziehungen mit geringerer Aussagekraft sind immerhin, zumindest teilweise, noch für Anhaltswerte brauchbar.

Im Bereich der Geowissenschaften ist die Ermittlung echter Totalgehalte das übliche Verfahren, da nur auf dieser Basis einwandfreie Bilanzierungen durchgeführt werden können. Dazu wird vor allem die Röntgenfluoreszenzspektroskopie mit Schmelzaufschluss oder Preßling oder nasschemische (Druck)-Aufschlussverfahren mit Flusssäure bzw. -gemischen und AAS- und ICP-Spektroskopie angewendet.

Im Bereich der Umwelt muss aufgrund vorhandener Regelwerke zur Bestimmung von Elementgesamtgehalten in Böden der Königswasser-(KW)extrakt (DIN 38414 Teil 7) verwendet werden; obwohl die Methode nur für wenige Elemente den Totalgehalt

anzeigt und nicht direkt den pflanzenverfügbaren und verlagerbaren Elementgehalt widergibt. So hat die Bundesrepublik Deutschland zum Schutz der Böden vor einer übermäßigen Belastung durch Schwermetalle durch Ausbringung von Klärschlamm die Abfall-Klärschlamm-Verordnung (*AbfKlärV 1982*, 1992) erlassen. Sie reglementiert die Aufbringungsmenge an Schlammtrockenmasse pro Fläche und schreibt gesetzlich festgelegte Königswassser-extrahierbare Höchstwerte (Grenzwerte) für Schwermetalle in Böden und in der Schlammtrockenmasse vor.

Auch im Entwurf des untergesetzlichen Regelwerkes zum Bundes-Boden-Schutzgesetz (*BBodSchG*, 1998) basieren die dort angegebenen Vorsorgewerte auf Königswasser-extrahierbaren Elementgehalten. Darüber hinaus wird der Königswasserextrakt im Bereich der Waldbodenanalytik verwendet. Nach der Bundesarbeitsanleitung zur Bodenzustandserhebung im Wald (*BZE*, 1994) werden Humusproben vorzugsweise nach diesem Verfahren untersucht. Bei Dauerbeobachtungsflächen unter Forst hingegen, erfolgt die Bestimmung des Stoffbestandes in Mineralböden wieder auf Basis echter Totalaufschlussverfahren.

In der bodenkundlichen Praxis wird daher dringend eine Vergleichbarkeit der Daten gefordert. Aussagen dazu setzen (**i**) Auswertungen auf einem breiten Spektrum unterschiedlich zusammengesetzter und belasteter Bodenproben, (**ii**) die Verwendung genormter Aufschluss- und Messmethoden sowie (**iii**) die Anwendung und Dokumentation anerkannter statistischer Verfahren voraus.

1.2 ZIELSETZUNG DER UNTERSUCHUNGEN

Die im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen durchgeführten Untersuchungen haben zum Ziel, fachliche Methoden für die Nutzung von Werten zu liefern, die nicht nach der Methode des Bundes-Boden-Schutzgesetzes gewonnen wurden.

Ziel der Arbeiten war es, unter kostengünstigsten Bedingungen und Nutzung bereits vorhandener Daten, Aussagen zur Vergleichbarkeit zweier häufig verwendeter nasschemischer Verfahren, dem Flusssäureaufschluss und Königswasserextrakt, zu machen.

2 MATERIAL UND METHODEN

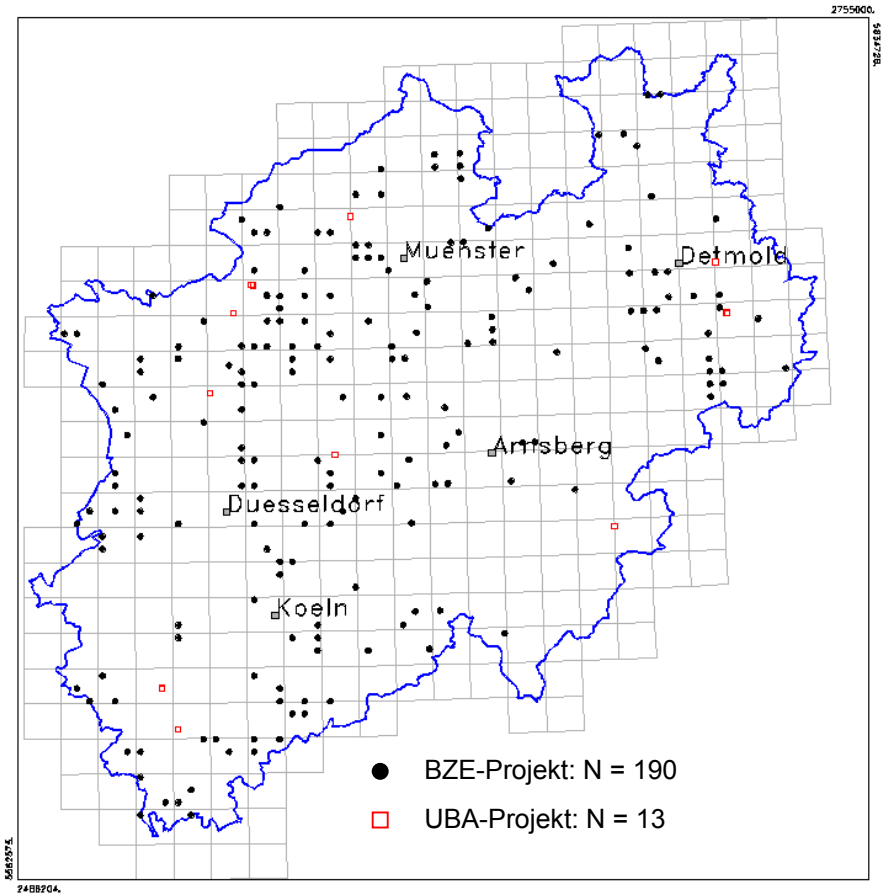
2.1 MATERIAL

Es wurden 354 Bodenproben von 190 Waldstandorten in Nordrhein-Westfalen auf ihre Total- und Königswasser-extrahierbaren Gehalte an Al, As, Be, Bi, Cd, Co Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sb, Sn, Tl, V und Zn untersucht. Für das Probenmaterial lagen bereits zum Zeitpunkt der Auswahl umfangreiche Daten zum pH-Wert, Humus- und Carbonatgehalt, zur potentiellen Kationen-Austausch-Kapazität (KAKp) und zur Körnung vor. Bei den ausgewählten Proben handelt es sich um Mineralbodenproben aus dem Projekt zur "Bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE)", welche in den Jahren 1991 - 1992 entnommen und zum Zeitpunkt der Probenauswahl bereits umfangreichen Auswertungen unterlagen.

Als Kriterium für die Auswahl der Bodenproben diente **i)** die im Probenlager noch vorhandene Probenmenge und **ii)** der Gehalt an HNO_3-löslichem Cd, Cu, Pb und Zn. Ausgewählt wurden nur Mineralbodenproben aus dem Entnahmebereich $\geq$ 90 cm unter Geländeoberfläche (uGO), da etwaige Umrechnungen vor allem Proben aus dem Bereich der Geologie betreffen, die hauptsächlich aus dem mineralischen Untergrund stammen, anthropogen meist nicht beeinflusst sind und i. d. R. mit Totalaufschlussverfahren behandelt werden.

Zur Verbesserung der statistischen Sicherheit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurden als zweites Datenkollektiv die Ergebnisse weiterer 85 Mineralbodenproben von 12 Wald- und einem Grünlandstandort in die Auswertungen einbezogen. Es handelt sich dabei um Proben, die in den Jahren 1986 - 1987 im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten "Gemeinschaftsprojekt der Geologischen Dienste in Deutschland (UFO-PLAN-Nr. 10701001)" in Nordrhein-Westfalen entnommen und in den Laboratorien der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe auf ihre Total- ($HF/HCl/HClO_4$) und Königswasser-extrahierbaren Gehalte an Cu, Ni, Pb und Zn untersucht wurden (*Hornburg*, 1996).

Den Auswertungen für Cd, Cu, Ni, Pb und Zn standen somit die Ergebnisse von 439 Bodenproben von 203 Standorten (202 Wald, 1 Grünland), den Auswertungen von Al, As, Be, Bi, Co Cr, Fe, Hg, Mg, Mn, P, Sb, Sn, Tl und V die Ergebnisse von 354 Bodenproben von 190 Waldflächen in Nordrhein-Westfalen zur Verfügung.


Muenster
Detmold
Arnsberg
Duesseldorf
Koeln
BZE-Projekt: N = 190
UBA-Projekt: N = 13

Karte

2.2 METHODEN

2.2.1 BESTIMMUNG DER ALLGEMEINEN BODENKENNWERTE

Bei der Projektgestaltung war es oberstes Ziel, bereits vorhandene Informationen zu nutzen. Für die Proben aus dem BZE-Projekt lagen bereits die Werte für Humus, Carbonat, Körnung, Bodenacidität und potentielle Kationen-Austausch-Kapazität (KAK_p) vor. Die Untersuchungen zur Erfassung der wichtigsten Bodenkennwerte wurden an lufttrockener Feinerde (< 2 mm) nach folgenden Methoden durchgeführt:

pH Bestimmung des pH-Wertes in H_20 und KCl-Lösung (1 molar = M)
Corg Colorimetrische Bestimmung des Corg-Gehaltes nach nasser Veraschung mit Kaliumdichromat
Körnung Kombiniertes Sieb und Sedimentationsverfahren nach KÖHN
Carbonat Gasvolumetrisch nach SCHEIBLER
KAKp Potentielle Kationen-Austausch-Kapazität ($cmol_c\ kg^{-1}$) und Bestimmung der Einzelkationen nach MEHLICH mit Bariumchlorid und Magnesium-Rücktausch

Die Methoden sind auch in der "Arbeitsanleitung zur Bundesweiten Bodenzustanderhebung im Wald (BZE)" (*MELF*, 1990) beschrieben.

Die Proben aus dem UBA-Projekt wurden nach dem gleichen Methodenspektrum untersucht. Nur anstelle der pH-KCl-Werte wurde hier die Bodenacidität in 0,01 M $CaCl_2$-Lösung gemessen. Aus diesem Grund werden den folgenden Auswertungen etwaige Einflüsse der Bodenacidität auf die B-Werte der Regressionen mit Hilfe der pH-H_2O-Werte geprüft wurden.

2.2.2 AUFSCHLUSSVERFAHREN

Der *Totalaufschluss* wurde in einem Druckaufschlusssystem nach folgenden Arbeitsschritten durchgeführt: 2 - 5 g lufttrockene Feinerde < 2 mm werden in einer Achatmühle gemahlen. Vom Mahlgut werden 250 mg in einen PTFE-Becher gegeben, mit 3 ml Flusssäure plus 1 ml Salpetersäure versetzt und bei Temperaturen zwischen 80° und 220°C unter Druck bis zur Trockene abgeraucht. Der Aufschluss weist eine grauweiße Farbe auf. Für die Messungen mit dem AAS werden die Rückstände in 5 M HNO_3 aufgenommen, im Ultraschallbad in Lösung gebracht und mit entionisiertem Wasser auf 0,5 M HNO_3 verdünnt aufgefüllt.

Die Extraktion mit *Königswasser (KW)* erfolgte nach der Arbeitsvorschrift DIN 38414 Teil 7.

2.2.3 Messverfahren und Bestimmungsgrenzen

In Tabelle 1 sind für die untersuchten Elemente die verschiedenen Messfahren und Bestimmungsgrenzen aufgeführt. Als Bestimmungsgrenze wurde jeweils die 2-fache Nachweisgrenze einer Blindwertmessreihe eingesetzt. Bei der Bestimmungsgrenze handelt es sich um die Angabe des kleinsten bestimmbaren Wertes, der im wesentlichen von den Kalibrierungsverhältnissen am und im Gerät abhängig ist. Da diese täglich variierenden Einflüssen unterliegen, kann für die Bestimmungsgrenze im Grunde kein exakter Wert angegeben werden.

Tabelle 1: Bestimmungsgrenzen der untersuchten Spuren- und Hauptelemente im Totalaufschluss und KW-Extrakt

Element	Messverfahren	Bestimmungsgrenze **Totalgehalte** mg/kg	Bestimmungsgrenze **KW-Extrakt** mg/kg
Al	ICP-AES	400	400
As	ICP-MS / Hydrid AAS	0.05	0.1
Be	ICP-MS / ICP-AES	0.01	0.005
Bi	ICP-MS	0.01	0.01
Cd	ICP-MS	0.01	0.01
Co	ICP-AES / ICP-MS	0.2	0.2
Cr	ICP-AES	1.0	1.0
Cu	ICP-AES	0.1	0.05
Fe	ICP-AES	600	600
Hg	Kaltdampf-AAS	0.003	0.004
Mg	ICP-AES	100	100
Mn	ICP-AES	5	5
Ni	ICP-AES / ICP-MS	0.7	0.7
P	ICP-MS/ ICP-AES	50	50
Pb	ICP-MS / ICP-AES	1	1
Sb	ICP-MS	0.1	0.02
Sn	ICP-MS	0.1	0.01
Tl	ICP-MS	0.01	0.005
V	ICP-OES	1	1
Zn	ICP-OES	2	2

2.2.4 Datenauswertung

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm SPSS 10.0.7 durchgeführt.

Schritt 1
Prüfung auf Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov. Berechnung des Z-Wertes und der asymptotischen Signifikanz (> 0). In allen Fällen waren die log 10-

transformierten Daten einer Normalverteilung näher als die nicht-transformierten Daten. Aus diesem Grund wurden die im folgenden dargestellten Beziehungen auf Basis transformierter Daten berechnet.

Schritt 2
Ableitung der Regressionen und der 95%-igen Vertrauensbereiche für Schätz- und Einzelwert, zunächst bei Betrachtung aller Werte.

Schritt 3
Kennzeichnung von Ausreißern (Wertepaaren) als Quotient (> 3) aus der Differenz zwischen Beobachtungswert der abhängigen Variable (y_n) minus Schätzwert aus der Regression (y_s) minus Mittelwert der Residuen aller beobachteten Werte (x_R), dividiert durch die Standardabbweichung der Residuen aller beobachteten Werte (s_R). Das SPSS-Programm weist das Ergebnis als "zre-Wert" (Standardized Residual) aus.

$$\frac{(y_n - y_s) - x_R}{s_R} = \mathbf{zre}$$

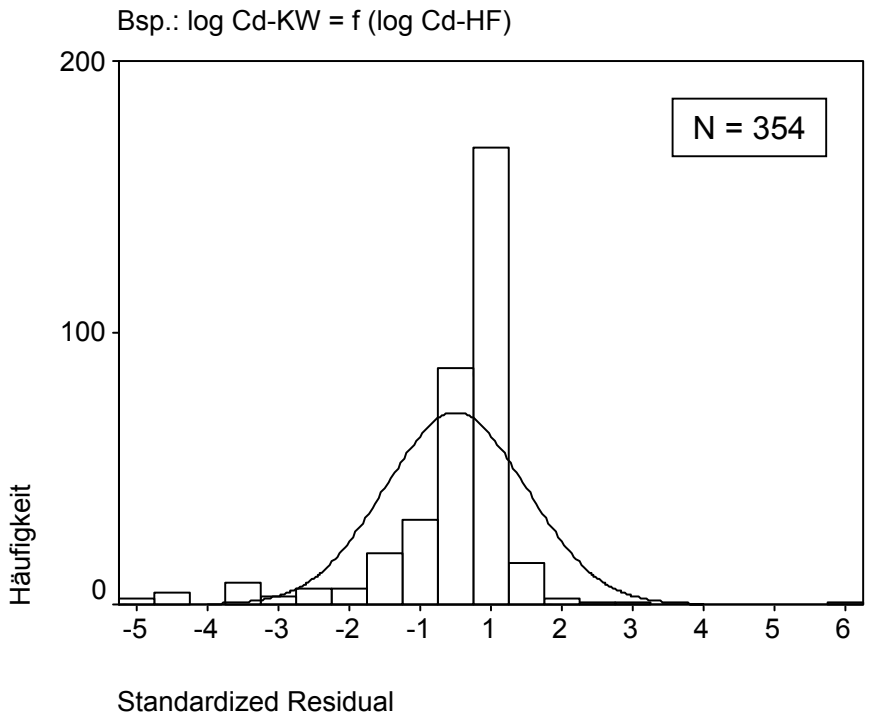


Abbildung 1a: Grafische Darstellung der zre-Werte für die Grundgesamtheit einer Beziehung am Beispiel Cadmium.

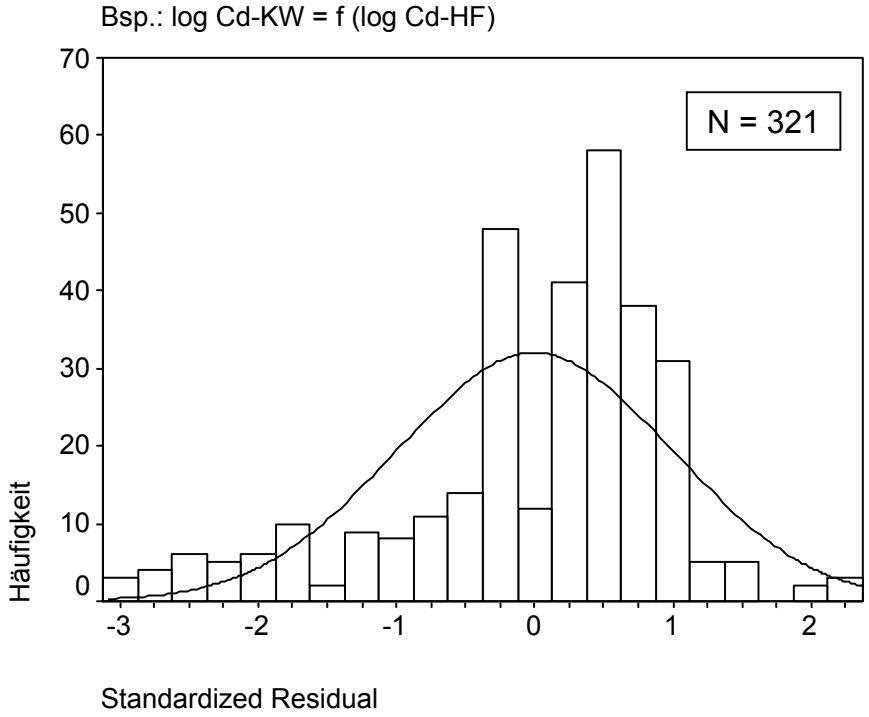


Abbildung 1b: Grafische Darstellung der zre-Werte $\leq$ 3 (ohne Ausreißer) am Beispiel Cadmium

Schritt 4
Multiple schrittweise Regressionsanalyse der Beziehungen zwischen X-KW und X-HF (X = Element) und umgekehrt, in Abhängigkeit weiterer unabhängiger Einflussfaktoren wie pH, Humus, Sand-, Schluff- Tongehalt, KAK_p, Al, Fe und Mn auf die jeweils abhängige Variable X-KW oder X-HF.

3 ERGEBNISSE

3.1 HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BÖDEN NACH VERSCHIEDENEN KRITERIEN

VERTEILUNG NACH TIEFENSTUFE, HORIZONT UND HORIZONTBEREICH

In Tabelle 2 ist dokumentiert, welche Horizontbezeichnungen in die Horizontgruppe A (Oberboden), B (Unterboden) und C (mineralogischer Untergrund) zusammengefasst wurden. Gr,-, Go-, Gor- und Übergangshorizonte, wie z. B. Sd-G(o)r- oder C+Bt-Sd-Horizonte, wurden dem C-Bereich zugeordnet. Die Frage der Zuordnung kann je nach Fachrichtung, Agrarwissenschaft (Pflanzenernährung) oder Geologie (Ableitung von Hintergrundwerten in Ausgangsgesteinen der Bodenbildung), unterschiedlich beantwortet werden.

Tabelle 2: Häufigkeiten der Bodenproben in Abhängigkeit von Entnahmetiefe, Horizont und Horizontgruppe

Horizont-gruppe	Horizont	Entnahmetiefenstufe in cm				
		0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 140	140 - 220
A	Ah	4				
	Ahe	1				
B	(Sd-Go)+Gco				1	
	Ah-Sw	2				
	B(h)s+Cv1				1	
	Bhs	1				
	Bs	2	1			
	Bs-Sd				1	
	Bs-Sw				1	
	Bt-Sd+IISd				2	
	Bt-Sd2				1	
	Btv				1	
	Bv	1	7	1	2	
	Bv+(Sd)+IISd				1	
	Bv-Sw	2			1	
	fGor				1	
	fGr				1	
	Go				4	2
	Go+Gor				1	
	Go+Gro				1	
	Go-M				1	
	Go-Sd					1
	Gor+Go					1
	II Sd				1	
	IIBv			1		
	IIIBv				3	
	IIISd				1	2
	IIISd2					1
	IIISw-Bv				1	

Fortsetzung **Tabelle 2**

Horizont-gruppe	Horizont	Entnahmetiefenstufe in cm				
		0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 140	140 - 220
B	IIISw-Sd					1
	IISd		2	1	14	8
	IISd-Bbt				1	2
	IISd-Go				1	1
	IISd-Go1				1	
	IISd-Go2					1
	IISd-Sw					1
	IISd1				3	1
	IISd1+(Sw-Sd)				1	
	IISd2				5	2
	IISd2+IIISd-Cv				1	
	IISd3				1	1
	IISw				5	1
	IISw-Sd				3	2
	IISw-Sd+IICv-Sd+IISd-Cv				1	
	M				1	1
	M-Go				1	
	M1	2				
	M2		2			
	M3			3	2	
	Sd	1	8	7	19	11
	Sd+IICv				1	
	Sd+IISd				1	1
	Sd+Sd-Bv				1	
	Sd-Bt+(Cv)				1	
	Sd-Bt+Bv-Cv				1	
	Sd-Bv+Bv-Cv				1	
	Sd-Go				8	4
	Sd-Go+Go				1	
	Sd1				1	
	Sd1+Sd2				3	
	Sd2				3	4
	Sd3					1
	Sd3+Sd4				1	
	Sd4					1
	Sw	3	5		3	1
	Sw(+Sd)				1	
	Sw+Sd				2	1
	Sw+Sw-Cv				1	
	Sw-Ah	1				
	Sw-Bs				1	
	Sw-Bt				1	
	Sw-Sd				4	1
	Sw-Sd+(Go)				1	
	Sw-Sd-Cv				1	
	Sw2				2	
	Sw2+Sd2					1

Fortsetzung **Tabelle 2**

Horizont-gruppe	Horizont	Entnahmetiefenstufe in cm				
		0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 140	140 - 220
C	Bhs-Cv				1	
	Bv-C			1		
	Bv-Cv			2	6	1
	Bv-Cv+Cv				1	
	Bv-Cv+IICv				1	
	Cca+Bt-Sd2				1	
	Cca.Bt-Sd2					1
	Cn					2
	Cv			3	11	8
	Cv1				1	1
	Cv2					2
	fBv-Cv+Cv				1	
	Gcor					1
	Go-Cv				1	
	Gor				4	7
	Gor+Gr				1	
	Gor-(Gr)				1	
	Gor-Cv					1
	Gr				8	9
	Gr+(Go)				1	
	Gr-Cv					1
	Gr1				2	1
	Gr1+Gr2				1	
	Gr2					3
	IIGr					1
	IIBv-Cv				4	
	IIBv-Cv+Cv				1	
	IIC			1		
	IICv				9	8
	IICv-Cn				1	
	IICv-Sd				3	1
	IICv-Sd+IIICv				1	
	IICv2				1	
	IICv3				1	
	IIGo				4	3
	IIGo+IIGor				1	1
	IIGo-Cv				2	
	IIGo?				1	1
	IIGo2				1	1
	IIGor				2	1
	IIGor+IIGr				1	
	IIGor-Cv					1
	IIGor2				1	
	IIGr				5	7
	IIICv					1
	IIICv				1	
	IIIGr				1	
	IIISd-Cv				2	1

Fortsetzung **Tabelle 2**

Horizont-gruppe	Horizont	Entnahmetiefenstufe in cm				
		0 - 30	30 - 60	60 - 90	90 - 140	140 - 220
C	IISd+IIICv				1	
	IISd-Cv				9	3
	IISd-Cv+Cv				1	
	IISd-Gr					1
	IISg-Gor+Gr				1	1
	IISw-Cv				2	2
	IVGr					1
	ICv-Bs+Cn				1	
	Sd-Bv-Cv				1	1
	Sd-Cv				6	3
	Sd-Cv1				1	
	Sd-Cv2					2
	Sd-Gor				1	1
	Sd-Gr					1
	T-Cv				1	1

Bei der Verteilung der Böden auf Horizontbereiche liegt der Schwerpunkt auf der Beprobung von B- (N = 235) und C-Material (N = 199). Für den Bereich der A-Horizonte liegen nur fünf Proben vor, weil die Daten über den Methodenvergleich hinaus auch zur Ableitung geogener Hintergrundwerte von Schwermetallen in Böden und Gesteinen verwendet werden (Gesteins-Datenbank NRW). Anthropogen beeinflusste und belastete Proben, deren Vorkommen sich meist auf Oberböden beziehen, wurden deshalb bei der Probenauswahl weitestgehend ausgeschlossen.

VERTEILUNG NACH BODENTYP, NUTZUNGSTYP UND HORIZONTGRUPPE

Auf den 203 in NRW untersuchten Standorten herrschen als Bodentyp Pseudogleye und Braunerden gefolgt von Podsolen und Gleyen vor.

Eine nutzungsabhängige Verteilung der Bodentypen in Acker, Grünland und Wald kann aufgrund des vorliegenden Datenmaterials nicht gemacht werden. Betrachtungen dieser Art zeigen (*LIEBE ET AL.,* 1997; *LIEBE*, 1999), dass beim Nutzungstyp Wald überwiegend Podsole, beim Nutzungstyp Acker oder Grünland überwiegend Braunerden und Auenböden in NRW auftreten.

Tabelle 3a: Häufigkeit der Standorte in Abhängigkeit von Boden- und Nutzungstyp

Bodentyp	Waldstandorte	Grünlandstandorte
Pseudogley	68	
Braunerde	65	
Podsol	29	
Gley	25	
Parabraunerde	7	
Auenböden	3	1
Plaggenesch	2	
Kolluvisol	1	
Rigosol	1	
Terra-fusca	1	
Summe Standorte	202	1

Gemäß der bodentypologischen Häufigkeiten wurde aus den verschiedenen Bodenprofilen folgende Anzahl an Bodenproben aus dem Bereich Oberboden und Unterboden plus Untergrund untersucht (Tab. 3b): Pseudogleye: N = 173, Braunerden und Parabraunderden: N = 120, Podsole: N = 67, Gleye: N = 47, Auenböden: N = 17, Plaggenesche: N = 8, Kolluvisole: N = 3, Rigosole: N = 2 und Terra fuscen: N = 2.

Tabelle 3b: Häufigkeiten der Bodenproben in Abhängigkeit von Bodentyp, Horizontgruppe und Nutzungstyp

Bodentyp	Horizontgruppe *)	Gesamt	Wald	Grünland
Pseudogleye	Oberböden	4	4	
Auenböden	Oberböden	1		1
Podsole	Oberböden	1	1	
Pseudogleye	Unterböden + Untergrund	169	169	
Braunerden	Unterböden + Untergrund	107	107	
Podsole	Unterböden + Untergrund	66	66	
Gleye	Unterböden + Untergrund	47	47	
Auenböden	Unterböden + Untergrund	16	5	11
Parabraunerden	Unterböden + Untergrund	13	13	
Plaggenesche	Unterböden + Untergrund	8	8	
Kolluvisole	Unterböden + Untergrund	3	3	
Rigosole	Unterböden + Untergrund	2	2	
Terra-fusca	Unterböden + Untergrund	2	2	

*) Oberböden = A-Horizonte
Unterböden plus Untergrund = B- und C-Horizonte

VERTEILUNG NACH GENESE UND BODENART

Tabelle 4: Häufigkeiten der Bodenproben in Abhängigkeit von Genese und Bodenart

Genese undifferenziert	Genese differenziert	Bodenarten		Anzahl
		Hauptgruppe	Gruppe	
Frostboden- und Hangbildungen	Fliesserde	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	1
			Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	9
		Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	16
			Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	15
			Sandschluffe (Us, Uu)	6
		Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	3
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	12
			Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	9
		Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	1
			Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	14
			Reinsande (Ss)	1
	Hochflächenlehm	Lehm	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	1
			Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	2
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	4
	Hanglehm	Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	1
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	6
			Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	2
	Hangsand	Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	3
	Kimmeridge-Kalke	Ton	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	1
	Summe			***107***
Bach- und Flussablage-rungen	Auenablagerungen	Lehm	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	2
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	1
			Reinsande (Ss)	4
	Hochflutablagerungen	Lehm	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	5
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	5
	Talsand	Sand	Reinsande (Ss)	1
	Niederterrasse	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	1
		Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
			Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	1
		Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	1
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	2
		Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	2
			Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	20
			Reinsande (Ss)	33
	Mittelterrasse	Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	1
			Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	1
			Reinsande (Ss)	1
	Untere Mittelterrasse	Lehm	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	1
	Jüngere Hauptterrasse	Lehm	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	3
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	3
			Reinsande (Ss)	3
	Hauptterrasse	Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	2
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	1
			Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	6
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	1
			Reinsande (Ss)	2
	Summe			***104***

Fortsetzung **Tabelle 4**

Eis-ablagerungen	Moräne	Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
		Lehm	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	14
			Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	17
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	1
			Reinsande (Ss)	1
	Grundmoräne	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	1
			Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	4
		Schluff	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	1
		Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	10
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	17
			Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	5
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	5
	Stauchmoräne	Sand	Reinsande (Ss)	3
	Summe			***80***
Schmelzwasser-ablagerungen	Sander	Lehm	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	5
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	16
			Reinsande (Ss)	22
	Nachschüttsande	Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	1
			Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	2
			Reinsande (Ss)	1
	Summe			***47***
präquartäre Meeresabla-gerungen	ungegliedert	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	14
			Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	6
		Schluff	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	1
			Sandschluffe (Us, Uu)	1
		Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	1
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	5
		Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	1
			Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	3
			Reinsande (Ss)	1
	Lintfort-Schichten	Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	1
		Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	1
	Coesfeld-Schichten	Schluff	Sandschluffe (Us, Uu)	1
		Lehm	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	1
	Recklinghausen-Schich-ten	Lehm	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	2
	Hergenrath-Schichten	Ton	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	1
	Bückeberg-Schichten	Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	1
	Ziegelschiefer-Zone	Schluff	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	1
	Arnsberg-Schichten	Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
	Quarzit-Folge	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	1
		Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
		Lehm	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	1
	Kulm-Kieselkalk	Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
	Summe			*47*
Wind-ablagerungen	Flugsand	Sand	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	4
			Reinsande (Ss)	15
	Sandlöss	Schluff	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	3
	Löss	Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
			Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	8
			Sandschluffe (Us, Uu)	5
	Summe			***36***

Fortsetzung **Tabelle 4**

Zersatz- und Rückstands-bildungen	ungegliedert	Lehm	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	2
	Köln-Schichten	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	2
	Lintfort-Schichten	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	2
	Scaphiten-Schichten	Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	1
	Wiedenest-Schichten	Ton	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	1
		Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	1
	Siegen-Schichten	Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	1
			Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	1
	Summe			***11***
Verschwem-mungs-ablagerungen	Schwemmlöss	Schluff	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	3
			Sandschluffe (Us, Uu)	2
	Kolluvium	Schluff	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	2
	Summe			***7***
Gesamt				***439***

In genetischer Hinsicht sind die in die Untersuchungen und Auswertungen aufgenommenen Böden vor allem Frost- und Hangbodenbildungen (N = 107), fluviatilen (N = 104) und glazigenen Ablagerungen (N = 127: Eis- plus Schmelzwasserablagerungen), in geringerem Umfang marinen (N = 47) und äolischen Ablagerungen (N = 36) sowie Zersatz- und Rückstandsbildungen (N = 11) und Verschwemmungsablagerungen (N = 7) zuzuordnen (Tab. 4). Damit wird auch für den Bereich "Genese" ein breites Spektrum an Böden abgedeckt, die in NRW durch verschiedene Ablagerungs- und Bildungsprozesse entstanden sind.

Während bei den Bach- und Fluss-, Wind- und Schmelzwasserablagerungen vor allem Reinsande und lehmige Sande vorherrschen, handelte es sich bei den Böden aus Frost- und Hangbildungen, Eis- und präquartären Meeresablagerungen besonders um lehmige und stark tonige Substrate. Die Bodenartenhauptgruppe Schluff ist vor allem bei windabgelagerten Sedimenten (Löss) anzutreffen.

3.2 ALLGEMEINE BODENKENNWERTE

Für die allgemeinen Bodenkennwerte pH-Wert, Karbonat- und Humusgehalt, potentielle KAK und Körnung wurden die wichtigsten statistischen Kenngrößen wie Schwankungsbereich, Mittelwert, Median, 90. Perzentil und Probenanzahl, getrennt nach Probenherkunft bzw. Projekt und Horizontgruppe (A-, B-, C-Bereich), berechnet. (Tab. 5).

Die **pH-H_2O-Werte** der Böden liegen zwischen 3,7 und 9,1. Die Median-pH-Werte im Unterboden (B) bzw. mineralischen Untergrund (C) schwanken je nach Datenherkunft zwischen pH 4,8 (BZE) und pH 5 (UBA) bzw. pH 4,7 (UBA:) und pH 5 (UBA) und betragen in den A-Horizonten der Waldbodenproben aus dem UBA-Projekt pH 4,5.

Tabelle 5: Allgemeine Bodenkennwerte der für die Auswertungen untersuchten und verwendeten Bodenproben *)

Parameter	Projekt	Horizont	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90. Perz.	N
pH-H_2O	BZE	B	4.0	8.9	5.6	4.8	8.2	164
		C	3.9	9.1	5.8	5.0	8.6	190
		Gesamt	3.9	9.1	5.7	5.0	8.4	354
	UBA	A	3.7	5.3	4.4	4.5	5.3	5
		B	3.8	8.2	5.5	5.0	7.3	71
		C	4.5	5.3	4.9	4.7	5.3	9
		Gesamt	3.7	8.2	5.4	5.0	7.2	85
	Gesamt		3.7	9.1	5.6	5.0	8.3	439
$CaCO_3$ %	BZE	B	0	48	3.5	0	20	164
		C	0	72	4.4	0	15.7	190
		Gesamt	0	72	4.0	0	16.2	354
	UBA	A	0	0	0	0	0	5
		B	0	24	0.6	0	0	71
		C	0	0	0	0	0	9
		Gesamt	0	24	0.5	0	0	85
	Gesamt		0	72	3.3	0	10.9	439
Humus %	BZE	B	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	164
		C	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	190
		Gesamt	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	354
	UBA	A	5.4	7.0	5.9	5.6	7.0	5
		B	0.1	6.6	0.8	0.4	2.1	71
		C	0.1	0.9	0.3	0.2	0.9	9
		Gesamt	0.1	7.0	1.0	0.4	2.8	85
	Gesamt		0.1	7.0	0.3	0.1	0.4	439
pot. KAK $cmol_c\ kg^{-1}$	BZE	B	0.3	29	8.4	6.8	17.3	164
		C	0.2	37	6.0	3.2	15.2	190
		Gesamt	0.2	37	7.2	5.0	16.5	354
	UBA	A	15.7	28	20	15.9	28	5
		B	3.3	24	11.2	10.3	17.7	71
		C	2.1	10.3	4.6	3.0	10.3	9
		Gesamt	2.1	28	11.0	10.3	17.7	85
	Gesamt		0.2	37	7.9	6.2	17.0	439
Sand %	BZE	B	1.0	98	49	55	88	164
		C	2.0	99	60	76	96	190
		Gesamt	1.0	99	55	61	95	354
	UBA	A	40	63	52	52	63	5
		B	18.4	93	56	60	75	71
		C	55	96	68	61	96	9
		Gesamt	18.4	96	57	59	75	85
	Gesamt		1.0	99	55	60	95	439
Schluff %	BZE	B	0	87	31	26	67	164
		C	1.0	90	27	15.0	66	190
		Gesamt	0	90	29	22	66	354
	UBA	A	22	46	34	33	46	5
		B	6.8	59	26	24	42	71
		C	3.4	35	21	20	35	9
		Gesamt	3.4	59	26	24	42	85
	Gesamt		0	90	28	22	63	439

Fortsetzung **Tabelle 5**

Parameter	Projekt	Horizont	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90. Perz.	N
Ton %	BZE	B	0.1	70	19.6	16.0	38	164
		C	0.1	59	13.3	8.0	33	190
		Gesamt	0.1	70	16.2	12.0	36	354
	UBA	A	9.9	15.7	14.1	15.0	15.7	5
		B	0.1	45	18.4	16.8	31	71
		C	0.8	25	11.0	10.1	25	9
		Gesamt	0.1	45	17.3	15.5	29	85
	Gesamt		0.1	70	16.4	14.0	34	439
Stein %	BZE	B	0	85	12.8	5.0	50	164
		C	0	95	18.7	1.0	70	190
		Gesamt	9.0	95	16.0	3.5	55	354
	UBA	A	0	22	5.7	0	22	5
		B	0	15.0	1.5	0	7.0	71
		C	0	8.9	1.0	0	8.9	9
		Gesamt	0	22	1.7	0	7.2	8.5
	Gesamt		0	95	13.2	1.0	52	439

*) BZE = Projekt "Bodenzustandserhebung im Wald"
UBA = Projekt "Umweltbundesamt" (UFOPLAN-Nr. 10701001)

Von 439 Böden wurden lediglich in 93 Proben **Carbonatgehalte** zwischen 0,2 und 92% gemessen. Dabei handelt es sich überwiegend um Böden aus präquartären marinen Ablagerungen, Geschiebemergel und Lösse. Die restlichen Proben verteilen sich unregelmäßig auf Schwemmlösse, fluviatile Ablagerungen und Fliesserden.

Die **Humusgehalte** variieren zwischen 0,1 und 6,6% in den Böden aus B- und C-Horizonten. In den A-Horizonten liegen die Humusgehalte zwischen 5,4 und 7%. Im Mittel sind die Böden aus dem B-/C-Horizontbereich der Standorte als sehr schwach humos einzustufen.

Die **potentielle KAK** nimmt im Mittel mit zunehmender Entnahmetiefe und gleichzeitig sinkenden Humusgehalten von den A-, über die B- zu den C-Horizonten ab. In den Böden aus C-Horizonten werden für beide Herkunftskategorien mit 3,2 cmolc kg^{-1} (BZE: 0,2 - 37) und 3,0 cmolc kg^{-1} (UBA: 2,1 - 10,3) vergleichbare Werte erreicht. In den B-Horizonten betragen diese bereist 6,8 cmolc kg^{-1} (BZE: 0,3 - 29) und 10.3 cmolc kg^{-1} (UBA: 3,3 - 24), während für die A-Horizonte (UBA) ein Median von 15,92 cmolc kg^{-1} (15,7 - 28) beobachtet wird.

In bezug auf ihre **Korngrößenzusammensetzung** weisen sämtliche Bodenproben mittlere Sand-, Schluff- und Tongehalte von 55%, 28% und 16,4% auf. Obwohl nur Feinerdeproben untersucht wurden, sind in Tabelle 5 auch die Gesteinsanteile der aus den Profilen entnommenen Feldproben aufgeführt. Diese können im einzelnen bis zu 95% erreichen, liegen jedoch im Mittel aller Proben bei 13,2%, bei einem Medianwert von 1%.

3.3 TOTAL- UND KÖNIGSWASSER-EXTRAHIERBARE GEHALTE DER UNTERSUCHTEN ELEMENTE IN DEN ZUM METHODENVERGLEICH VERWENDETEN BÖDEN

Der mit Flusssäure (HF) unter Druck aufschliessbare Elementgehalt wird hier - zur Abgrenzung des Begriffes "Gesamtgehalt" - als Totalgehalt bezeichnet. In diesem Zusammenhang werden die beiden Begriffe häufig missverständlich gebraucht. So wird häufig auch von Gesamtgehalten gesprochen, wenn der KW-extrahierbare Gehalt gemeint ist. Grundsätzlich gilt, dass der Königswasserextrakt allenfalls bei Quecksilber den Totalgehalt der Probe widergeben kann (*HORNBURG UND LÜER, 1999*). Bei den bisher gemachten Erfahrungen ist dies eine Ausnahme. Dies wird umso deutlicher, je mehr Proben unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung und Belastung untersucht werden. Bei Elementen wie Co, Fe, Hg, Mn, Ni und Zn liegen die medianen KW-Anteile allenfalls zwischen 85 (Ni, Zn) und 90% (Hg), wie die Ergebnisse noch zeigen werden.

Um eine Übersicht auf die insgesamt vorliegenden Analyseergebnisse zu bekommen, sind für die HF-löslichen und zum Vergleich für die KW-extrahierbaren Elementgehalte in Anlehnung an Pkt. 3.2 die wichtigsten statistischen Kenngrößen, getrennt nach Probenherkunft bzw. Projekt und Horizontgruppe (A-, B-, C-Bereich), berechnet worden (Tab. 6). Diese werden hier nicht näher erläutert, da sie im folgenden bei der elementspezifischen Betrachtung in alphabetischer Reihenfolge ohnehin diskutiert werden. Die Tabelle soll neben einer gesamtheitlichen Übersicht auch das Gehaltsspektrum, welches sich hinter den verschiedenen Herkunftstypen "Projekt" und "Horizontbereich" verbirgt, deutlich machen.

Die Unterschiede zwischen den projektabhängig gezogenen Proben sind eher zufälliger Art. Beim Vergleich zwischen den medianen Elementgehalten je Horizontgruppe hingegen zeigt sich, dass die A-Horizonte, mit Ausnahme bei Ni, die höchsten Konzentrationen aufweisen. Insgesamt, ohne Trennung der Proben nach Projekt (nicht aufgeführt), werden in den B-Horizonten bei Al, As, Be, Bi, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, Mg, Mn, P, Pb, V und Zn die höchsten Totalgehalte (Medianwerte) erreicht. Ein wesentliches Kriterium dafür dürfte der, im Vergleich zu A- und C-Horizonten, höhere mittlere Tongehalt der B-Horizonte sein, dessen Einfluss auf die Bindungsplätze der Elemente auch durch eine höhere mittlere potenzielle KAK angezeigt wird (vgl. Tab. 5).

Bei Sb, Sn und Tl konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Horizontgruppen B und C festgestellt werden, während bei Ni die höchsten Gehalte in den C-Horizonten beobachtet werden (vgl. HORNBURG, 1996).

Tabelle 6: Schwankungsbereich (Minimum, Maximum), Mittelwert, Median und 90. Perzentilwert der Total- (HF) und Königswasser-extrahierbaren Gehalte in den untersuchten und zum Methodenvergleich verwendeten Bodenproben

Parameter	Projekt	Horizont	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90. Perz.	N
Al-HF (g/kg)	BZE	B	2.4	81	33	32	55	164
		C	3.8	110	32	25	65	190
	Gesamt		2.4	110	32	27	58	354
Al-KW (g/kg)	BZE	B	1.1	47	15.6	15.0	28	164
		C	1.5	58	13.7	9.5	29	190
	Gesamt		1.1	58	14.6	13.0	28	354
As-HF (mg/kg)	BZE	B	0.050	39	8.3	7.0	16.8	164
		C	0.050	79	6.5	4.1	13.8	190
	Gesamt		0.050	79	7.3	5.6	15.8	354
As-KW (mg/kg)	BZE	B	0.050	31	4.5	3.1	11.0	164
		C	0.050	81	3.6	1.3	7.9	190
	Gesamt		0.050	81	4.0	2.1	10.0	354
Be-HF (mg/kg)	BZE	B	0.080	4.5	1.1	0.93	1.9	164
		C	0.020	3.9	1.1	0.73	2.5	190
	Gesamt		0.020	4.5	1.1	0.82	2.1	354
Be-KW (mg/kg)	BZE	B	0.010	2.6	0.68	0.64	1.2	164
		C	0.020	3.7	0.64	0.43	1.4	190
	Gesamt		0.010	3.7	0.66	0.54	1.3	354
Bi-HF (mg/kg)	BZE	B	0.005	1.7	0.24	0.17	0.50	164
		C	0.005	3.8	0.28	0.16	0.68	190
	Gesamt		0.005	3.8	0.26	0.17	0.60	354
Bi-KW (mg/kg)	BZE	B	0.005	0.45	0.10	0.090	0.22	164
		C	0.005	0.64	0.11	0.075	0.28	190
	Gesamt		0.005	0.64	0.11	0.080	0.24	354
Cd-HF (mg/kg)	BZE	B	0.005	1.3	0.14	0.11	0.28	164
		C	0.005	1.0	0.13	0.10	0.25	190
	UBA	A	0.15	0.70	0.29	0.15	0.70	5
		B	0.15	1.3	0.25	0.15	0.50	71
		C	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	9
	Gesamt		0.005	1.3	0.16	0.14	0.30	439
Cd-KW (mg/kg)	BZE	B	0.005	1.1	0.11	0.080	0.21	164
		C	0.005	1.0	0.098	0.075	0.21	190
	UBA	A	0.15	1.5	0.56	0.30	1.5	5
		B	0.15	1.4	0.38	0.15	0.90	71
		C	0.15	1.0	0.31	0.15	1.0	9
	Gesamt		0.005	1.5	0.16	0.10	0.32	439
Co-HF (mg/kg)	BZE	B	0.56	32	7.6	6.9	14.4	164
		C	0.46	35	7.4	4.5	18.0	190
	Gesamt		0.46	35	7.5	5.7	15.9	354
Co-KW (mg/kg)	BZE	B	0.34	32	6.3	5.4	12.0	164
		C	0.24	33	6.2	3.7	16.3	190
	Gesamt		0.24	33	6.2	4.5	14.1	354
Cr-HF (mg/kg)	BZE	B	3.7	230	49	44	89	164
		C	2.9	150	42	29	98	190
	Gesamt		2.9	230	45	39	94	354
Cr-KW (mg/kg)	BZE	B	1.4	89	27	25	46	164
		C	2.2	65	21	16.2	42	190
	Gesamt		1.4	89	24	22	43	354

Fortsetzung **Tabelle 6**

Parameter	Projekt	Horizont	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90. Perz.	N
Cu-HF (mg/kg)	BZE	B	0.90	48	10.4	9.7	18.1	164
		C	1.0	79	10.3	6.1	23	190
	UBA	A	5.0	60	28	24	60	5
		B	1.5	56	14.1	9.0	35	71
		C	5.0	56	24	13.0	56	9
	Gesamt		0.90	79	11.5	8.6	24	439
Cu-KW (mg/kg)	BZE	B	0.30	44	8.7	7.9	16.7	164
		C	0.050	79	8.7	4.9	20	190
	UBA	A	3.0	52	22	19.0	52	5
		B	1.0	54	11.1	6.0	30	71
		C	4.0	49	21	13.0	49	9
	Gesamt		0.050	79	9.5	6.2	22	439
Fe-HF (g/kg)	BZE	B	1.7	87	20	18.0	36	164
		C	1.1	80	17.3	11.0	41	190
	Gesamt		1.1	87	18.7	16.0	39	354
Fe-KW (g/kg)	BZE	B	1.4	87	18.5	16.6	34	164
		C	0.68	80	15.5	9.8	37	190
	Gesamt		0.68	87	16.9	14.1	36	354
Hg-HF (mg/kg)	BZE	B	0.009	1.1	0.051	0.036	0.084	164
		C	0	1.8	0.062	0.030	0.086	190
	Gesamt		0	1.8	0.057	0.033	0.086	354
Hg-KW (mg/kg)	BZE	B	0.004	1.1	0.046	0.030	0.076	164
		C	0.004	1.7	0.056	0.027	0.079	190
	Gesamt		0.004	1.7	0.051	0.029	0.076	354
Mg-HF (g/kg)	BZE	B	0.27	56	3.4	2.8	5.7	164
		C	0.19	57	3.7	1.8	8.2	190
	Gesamt		0.19	57	3.6	2.3	6.6	354
Mg-KW (g/kg)	BZE	B	0.21	55	2.9	2.3	4.7	164
		C	0.16	55	3.0	1.4	6.2	190
	Gesamt		0.16	55	2.9	1.8	5.4	354
Mn-HF (mg/kg)	BZE	B	13.9	1190	276	190	581	164
		C	8.1	1900	285	140	775	190
	Gesamt		8.1	1900	281	169	680	354
Mn-KW (mg/kg)	BZE	B	8.6	1130	248	166	551	164
		C	5.0	1900	258	128	710	190
	Gesamt		5.0	1900	254	147	641	354
Ni-HF (mg/kg)	BZE	B	2.3	100	22	20	42	164
		C	1.4	110	21	13.6	52	190
	UBA	A	7.0	22	14.6	15.0	22	5
		B	1.5	36	18.3	18.0	30	71
		C	13.0	72	25	20	72	9
	Gesamt		1.4	110	21	17.6	43	439
Ni-KW (mg/kg)	BZE	B	1.8	84	18.0	15.4	34	164
		C	0.70	90	17.9	11.5	44	190
	UBA	A	1.5	9.0	3.0	1.5	9.0	5
		B	1.5	26	6.4	4.0	15.4	71
		C	1.5	28	6.8	6.0	28	9
	Gesamt		0.70	90	15.7	11.0	36	439

Fortsetzung **Tabelle 6**

Parameter	Projekt	Horizont	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90. Perz.	N
P-HF (mg/kg)	BZE	B	25	1998	306	260	550	164
		C	25	4140	323	240	590	190
	Gesamt		25	4140	315	252	560	354
P-KW (mg/kg)	BZE	B	13.1	1370	219	163	421	164
		C	25	3300	227	159	460	190
	Gesamt		13.1	3300	223	160	443	354
Pb-HF (mg/kg)	BZE	B	3.0	130	17.0	14.6	24	164
		C	3.5	1600	23	11.0	29	190
	UBA	A	51	7750	2124	93	7750	5
		B	14.0	3800	138	25	158	71
		C	14.0	42	23	20	42	9
	Gesamt		3.0	7750	63	14.8	34	439
Pb-KW (mg/kg)	BZE	B	1.4	115	12.5	9.8	19.1	164
		C	1.3	1300	17.5	6.5	24	190
	UBA	A	44	7436	2028	74	7436	5
		B	0.10	3608	124	14.0	147	71
		C	5.0	45	15.2	13.0	45	9
	Gesamt		0.10	7436	56	9.4	27	439
Sb-HF (mg/kg)	BZE	B	0.20	16.0	1.7	1.0	3.6	164
		C	0.28	52	1.8	1.0	3.6	190
	Gesamt		0.20	52	1.8	1.0	3.6	354
Sb-KW (mg/kg)	BZE	B	0.040	6.5	0.39	0.30	0.65	164
		C	0.020	3.7	0.34	0.23	0.70	190
	Gesamt		0.020	6.5	0.37	0.26	0.70	354
Sn-HF (mg/kg)	BZE	B	0.050	460	5.4	1.9	4.4	164
		C	0.10	28	2.7	1.8	5.3	190
	Gesamt		0.050	460	4.0	1.8	5.0	354
Sn-KW (mg/kg)	BZE	B	0.010	4.0	0.69	0.54	1.4	164
		C	0.020	2.6	0.58	0.43	1.2	190
	Gesamt		0.010	4.0	0.63	0.50	1.2	354
Tl-HF (mg/kg)	BZE	B	0.005	2.2	0.48	0.40	0.88	164
		C	0.005	2.1	0.49	0.38	0.97	190
	Gesamt		0.005	2.2	0.49	0.39	0.88	354
Tl-KW (mg/kg)	BZE	B	0.005	0.78	0.18	0.16	0.33	164
		C	0.005	1.2	0.18	0.14	0.34	190
	Gesamt		0.005	1.2	0.18	0.15	0.33	354
V-HF (mg/kg)	BZE	B	4.6	220	62	56	125	164
		C	2.8	170	49	34	120	190
	Gesamt		2.8	220	55	48	120	354
V-KW (mg/kg)	BZE	B	2.7	230	37	33	65	164
		C	1.9	123	26	20	52	190
	Gesamt		1.9	230	31	26	58	354

Fortsetzung **Tabelle 6**

Zn-HF (mg/kg)	BZE	B	8.0	190	48	45	78	164
		C	4.9	270	43	30	89	190
	UBA	A	26	124	86	105	124	5
		B	21	114	47	44	66	71
		C	31	175	60	48	175	9
	Gesamt		4.9	270	46	41	86	439
Zn-KW (mg/kg)	BZE	B	5.6	140	38	37	60	164
		C	2.5	220	36	25	77	190
	UBA	A	22	100	71	89	100	5
		B	7.0	100	36	35	56	71
		C	11.0	40	27	24	40	9
	Gesamt		2.5	220	37	33	64	439

3.4 BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN TOALEN UND KÖNIGSWASSER-EXTRAHIERBAREN ELEMENTGEHALTEN

*Die Internet-Darstellung der Ergebnisse beschränkt sich auf **Blei** (Pb), **Cadmium** (Cd), **Chrom** (Cr), **Kupfer** (Cu), **Quecksilber** (Hg), **Nickel** (Ni), **Thallium** (Tl) und **Zink** (Zn).*

Den kompletten Bericht erhalten Sie per Anfrage unter " horn-burg@gd.nrw.de *"*

Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt tabellarisch und grafisch, nach Elementen getrennt in alphabetischer Reihenfolge und nach gleichem Muster. Die nach Bodenartenhauptgruppen getrennt ausgewiesenen KW-Anteile am Totalgehalt der Elemente wurden entsprechend ihren Anteilen am Totalgehalt von "hoch" nach "gering" sortiert (s. z. B. *Tab. 8a*).

1. Statistische Kennwerte der Analysenergebnisse je Element, unter Einbezug aller Proben
2. Statistissche Kennwerte der Analysenergebnisse je Element, nach Eliminierung von Ausreißern (vgl. Pkt. 2.2.4)
3. Statistische Kennwerte der KW-extrahierbaren Anteile am Totalgehalt (KW in % von HF) je Element, unter Einbezug aller Proben
4. Statistische Kennwerte der KW-extrahierbaren Anteile am Totalgehalt (KW in % von HF) je Element, nach Eliminierung von Ausreißern (vgl. Pkt. 2.2.4)
5. Graphische Darstellung der Beziehungen, nach Eliminierung von Ausreißern (vgl. Pkt. 2.2.4). Die als Ausreißer definierten Wertepaare sind symbolisch gekennzeichnet. Neben der Regressionsgleichung werden auch die oberen und unteren 95%-igen Vertrauensbereiche **i**) für die Regression und **ii**) für die Einzelwerte dar-

gestellt. Für jede Beziehung liegen damit fünf Gleichungen vor. Betrachtet werden zwei Beziehungen:

a) KW-Gehalt des Elements in Abhängigkeit vom HF-Gehalt des Elements,
   z. B. Cd-KW = f (Cd-HF)
b) HF-Gehalt des Elements in Abhängigkeit vom KW-Gehalt des Elements,
   z. B. Cd-HF = f (Cd-KW)

Damit ist gewährleistet, dass Transformationen von beiden Seiten durchgeführt werden können. Die als Ausreißer definierten Wertepaare waren für jede Beziehung neu zu berechnen. Somit haben Unterschiede im Probenumfang ihre Richtigkeit.

Ausnahmen wurden bei Antimon und Zinn gemacht, bei denen zwischen den gesamten und KW-extrahierbaren Gehalten keine Beziehungen bestehen.

3.4.1 BLEI

Tabelle 7a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Bleigehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 438) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Pb-HF (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	141	3.5	2650	71.9	306.0	18.1	23.3
Sand	179	3.0	7750	76.4	642.6	9.3	10.6
Schluff	73	8.4	1300	38.8	150.9	17.7	19.3
Ton	45	7.4	176	26.9	30.2	18.8	20.7
Gesamt	*438*	*3.0*	*7750*	***63.6***	*449.9*	***14.8***	***16.1***
Bodenartenhauptgruppe	Pb-KW (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	141	2.8	2523	61.3	284.5	12.3	15.9
Sand	179	1.3	7436	68.8	615.8	4.8	5.5
Schluff	73	4.8	1253	33.2	146.2	11.4	13.3
Ton	45	5.4	201	23.9	32.8	15.0	16.9
Gesamt	*438*	*1.3*	*7436*	***55.8***	*429.3*	***9.4***	***10.1***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 7b: ohne Ausreißer (N = 4)

Bodenartenhauptgruppe	Pb-HF (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	139	3.5	2650	72.6	308.2	18.0	23.3
Sand	177	3.0	7750	77.0	646.3	9.2	10.5
Schluff	73	8.4	1300	38.8	150.9	17.7	19.3
Ton	45	7.4	176	26.9	30.2	18.8	20.7
Gesamt	*434*	*3.0*	*7750*	***64.0***	*451.9*	***14.7***	***16.1***
Bodenartenhauptgruppe	Pb-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	139	2.8	2523	62.1	286.5	12.4	16.1
Sand	177	1.3	7436	69.5	619.2	4.8	5.5
Schluff	73	4.8	1253	33.2	146.2	11.4	13.2
Ton	45	5.4	201	23.9	32.8	15.0	16.9
Gesamt	*434*	*1.3*	*7436*	***56.3***	*431.2*	***9.6***	***10.1***

**) ohne Ausreißer (N = 4), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 8a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Bleigehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 438) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Pb-KW Pb-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	23	50	103	84	12.1	80	83
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	22	59	114	82	13.5	81	81
	Gesamt	*45*	*50*	*114*	***83***	*12.7*	***80***	***82***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	36	53	97	76	13.0	75	75
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	34	42	100	65	15.3	62	64
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	53	99	69	26.1	54	66
	Gesamt	*73*	*42*	*100*	***71***	*15.4*	***69***	***69***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	20	48	93	73	12.9	74	72
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	62	27	108	71	19.1	69	68
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	59	28	131	70	19.3	71	67
	Gesamt	*141*	*27*	*131*	***71***	*18.3*	***71***	***68***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	6	41	107	67	23.4	58	64
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	85	13	112	63	18.4	61	60
	Reinsande (Ss)	88	22	93	47	14.3	44	45
	Gesamt	*179*	*13*	*112*	***55***	*18.5*	***53***	***52***
Gesamt		*438*	*13*	*131*	***66***	*19.8*	***65***	***62***

Abnehmende Pb-KW-Anteile (xG) in der Reihe Ton > Schluff ≥ Lehm > Sand

Tabelle 8b: ohne Ausreißer (N = 4)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Pb-KW Pb-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	23	50	103	84	12.1	80	83
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	22	59	114	82	13.5	81	81
	Gesamt	*45*	*50*	*114*	***83***	*12.7*	***80***	***82***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	36	53	97	76	13.0	75	75
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	34	42	100	65	15.3	62	64
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	53	99	69	26.1	54	66
	Gesamt	*73*	*42*	*100*	***71***	*15.4*	***69***	***69***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	20	48	93	73	12.9	74	72
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	60	30	108	73	17.6	70	70
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	59	28	131	70	19.3	71	67
	Gesamt	*139*	*28*	*131*	***72***	*17.7*	***71***	***69***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	6	41	107	67	23.4	58	64
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	84	29	112	64	17.7	62	61
	Reinsande (Ss)	87	22	93	47	14.2	45	45
	Gesamt	*177*	*22*	*112*	***56***	*18.2*	***53***	***53***
Gesamt		*434*	*22*	*131*	***66***	*19.4*	***66***	***63***

Abnehmende Pb-KW-Anteile (xG) in der Reihe Ton > Schluff = Lehm > Sand

Tabelle 9: Multiple Regressionen der Beziehungen zwischen den Pb-Totalgehalten (HF = Flusssäure-Druckaufschluss) bzw. Königswasser-(KW)extrahierbaren Pb-Gehalten der Böden (Grundgesamtheit N = 354) unter Berücksichtigung weiterer Untersuchungsparameter (log = log 10)

Abhängige Variable (mg kg^{-1})	Unabhängige Variable (mg kg^{-1})	einfacher Korrelations-koeffizient	partieller Korrelations-koeffizient	multiples R-Quadrat	B *)	Signifikanz für B
log Pb-KW N = 353 o. Ausreißer (N = 1)	**log Pb-HF**	**+ 0,95 *****	**+ 0,93 *****	**+ 0,89 *****	**+ 0,991**	**0,000**
	log Fe-HF(g kg^{-1})	**+ 0,75 *****	**+ 0,43 *****	**+ 0,94 *****	**+ 0,153**	**0,000**
	log Ton (%)	**+ 0,66 *****	**+ 0,39 *****	**+ 0,95 *****	**+ 0,096**	**0,000**
	Konstante	**-**	**-**	**-**	**- 0,457**	**0,000**
	pH-H_2O	*+ 0,17 ***	-	-	-	-
	log Sand (%)	*- 0,47 ****	-	-	-	-
	log Schluff (%)	*+ 0,56 ****	-	-	-	-
	log KAK ($cmol_c$ kg^{-1})	*+ 0,65 ****	-	-	-	-
	log Al-HF (g kg^{-1})	*+ 0,66 ****	-	-	-	-
	log Mn-HF	*+ 0,50 ****	-	-	-	-
log Pb-HF N = 353 o. Ausreißer (N = 1)	**log Pb-KW**	**+ 0,95 *****	**+ 0,93 *****	**+ 0,89 *****	**+ 0,878**	**0,000**
	log Ton (%)	**+ 0,52 *****	**- 0,32 *****	**+ 0,91 *****	**- 0,072**	**0,000**
	log Fe-KW (g kg^{-1})	**+ 0,61 *****	**- 0,29 *****	**+ 0,92 *****	**- 0,090**	**0,000**
	Konstante	**-**	**-**	**-**	**+ 0,480**	**0,000**
	pH-H2O	*+ 0,10 **	-	-	-	-
	log Sand (%)	*- 0,40 ****	-	-	-	-
	log Schluff (%)	*+ 0,50 ****	-	-	-	-
	log KAK ($cmol_c$ kg^{-1})	*+ 0,52 ****	-	-	-	-
	log Al-KW (g kg^{-1})	*+ 0,66 ****	-	-	-	-
	log Mn-KW	*+ 0,45 ****	-	-	-	-

*) B = standardisierter Regressionskoeffizient

Kursiv gekennzeichnete Parameter wurden nicht in die multiple Regressionsgleichung aufgenommen.

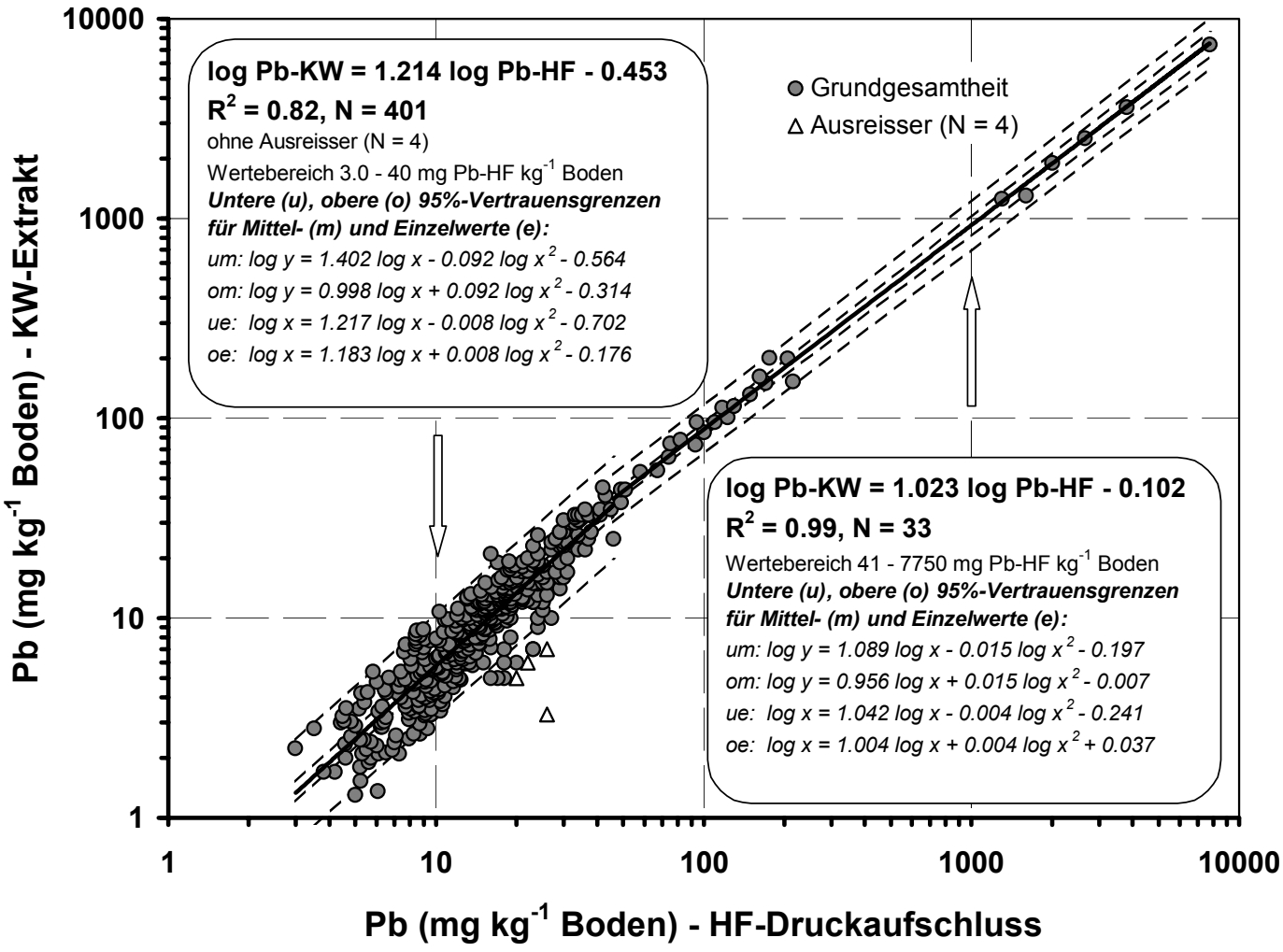


Abbildung 1a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Pb-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Pb-Gehalten

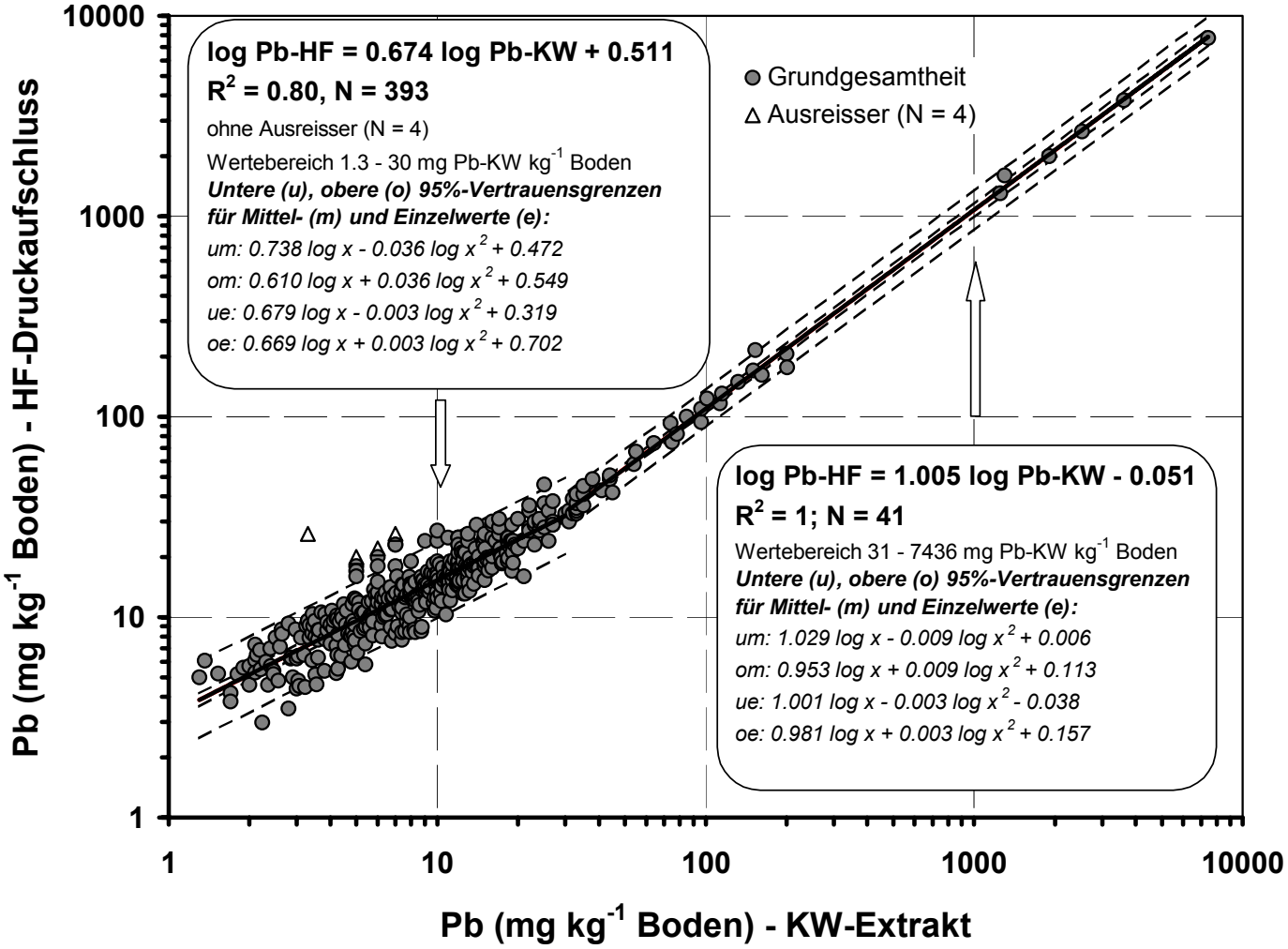


Abbildung 1b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Be-Gehalten und Be-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.2 CADMIUM

Tabelle 10a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Cadmiumgehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 354) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Cd-HF (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.005	0.40	0.13	0.10	0.10	0.10
Sand	159	0.005	0.54	0.10	0.09	0.090	0.069
Schluff	71	0.005	1.0	0.16	0.15	0.13	0.11
Ton	43	0.005	1.3	0.21	0.23	0.14	0.14
Gesamt	*354*	*0.005*	*1.3*	***0.14***	*0.13*	***0.10***	***0.09***
Bodenartenhauptgruppe	Cd-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.005	0.40	0.11	0.08	0.09	0.08
Sand	159	0.005	0.37	0.071	0.07	0.060	0.044
Schluff	71	0.005	1.0	0.14	0.14	0.10	0.093
Ton	43	0.005	1.1	0.18	0.22	0.12	0.13
Gesamt	*354*	*0.005*	*1.1*	***0.11***	*0.12*	***0.08***	***0.07***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 10b: ohne Ausreißer (N = 33)

Bodenartenhauptgruppe	Cd-HF (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	77	0.005	0.40	0.14	0.10	0.11	0.11
Sand	135	0.005	0.54	0.11	0.09	0.090	0.090
Schluff	67	0.005	1.0	0.17	0.15	0.14	0.14
Ton	42	0.005	1.3	0.22	0.24	0.15	0.15
Gesamt	*321*	*0.005*	*1.3*	***0.14***	*0.14*	***0.11***	***0.11***
Bodenartenhauptgruppe	Cd-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	77	0.005	0.40	0.11	0.08	0.10	0.10
Sand	135	0.005	0.37	0.079	0.07	0.060	0.060
Schluff	67	0.005	1.0	0.14	0.14	0.11	0.11
Ton	42	0.005	1.1	0.18	0.23	0.12	0.12
Gesamt	*321*	*0.005*	*1.1*	***0.11***	*0.12*	***0.09***	***0.09***

**) ohne Ausreißer (N = 33), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 11a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Cadmiumgehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 354) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Cd-KW Cd-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	67	1600	158	322.2	92	101
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	40	131	80	24.1	83	76
	Gesamt	*43*	*40*	*1600*	***120***	*231.9*	***91***	***88***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	9	200	88	35.3	100	78
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	33	400	102	58.3	100	93
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	70	100	83	15.5	78	82
	Gesamt	*71*	*9*	*400*	***94***	*47.1*	***100***	***85***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	19	9	113	87	24.4	100	80
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	32	22	150	88	25.5	95	83
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	30	20	120	77	26.8	89	72
	Gesamt	*81*	*9*	*150*	***84***	*25.9*	***95***	***78***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	5	29	100	56	31.9	38	49
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	69	10	200	77	34.2	85	68
	Reinsande (Ss)	85	8	129	73	30.4	76	63
	Gesamt	*159*	*8*	*200*	***74***	*32.2*	***79***	***64***
Gesamt		*354*	*8*	*1600*	***86***	*87.6*	*87.6*	***74***

Abnehmende Cd-KW-Anteile (xG) in der Reihe Ton > Schluff > Lehm > Sand

Tabelle 11b: ohne Ausreißer (N = 33)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Cd-KW Cd-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	4	33	100	62	32.4	58	90
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	60	32	200	84	29.3	97	87
	Reinsande (Ss)	71	36	129	83	21.9	91	77
	Gesamt	*135*	*32*	*200*	***83***	*25.8*	***91***	***84***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	32	36	200	94	29.7	100	89
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	32	33	150	92	23.4	100	89
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	3	70	100	83	15.5	78	76
	Gesamt	*67*	*33*	*200*	***93***	*26.1*	***100***	***82***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	21	67	109	90	12.2	92	89
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	40	131	80	24.1	83	89
	Gesamt	*42*	*40*	*131*	***85***	*19.6*	***90***	***82***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	18	50	113	92	15.9	100	56
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	31	37	150	90	22.8	96	79
	Sandschluffe (Us, Uu)	28	35	120	81	23.8	91	79
	Gesamt	*77*	*35*	***150***	***87***	*22.0*	***100***	***79***
Gesamt		321	32	***200***	86	24	***94***	***82***

Abnehmende Cd-KW-Anteile (xG) in der Reihe Sand > Lehm = Ton > Schluff

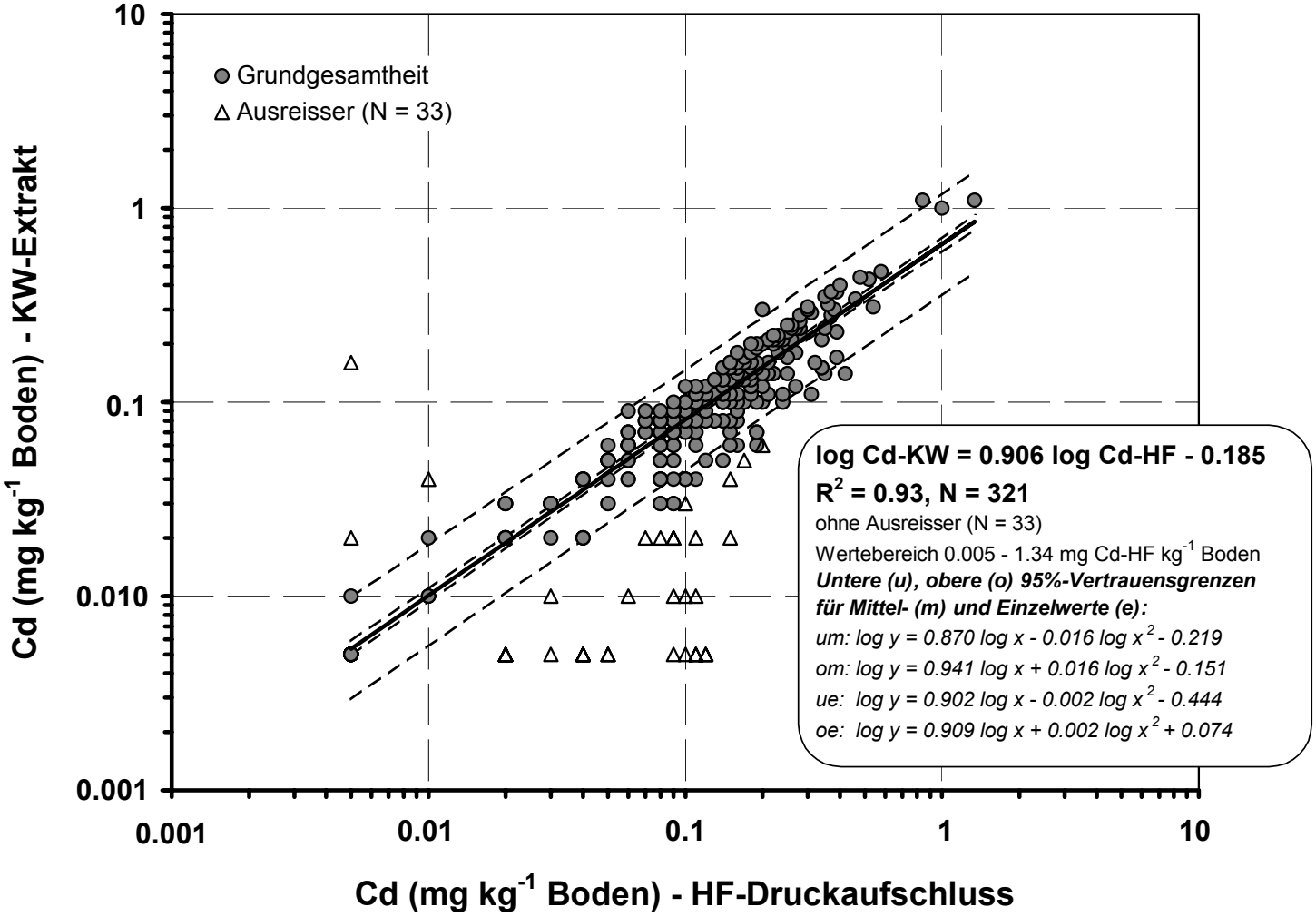


Abbildung 2a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Cd-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Cd-Gehalten

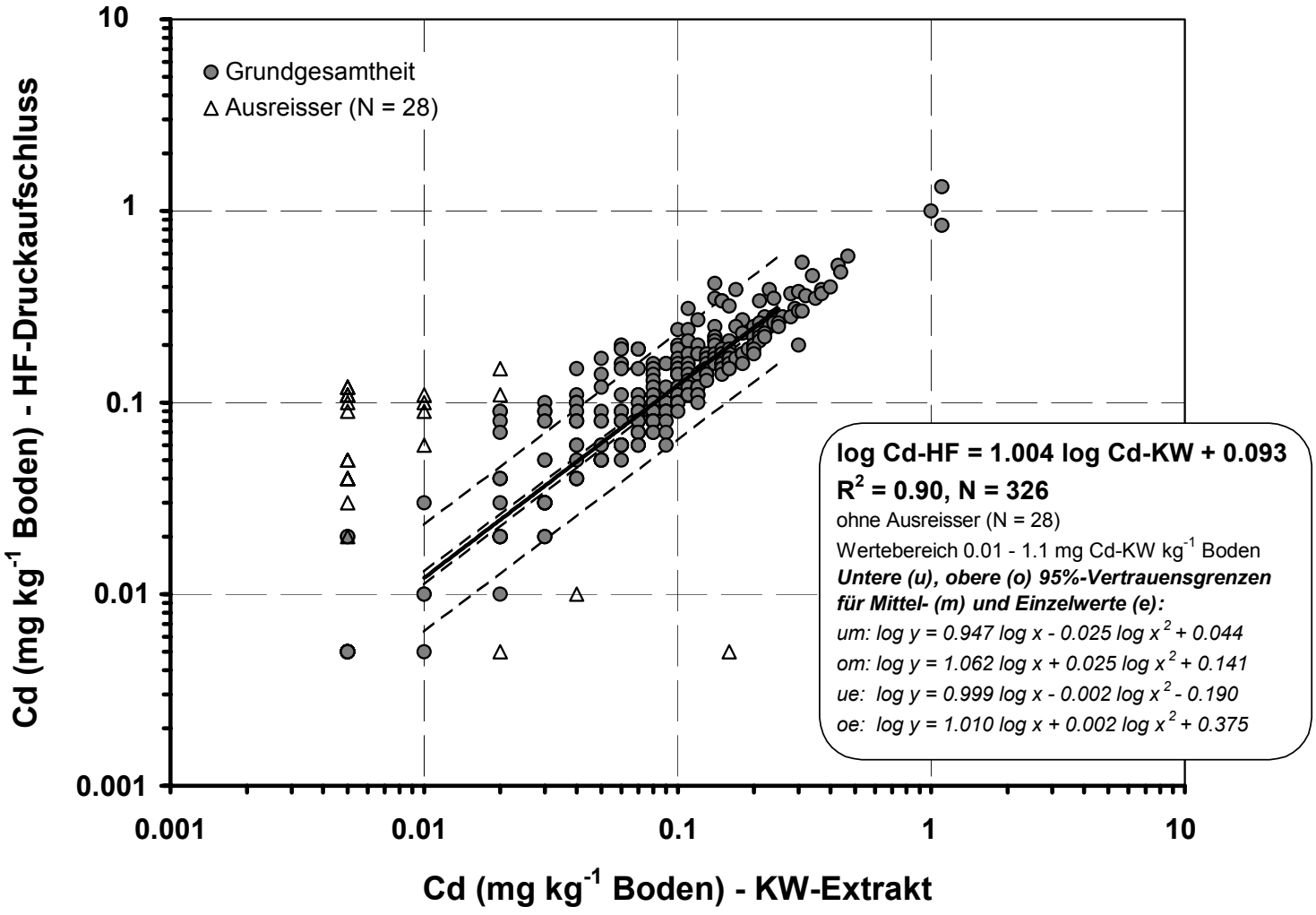


Abbildung 2b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Cd-Gehalten und Cd-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.3 CHROM

Tabelle 12a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Chromgehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 354) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Cr-HF (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	19.7	130	59.8	24.4	53.0	55.3
Sand	159	2.9	150	21.6	18.5	17.3	17.2
Schluff	71	19.0	140	60.2	28.5	51.0	54.2
Ton	43	26.0	230	79.2	39.3	70.0	71.4
Gesamt	*354*	*2.9*	*230*	***45.1***	*33.5*	***39.0***	***33.7***
Bodenartenhauptgruppe	Cr-KW (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	14.3	65	34.1	12.4	32.0	32.0
Sand	159	1.4	47	12.3	8.2	10.1	10.0
Schluff	71	10.2	56	29.6	10.0	30.0	27.8
Ton	43	15.3	89	37.5	17.2	33.0	34.2
Gesamt	*354*	*1.4*	*89*	***23.8***	*15.3*	***22.0***	***18.6***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 12b: ohne Ausreißer (N = 11)

Bodenartenhauptgruppe	Cr-HF (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	80	19.7	130	60	24.4	53	55
Sand	150	2.9	105	21	15.6	17.4	17.3
Schluff	71	19.0	140	60	28.5	51	54
Ton	42	26	170	76	31.9	69	70
Gesamt	*343*	*2.9*	*170*	***45***	*31.6*	***40***	***34***
Bodenartenhauptgruppe	Cr-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	80	14.3	65	34	12.3	32	32
Sand	150	2.3	47	13	8.1	10.5	10.5
Schluff	71	10.2	56	30	10.0	30	30
Ton	42	15.3	89	38	17.3	32	32
Gesamt	*343*	*2.3*	*89*	***24***	*15.2*	***22***	***22***

**) ohne Ausreißer (N = 11), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 13a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Chromgehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 354) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Cr-KW Cr-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	5	43	80	57	13.7	53	56
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	69	18	97	62	16.2	65	60
	Reinsande (Ss)	85	18	100	59	15.4	60	56
	Gesamt	*159*	*18*	*100*	***60***	*15.7*	***63***	***58***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	19	28	76	60	11.0	60	59
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	32	24	74	53	12.7	53	51
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	30	27	91	67	14.9	69	65
	Gesamt	*81*	*24*	*91*	***60***	*14.4*	***60***	***58***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	32	100	54	13.7	54	52
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	31	68	52	10.2	53	51
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	30	79	50	26.2	40	46
	Gesamt	*71*	*30*	*100*	***53***	*12.6*	***53***	***51***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	14	74	49	15.2	53	46
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	27	80	52	14.5	47	50
	Gesamt	*43*	*14*	*80*	***50***	*14.8*	***52***	***48***
Gesamt		*354*	*14*	*100*	***57***	*15.2*	***58***	***55***

Abnehmende Cr-KW-Anteile (xG) in der Reihe Sand = Lehm > Schluff > Ton

Tabelle 13b: ohne Ausreißer (N = 11)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Cr-KW Cr-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	5	43	80	57	13.7	53	56
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	66	35	97	64	14.0	66	62
	Reinsande (Ss)	79	32	100	62	12.5	61	60
	Gesamt	*150*	*32*	*100*	***63***	*13.2*	***64***	***61***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	19	28	76	60	11.0	60	59
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	31	29	74	54	11.7	54	53
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	30	27	91	67	14.9	69	65
	Gesamt	*80*	*27*	*91*	***60***	*13.9*	***60***	***58***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	32	100	54	13.7	54	52
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	31	68	52	10.2	53	51
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	30	79	50	26.2	40	46
	Gesamt	*71*	*30*	*100*	***53***	*12.6*	***53***	***51***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	21	25	74	50	13.5	53	48
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	27	80	52	14.5	47	50
	Gesamt	*42*	*25*	*80*	***51***	*13.9*	***52***	***49***
Gesamt		*343*	*25*	*100*	***59***	*14.1*	***59***	***57***

Abnehmende Cr-KW-Anteile (xG) in der Reihe Sand > Lehm > Schluff > Ton

Tabelle 14: Multiple Regressionen der Beziehungen zwischen den Cr-Totalgehalten (HF = Flusssäure-Druckaufschluss) bzw. Königswasser-(KW)extrahierbaren Cr-Gehalten der Böden (Grundgesamtheit N = 354) unter Berücksichtigung weiterer Untersuchungsparameter (log = log 10)

Abhängige Variable (mg kg^{-1})	Unabhängige Variable (mg kg^{-1})	einfacher Korrelations-koeffizient	partieller Korrelations-koeffizient	multiples R-Quadrat	B *)	Signifikanz für B
log Cr-KW N = 343 (o. Ausreißer N = 11)	**log Cr-HF**	**+ 0,95 *****	**+ 0,68 *****	**0,90**	**+ 0,561**	**0,000**
	log Fe-HF (g kg^{-1})	**+ 0,92 *****	**+ 0,51 *****	**0,92**	**+ 0,363**	**0,000**
	log Mn-HF	**+ 0,55 *****	**- 0,30 *****	**0,93**	**- 0,084**	**0,000**
	Konstante	**-**	**-**	**-**	**+ 0.202**	**0,000**
	pH-$H_2$0	*+ 0,15 **	-	-	-	-
	log Sand (%)	*- 0,50 ****	-	-	-	-
	log Schluff (%)	*+ 0,65 ****	-	-	-	-
	log Ton (%)	*+ 0,76 ****	-	-	-	-
	log KAK ($cmol_c$ kg^{-1})	*+ 0,81 ****	-	-	-	-
	log Al-HF	*+ 0,67 ****	-	-	-	-
log Cr-HF N = 343 (o. Ausreißer N = 11)	**log Cr-KW**	**+ 0,95 *****	**+ 0,59 *****	**0,90**	**+ 0,659**	**0,000**
	log Al-KW (g kg^{-1})	**+ 0,89 *****	**+ 0,39 *****	**0,91**	**+ 0,251**	**0,000**
	log Fe-KW (g kg^{-1})	**+ 0,90 *****	**+ 0,18 *****	**0,92**	**+ 0,112**	**0,001**
	Konstante	**-**	**-**	**-**	**+ 0,299**	**0,000**
	pH-$H_2$0	*+ 0,17 ***	-	-	-	-
	log Sand (%)	*- 0,55 ****	-	-	-	-
	log Schluff (%)	*+ 0,69 ****	-	-	-	-
	log Ton (%)	*+ 0,76 ****	-	-	-	-
	log KAK ($cmol_c$ kg^{-1})	*+ 0,81 ****	-	-	-	-
	log Mn-KW	*+ 0,62 ****	-	-	-	-

*) B = standardisierter Regressionskoeffizient
Kursiv gekennzeichnete Parameter wurden nicht in die multiple Regressionsgleichung aufgenommen.

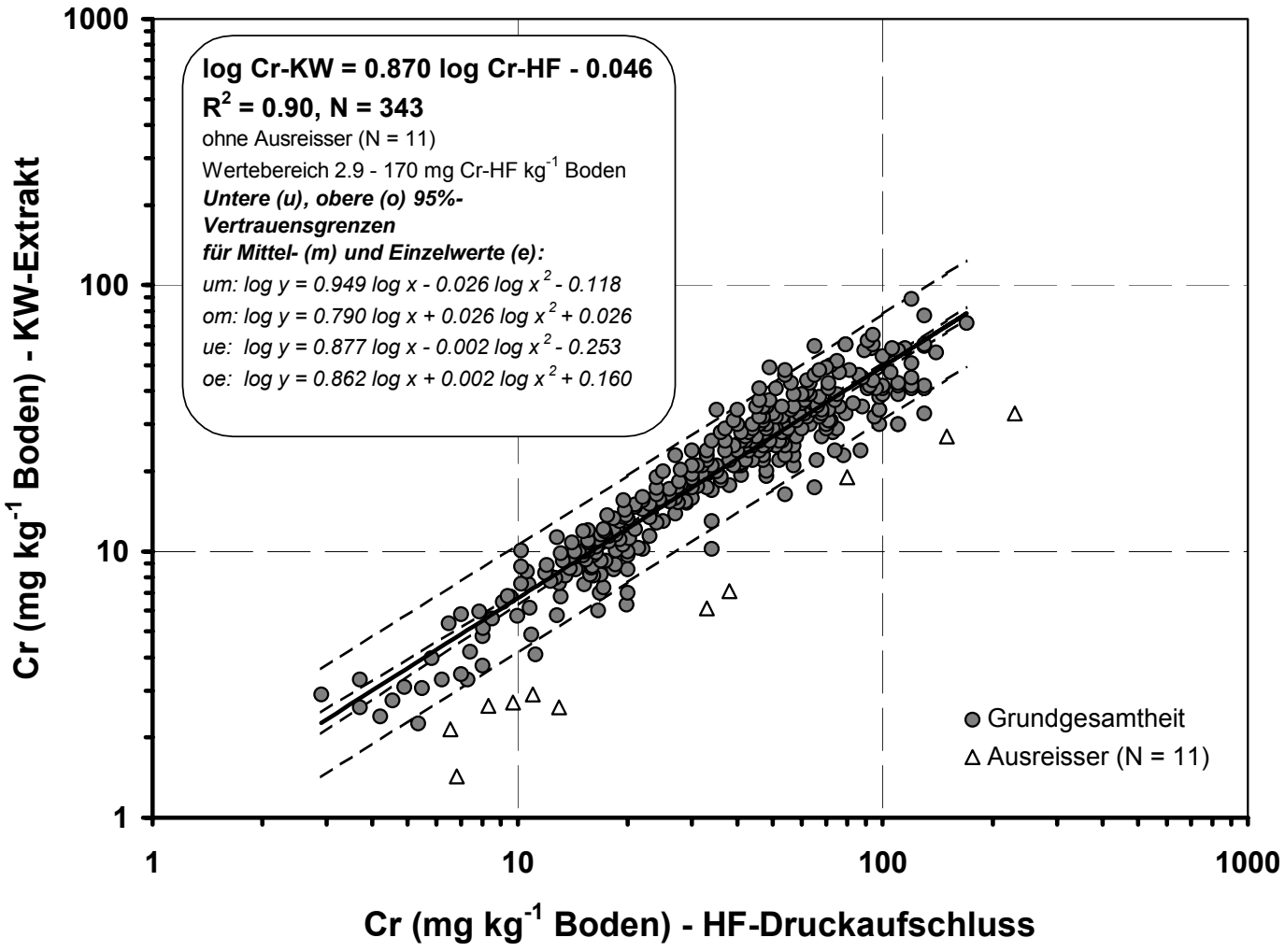


Abbildung 3a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Cr-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Cr-Gehalten

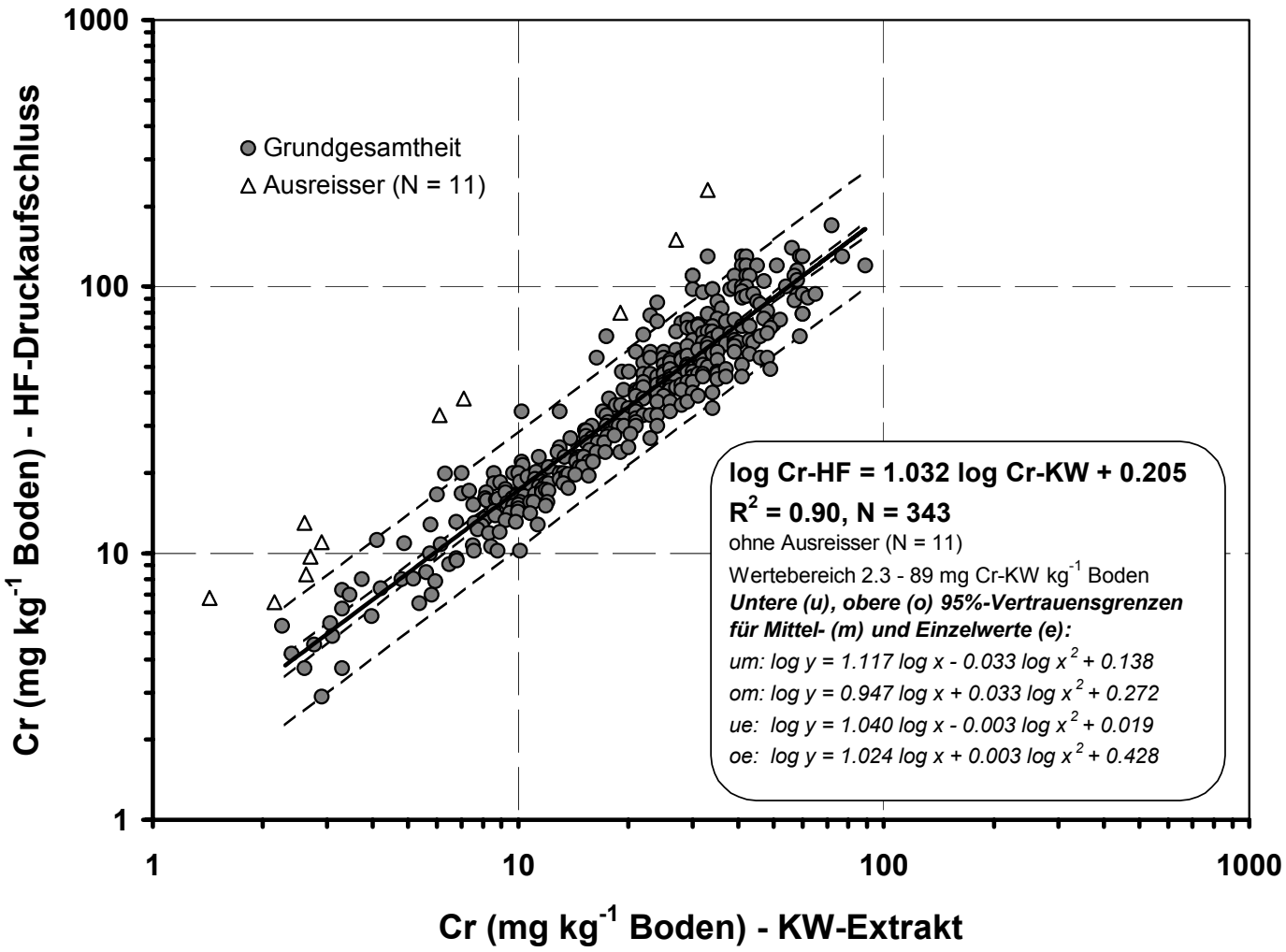


Abbildung 3b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Cr-Gehalten und Cr-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.4 KUPFER

Tabelle 15a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Kupfergehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 439) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Cu-HF (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	142	1.5	56	14.0	11.8	10.6	10.5
Sand	179	0.90	79	6.7	10.5	3.9	3.9
Schluff	73	3.2	46	15.3	8.8	13.0	12.9
Ton	45	5.7	47	16.5	9.6	14.0	14.1
Gesamt	*439*	0.90	*79*	***11.5***	*11.3*	***8.6***	***8.7***
Bodenartenhauptgruppe	Cu-KW (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	142	0.30	54	11.5	11.3	8.3	8.3
Sand	179	0.05	79	5.7	9.7	3.1	3.1
Schluff	73	0.50	43	12.9	8.4	11.0	11.0
Ton	45	2.6	36	13.3	8.1	10.8	10.8
Gesamt	*439*	*0.05*	*79*	***9.5***	*10.4*	***6.2***	***6.2***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 15b: ohne Ausreißer (N = 32)

Bodenartenhauptgruppe	Cu-HF (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	127	1.5	56	14.9	12.1	11.2	11.2
Sand	167	0.90	79	6.9	10.8	3.9	3.9
Schluff	71	3.2	46	15.5	8.8	13.2	13.2
Ton	42	6.2	47	17.0	9.7	14.2	14.2
Gesamt	407	0.90	79	***11.9***	11.6	***9.0***	***9.0***
Bodenartenhauptgruppe	Cu-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	127	1.0	54	12.7	11.3	9.0	9.0
Sand	167	0.56	79	6.0	10.0	3.3	3.3
Schluff	71	2.3	43	13.2	8.3	11.1	11.1
Ton	42	4.7	36	13.9	8.0	11.1	11.0
Gesamt	407	0.56	79	***10.1***	10.5	***7.0***	***7.0***

**) ohne Ausreißer (N = 32), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 16a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Kupfergehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 439) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Cu-KW Cu-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	36	63	100	87	10.2	90	86
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	34	51	96	79	11.6	81	78
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	10	83	54	38.3	67	39
	Gesamt	*73*	*10*	*100*	***82***	*14.2*	***84***	***79***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	23	48	105	81	13.1	83	80
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	22	46	113	78	16.8	79	76
	Gesamt	45	46	113	***80***	15.0	**81**	***78***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	6	66	98	81	13.1	77	80
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	85	47	103	83	12.2	84	82
	Reinsande (Ss)	88	2	110	79	21.6	85	72
	Gesamt	*179*	*2*	*110*	***81***	*17.5*	***84***	***77***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	20	58	102	81	13.3	83	80
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	63	14	110	74	24.5	80	67
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	59	13	102	75	21.6	82	70
	Gesamt	*142*	*13*	*110*	***76***	*22.0*	***82***	***70***
Gesamt		*439*	*2*	*113*	***79***	18.5	***83***	***76***

Abnehmende Cu-KW-Anteile (xG) in der Reihe Schluff > Ton > Sand > Lehm

Tabelle 16b: ohne Ausreißer (N = 32)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Cu-KW Cu-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	6	66	98	81	13.1	77	80
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	83	51	103	84	11.1	85	83
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	78	51	110	85	13.0	87	84
	Gesamt	*167*	*51*	*110*	***84***	*12.0*	***85***	***83***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	36	63	100	87	10.2	90	86
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	58	96	80	10.6	81	79
	Sandschluffe (Us, Uu)	2	67	83	75	11.5	75	75
	Gesamt	*71*	*58*	*100*	***83***	*10.9*	***84***	***82***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	20	58	102	81	13.3	83	80
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	55	54	110	82	13.8	83	80
	Reinsande (Ss)	52	50	102	82	13.1	83	81
	Gesamt	*127*	*50*	*110*	***82***	*13.3*	***83***	***80***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	60	105	83	11.2	84	82
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	20	54	113	81	14.2	80	80
	Gesamt	42	54	113	***82***	12.6	***83***	***81***
Gesamt		*407*	*50*	*113*	***83***	12.3	***84***	***83***

Abnehmende Cu-KW-Anteile (xG) in der Reihe Lehm > Schluff > Sand > Ton

Tabelle 17: Multiple Regressionen der Beziehungen zwischen den Cu-Totalgehalten (HF = Flusssäure-Druckaufschluss) bzw. Königswasser-(KW)extrahierbaren Cu-Gehalten der Böden (Grundgesamtheit N = 354) unter Berücksichtigung weiterer Untersuchungsparameter (log = log 10)

Abhängige Variable (mg kg^{-1})	Unabhängige Variable (mg kg^{-1})	einfacher Korrelations-koeffizient	partieller Korrelations-koeffizient	multiples R-Quadrat	B *)	Signifikanz für B
log Cu-KW	**log Cu-HF**	**+ 0,99 *****	**+ 0,96 *****	**0,97**	**+ 1,025**	**0,000**
	log Schluff (%)	**+ 0,60 *****	**- 0,25 *****	**0,97**	**- 0.034**	**0,000**
	log Al-HF (g kg^{-1})	**+ 0,79 *****	**+ 0,14 *****	**0,98**	**- 0,051**	**0,000**
N = 336	**Konstante**	**-**	**-**	**-**	**- 0,137**	**0,010**
o. Ausreißer	*pH-H_2O*	*+ 0,17 ****	-	-	-	-
(N = 18)	*log Sand (%)*	*- 0,51 ****	-	-	-	-
	log Ton (%)	*+ 0,67 ****	-	-	-	-
	log KAK ($cmol_c$ kg^{-1})	*+ 0,72 ****	-	-	-	-
	log Fe- HF (g kg^{-1})	*+ 0,79 ****	-	-	-	-
	log Mn-HF	*+ 0,64 ****	-	-	-	-
log Cu-HF	**log Cu-KW**	**+ 0,99 *****	**+ 0,94 *****	**0,97**	**+ 0,851**	**0,000**
	log Al-KW (g kg^{-1})	**+ 0,89 *****	**+ 0,37*****	**0,98**	**+ 0,135**	**0,000**
N = 336	**Konstante**	**-**	**-**	**-**	**+ 0,057**	**0,000**
o. Ausreißer	*pH-H_2O*	+ 0,19 ***	-	-	-	-
(N = 18)	*log Sand (%)*	- 0,53 ***	-	-	-	-
	log Schluff (%)	+ 0,64 ***	-	-	-	-
	log Ton (%)	+ 0,69 ***	-	-	-	-
	log KAK($cmol_c$ kg^{-1})	+ 0,74 ***	-	-	-	-
	log Fe- HF (g kg^{-1})	+ 0.80 ***	-	-	-	-
	log Mn-HF	+ 0,65 ***	-	-	-	-

*) B = standardisierter Regressionskoeffizient
Kursiv gekennzeichnete Parameter wurden nicht in die multiple Regressionsgleichung aufgenommen.

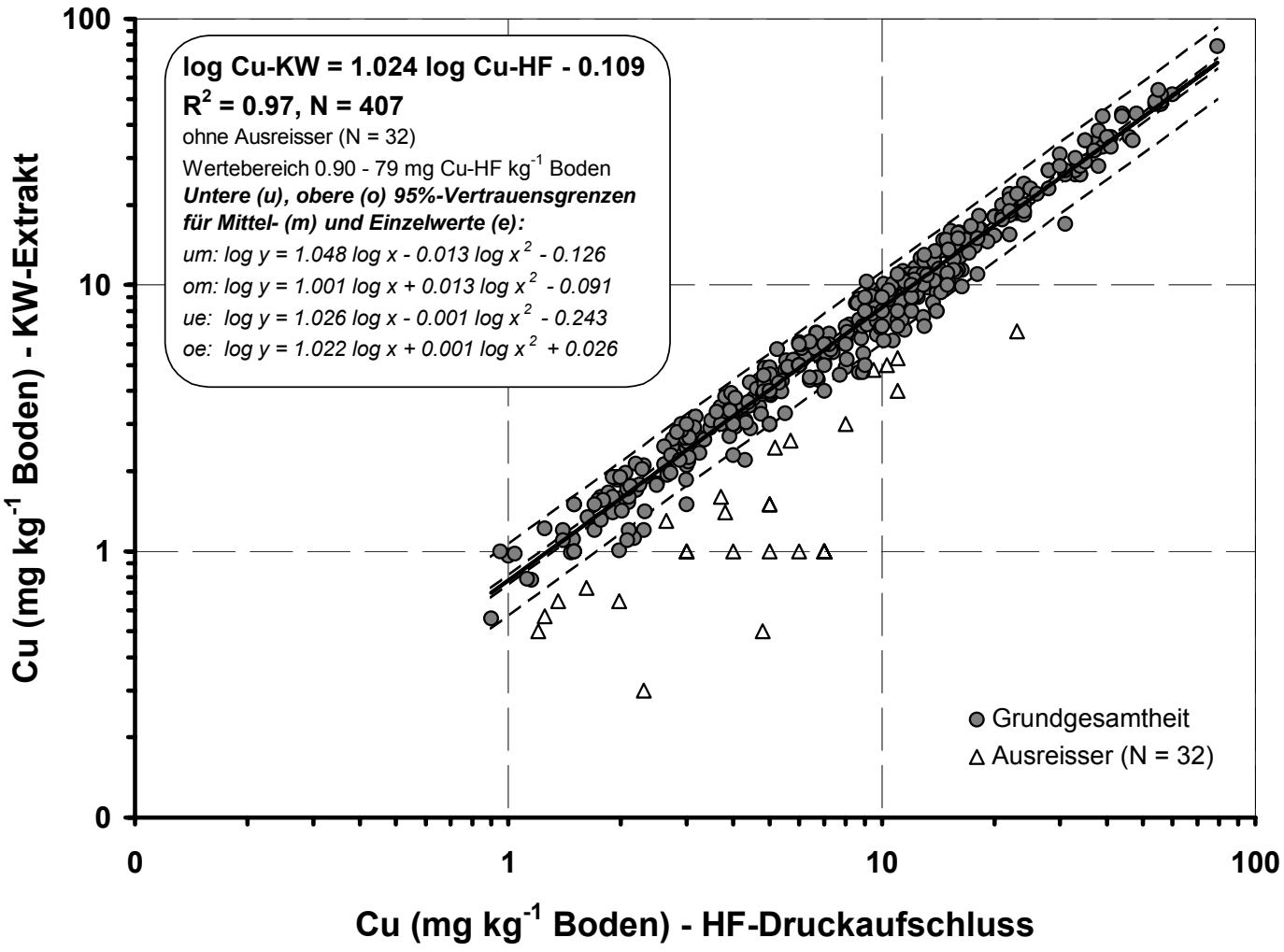


Abbildung 4a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Cu-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Cu-Gehalten

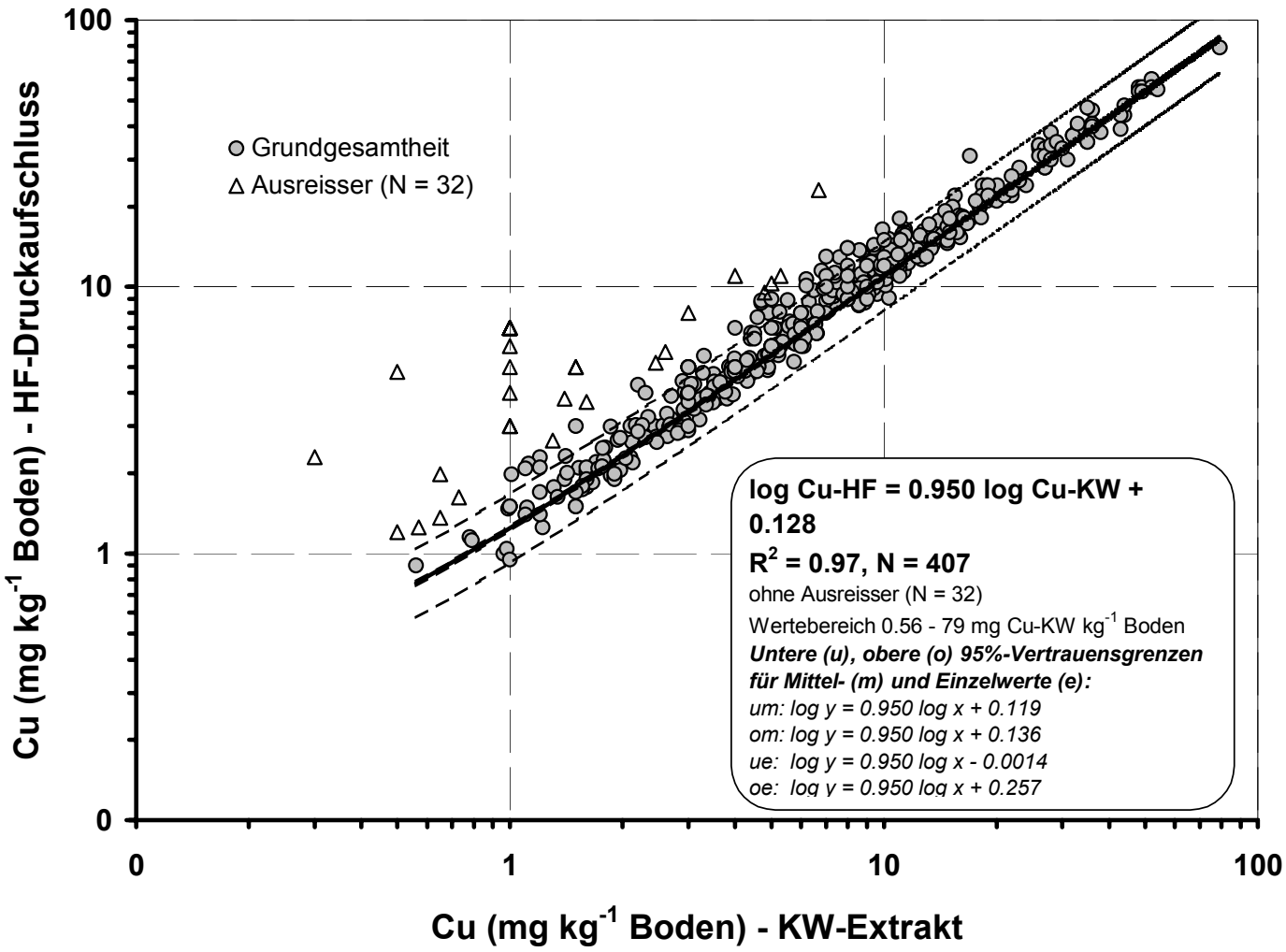


Abbildung 4b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Cu-Gehalten und Cu-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.5 NICKEL

Tabelle 18a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Nickelgehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 439) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Ni-HF (mg kg^{-1})$^{*)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	142	1.5	82	23	12.6	20	20
Sand	179	1.4	72	11.0	10.3	8.1	8.3
Schluff	73	6.9	100	30	17.7	26	26
Ton	45	12.0	110	42	20	39	38
Gesamt	*439*	*1.4*	*110*	***21***	*17.0*	***17.6***	***16***
Bodenartenhauptgruppe	Ni-KW (mg kg^{-1})$^{*)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	142	1.5	66	15.5	12.7	14.0	10.0
Sand	179	0.70	64	7.9	8.1	6.0	5.7
Schluff	73	1.5	83	25	15.4	22	20
Ton	45	4.5	90	32	17.5	28	28
Gesamt	*439*	*0.70*	*90*	***15.7***	*14.7*	***11.0***	***9.9***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 18b: ohne Ausreißer (N = 95)

Bodenartenhauptgruppe	Ni-HF (mg kg^{-1})$^{**)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	84	1.5	82	26	13.9	23	23
Sand	153	1.4	69	9.9	9.4	7.4	7.6
Schluff	69	6.9	100	30	18.1	27	26
Ton	38	12.0	110	43	21	39	39
Gesamt	*344*	*1.4*	*110*	***22***	*18.2*	***16.8***	***15.2***
Bodenartenhauptgruppe	Ni-KW (mg kg^{-1})$^{**)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	84	1.5	66	22	12.1	19.0	19.2
Sand	153	1.3	64	8.6	8.3	6.6	6.6
Schluff	69	6.4	83	26	15.1	23	22
Ton	38	10.7	90	36	16.9	33	32
Gesamt	*344*	*1.3*	*90*	***18.3***	*15.2*	***14.0***	***13.0***

**) ohne Ausreißer (N = 95), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 19a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Nickelgehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 439) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Ni-KW Ni-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	6	39	100	85	22.9	90	90
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	85	8	113	72	29.7	81	81
	Reinsande (Ss)	88	11	114	83	21.0	88	88
	Gesamt	179	8	114	***78***	26.1	***86***	***86***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	36	8	104	86	16.2	90	90
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	34	8	100	82	17.7	85	85
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	24	100	63	38.2	66	66
	Gesamt	73	8	104	***83***	18.3	***85***	***85***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	23	20	100	76	17.6	80	80
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	22	32	109	77	20.3	82	82
	Gesamt	45	20	109	***77***	18.8	***81***	***81***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	20	39	100	80	15.8	84	84
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	63	6	105	61	27.9	64	64
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	59	6	103	57	35.5	74	74
	Gesamt	142	6	105	***62***	30.8	***74***	***74***
Gesamt		*439*	6	114	***74***	27.2	***83***	***83***

Abnehmende Ni-KW-Anteile (xG) in der Reihe Sand > Schluff > Ton > Lehm

Tabelle 19b: ohne Ausreißer (N = 95)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Ni-KW Ni-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	5	89	100	94	5.40	91	94
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	68	61	113	86	11.24	84	85
	Reinsande (Ss)	80	61	114	89	11.03	91	88
	Gesamt	*153*	*61*	*114*	***88***	*11.11*	***88***	***87***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	68	104	88	9.29	91	88
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	32	63	100	85	9.68	85	84
	Sandschluffe (Us, Uu)	2	66	100	83	23.78	83	81
	Gesamt	*69*	*63*	*104*	***87***	*9.87*	***87***	***86***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	17	70	100	85	8.55	86	85
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	36	58	105	82	12.30	82	81
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	31	65	103	88	9.15	87	88
	Gesamt	*84*	*58*	*105*	***85***	*10.80*	***86***	***84***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	20	64	100	82	9.00	82	81
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	18	73	109	86	9.20	86	85
	Gesamt	38	64	109	***84***	9.22	***83***	***83***
Gesamt		*344*	*58*	*114*	***86***	10.66	***87***	***85***

Abnehmende Ni-KW-Anteile (xG) in der Reihe Sand > Schluff > Lehm > Ton

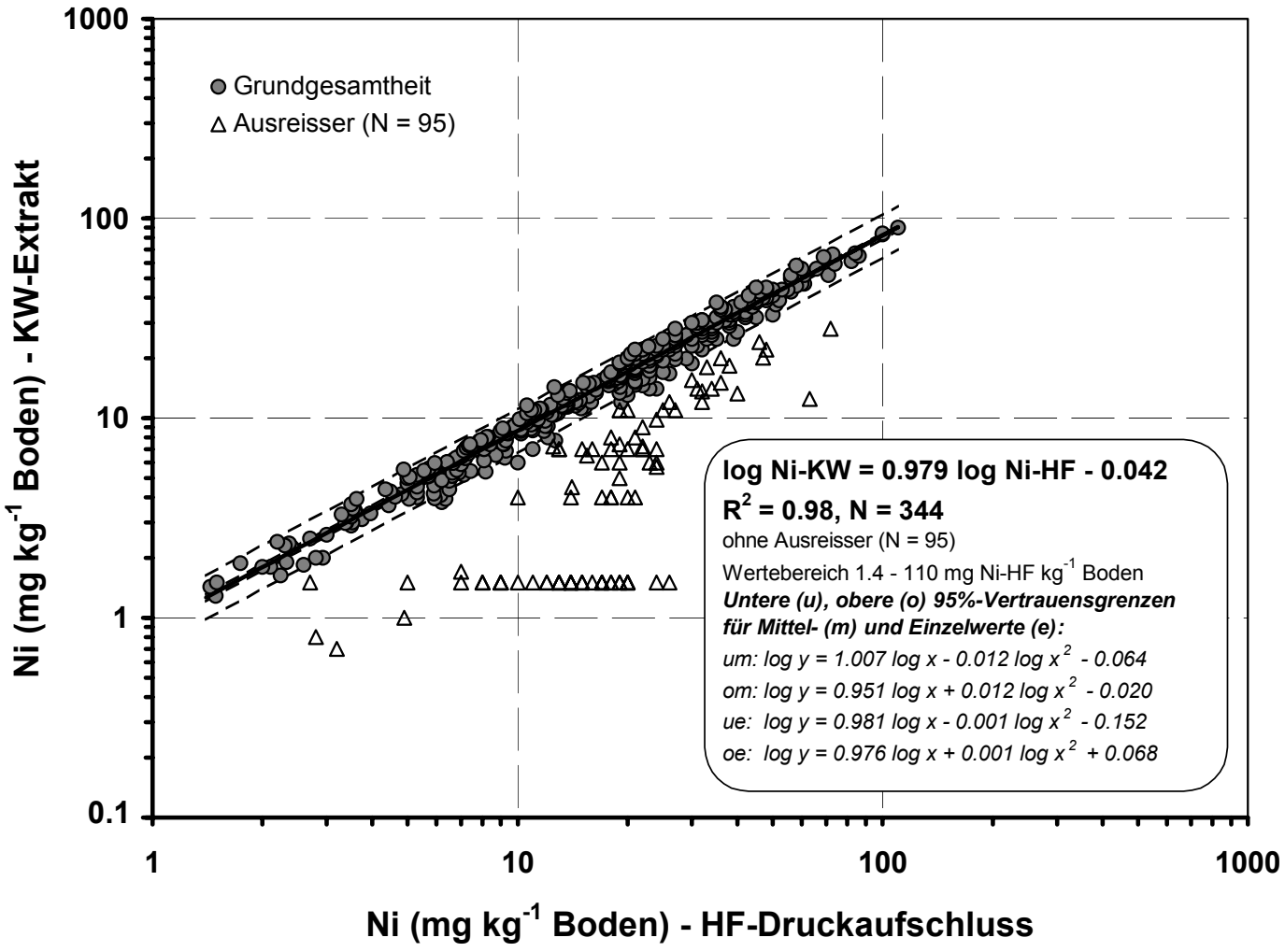


Abbildung 5a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Ni-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Ni-Gehalten

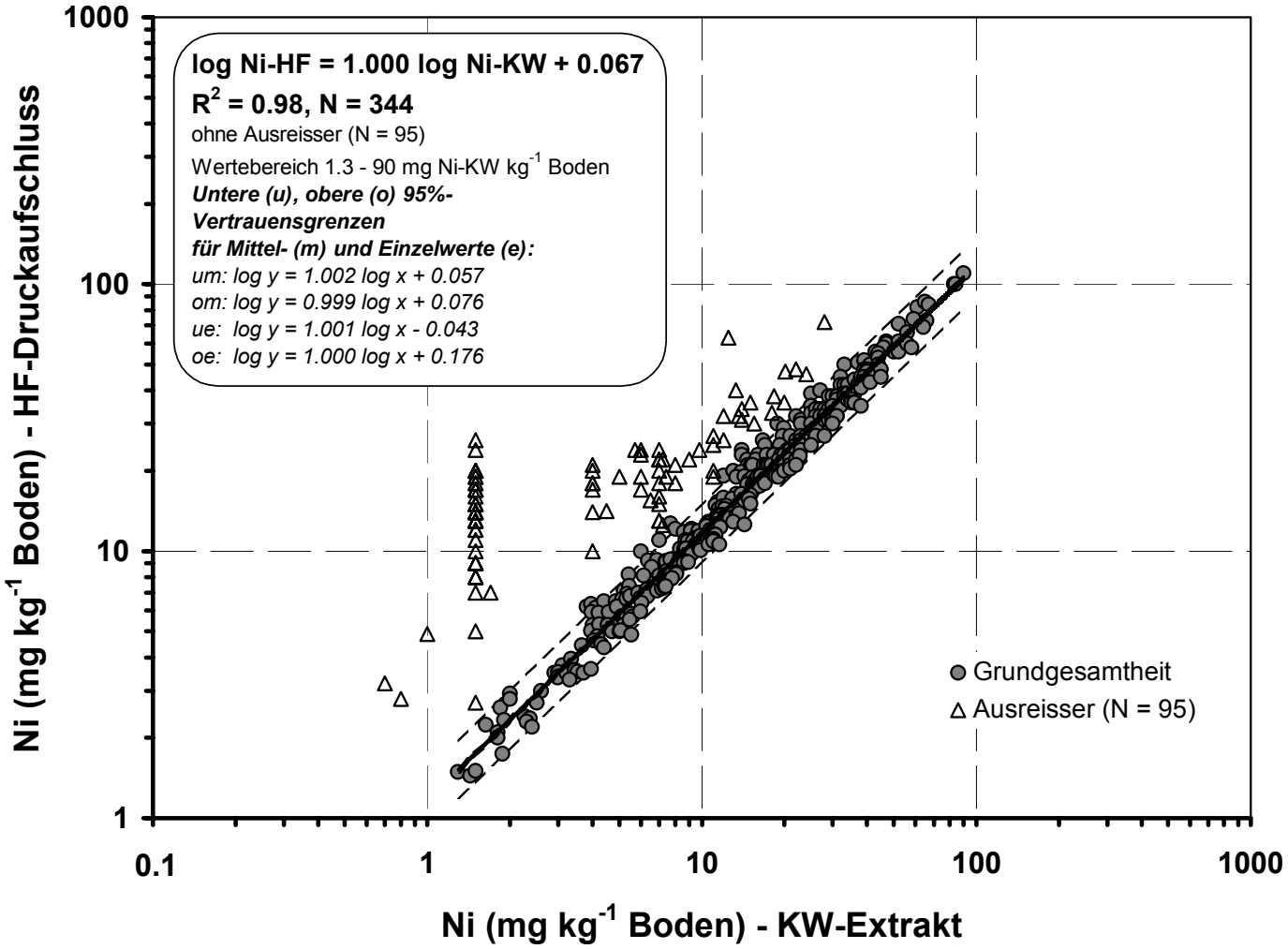


Abbildung 5b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Ni-Gehalten und Ni-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.6 QUECKSILBER

Tabelle 20a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Quecksilbergehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 354) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Hg-HF (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.010	0.77	0.062	0.09	0.042	0.045
Sand	159	0.003	0.25	0.030	0.03	0.024	0.024
Schluff	71	0.009	1.2	0.066	0.15	0.038	0.041
Ton	43	0.018	1.8	0.13	0.31	0.056	0.064
Gesamt	*354*	*0.003*	*1.8*	***0.057***	*0.14*	***0.033***	***0.035***
Bodenartenhauptgruppe	Hg-KW (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.004	0.80	0.055	0.09	0.037	0.039
Sand	159	0.004	0.25	0.026	0.02	0.022	0.021
Schluff	71	0.007	1.2	0.060	0.14	0.031	0.036
Ton	43	0.016	1.7	0.12	0.30	0.046	0.055
Gesamt	*354*	*0.004*	*1.7*	***0.051***	*0.13*	***0.029***	***0.030***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 20b: ohne Ausreißer (N = 14)

Bodenartenhauptgruppe	Hg-HF (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	78	0.010	0.77	0.061	0.09	0.042	0.044
Sand	151	0.003	0.25	0.030	0.03	0.024	0.024
Schluff	68	0.009	1.2	0.066	0.15	0.038	0.041
Ton	43	0.018	1.8	0.1	0.31	0.056	0.064
Gesamt	*340*	*0.003*	*1.8*	***0.057***	*0.14*	***0.033***	***0.035***
Bodenartenhauptgruppe	Hg-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	78	0.008	0.80	0.055	0.09	0.037	0.040
Sand	151	0.004	0.25	0.026	0.02	0.022	0.022
Schluff	68	0.009	1.2	0.061	0.14	0.033	0.037
Ton	43	0.016	1.7	0.12	0.30	0.046	0.055
Gesamt	*340*	*0.004*	*1.7*	***0.052***	*0.14*	***0.029***	***0.031***

**) ohne Ausreißer (N = 14), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 21a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Quecksilbergehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 354) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Hg-KW Hg-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	47	119	91	14.5	94	90
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	47	131	91	20.8	94	88
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	58	104	85	23.9	92	82
	Gesamt	*71*	*47*	*131*	***91***	*17.8*	***94***	***89***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	5	92	104	99	4.4	100	86
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	69	36	154	90	19.3	93	85
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	85	28	133	86	19.4	91	88
	Gesamt	*159*	*28*	*154*	***88***	*19.2*	***92***	***87***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	50	125	89	18.9	92	87
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	57	113	89	17.0	93	87
	Gesamt	*43*	*50*	*125*	***89***	*17.8*	***93***	***87***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	19	44	117	88	17.3	93	99
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	32	24	118	89	19.9	93	88
	Reinsande (Ss)	30	54	121	89	13.6	91	84
	Gesamt	*81*	*24*	*121*	***89***	*17.0*	***92***	***86***
Gesamt		*354*	*24*	*154*	***89***	*18.2*	***93***	***87***

Abnehmende Hg-KW-Anteile (xG) in der Reihe Schluff > Lehm = Ton > Sand

Tabelle 21b: ohne Ausreißer (N = 14)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Hg-KW Hg-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	34	58	119	92	12.4	95	92
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	31	62	131	94	18.1	94	92
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	58	104	85	23.9	92	82
	Gesamt	*68*	*58*	*131*	***93***	*15.6*	***94***	***91***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	5	92	104	99	4.4	100	89
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	66	55	154	93	16.5	93	91
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	80	54	133	89	16.0	92	88
	Gesamt	*151*	*54*	*154*	***91***	*16.1*	***93***	***89***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	18	67	117	90	14.0	93	99
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	30	59	118	92	14.3	93	91
	Reinsande (Ss)	30	54	121	89	13.6	91	88
	Gesamt	*78*	*54*	*121*	***91***	*13.9*	***93***	***89***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	50	125	89	18.9	92	87
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	57	113	89	17.0	93	87
	Gesamt	*43*	*50*	*125*	***89***	*17.8*	***93***	***87***
Gesamt		*340*	*50*	*154*	***91***	*15.7*	***93***	***90***

Abnehmende Hg-KW-Anteile (xG) in der Reihe Schluff > Lehm = Sand > Ton

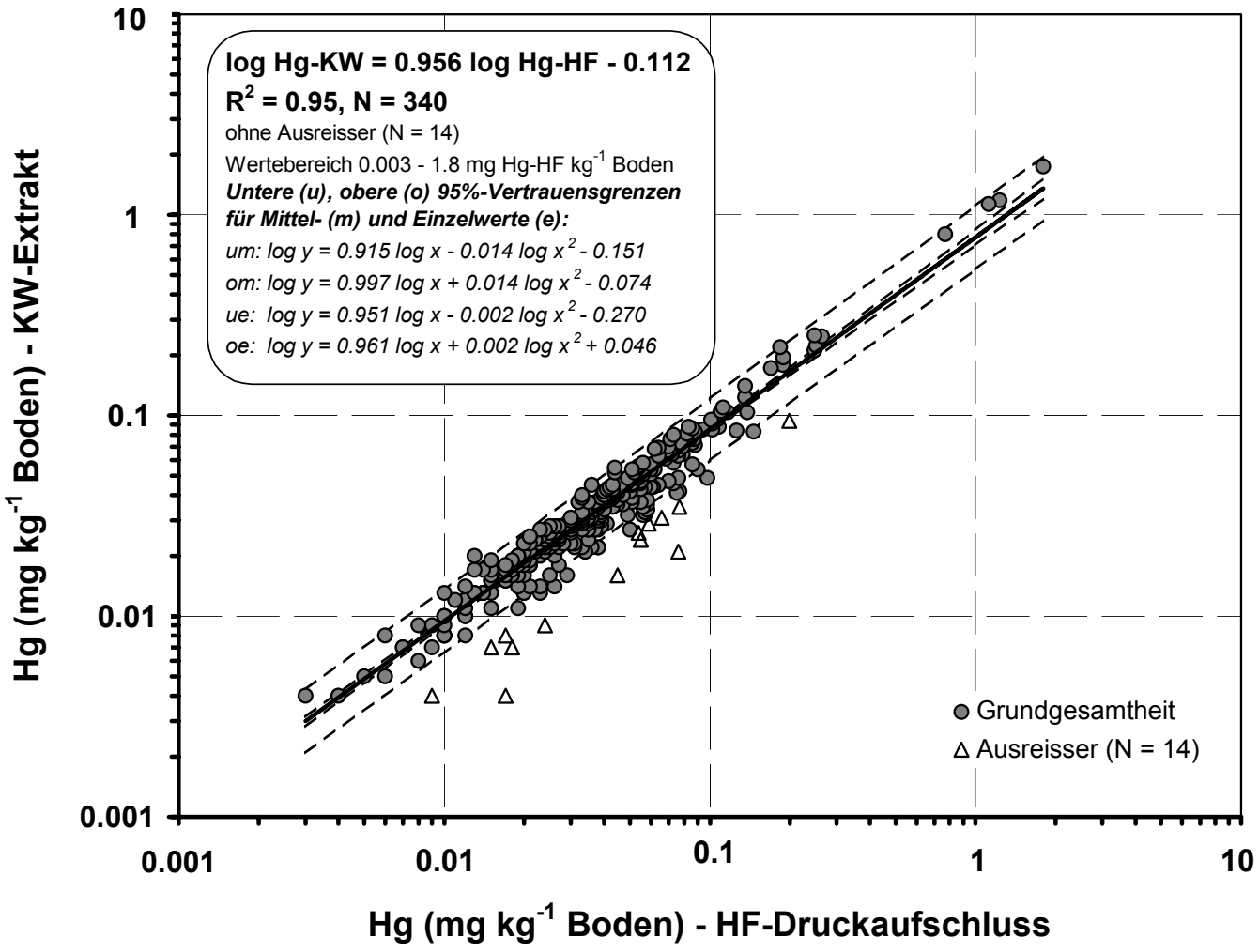


Abbildung 6a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Hg-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Hg-Gehalten

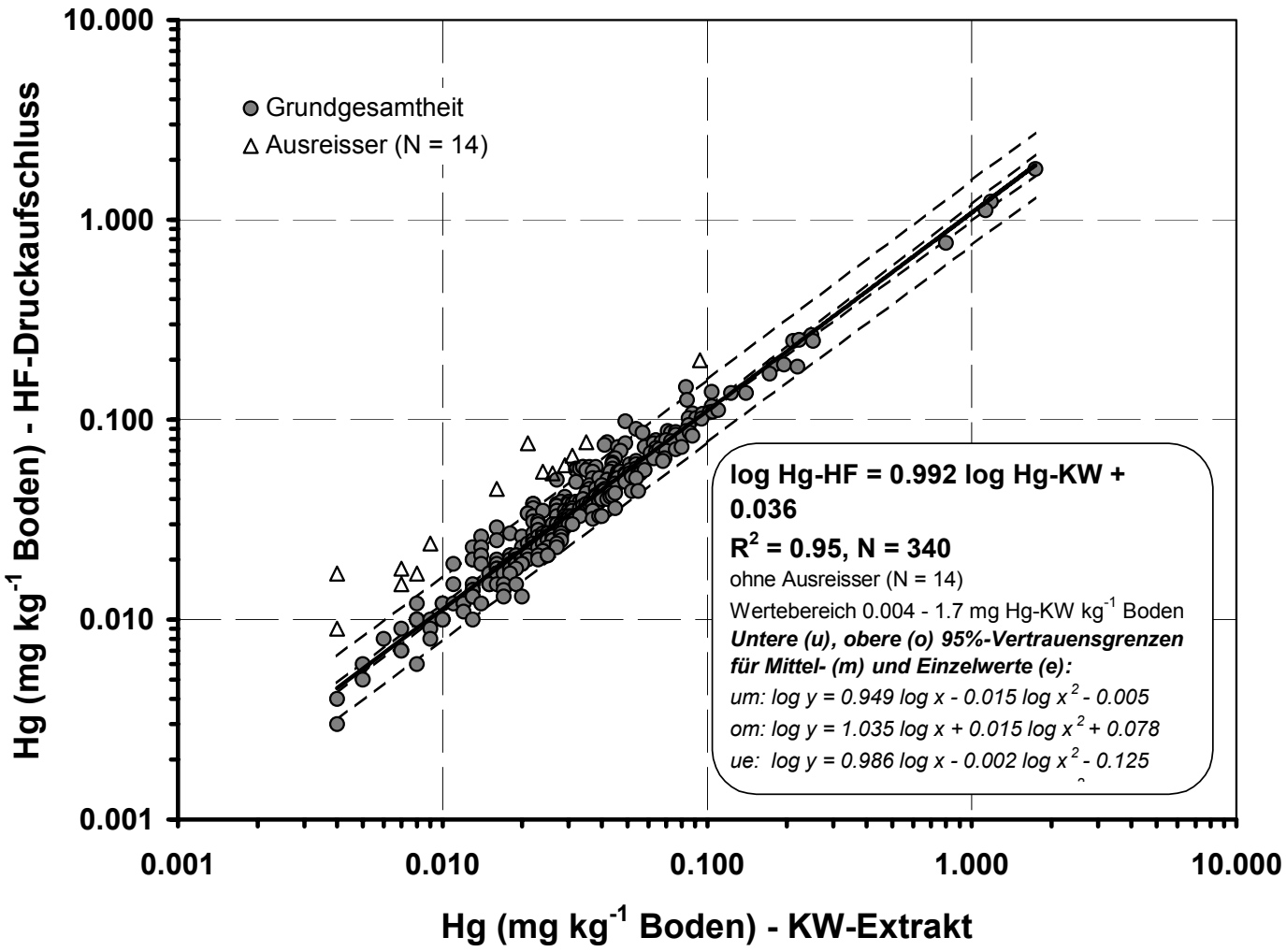


Abbildung 6b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Hg-Gehalten und Hg-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.7 THALLIUM

Tabelle 22a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Thalliumgehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 354) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Tl-HF (mg kg^{-1})$^{*)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.060	2.0	0.55	0.36	0.46	0.45
Sand	159	0.005	2.2	0.35	0.35	0.26	0.24
Schluff	71	0.250	1.7	0.61	0.31	0.55	0.55
Ton	43	0.250	1.8	0.65	0.39	0.59	0.57
Gesamt	*354*	*0.005*	*2.2*	***0.49***	*0.37*	***0.39***	***0.36***
Bodenartenhauptgruppe	Tl-KW (mg kg^{-1})$^{*)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.030	0.69	0.22	0.14	0.18	0.19
Sand	159	0.005	0.51	0.10	0.08	0.10	0.059
Schluff	71	0.060	0.54	0.23	0.11	0.22	0.20
Ton	43	0.12	1.2	0.33	0.22	0.25	0.28
Gesamt	*354*	*0.005*	*1.2*	***0.18***	*0.15*	***0.15***	***0.12***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 22b: ohne Ausreißer (N = 34)

Bodenartenhauptgruppe	Tl-HF (mg kg^{-1})$^{**)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.060	2.0	0.55	0.36	0.46	0.45
Sand	125	0.005	2.2	0.36	0.36	0.27	0.24
Schluff	71	0.25	1.7	0.61	0.31	0.55	0.55
Ton	43	0.25	1.8	0.65	0.39	0.59	0.57
Gesamt	*320*	*0.005*	*2.2*	***0.50***	*0.37*	***0.41***	***0.38***
Bodenartenhauptgruppe	Tl-KW (mg kg^{-1})$^{**)}$						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	81	0.030	0.69	0.22	0.14	0.18	0.19
Sand	125	0.005	0.51	0.13	0.07	0.12	0.10
Schluff	71	0.060	0.54	0.23	0.11	0.22	0.20
Ton	43	0.12	1.2	0.33	0.22	0.25	0.28
Gesamt	*320*	*0.005*	*1.2*	***0.20***	*0.14*	***0.17***	***0.16***

**) ohne Ausreißer (N = 5), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 23a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Thalliumgehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 354) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Tl-KW Tl-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	18	83	50	19.3	48	46
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	31	92	57	17.6	53	55
	Gesamt	*43*	*18*	*92*	***53***	*18.6*	***53***	***50***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	19	13	69	47	17.9	52	43
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	32	13	87	43	18.3	40	40
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	30	9	100	47	22.2	48	41
	Gesamt	*81*	*9*	*100*	***46***	*19.6*	***44***	***41***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	15	89	43	17.9	38	39
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	9	86	38	17.8	32	34
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	24	72	47	24.0	44	42
	Gesamt	*71*	*9*	*89*	***41***	*18.0*	***35***	***37***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	5	1	54	15	22.7	2.3	4.7
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	69	1	100	45	30.4	39	31
	Reinsande (Ss)	85	0.6	100	39	30.9	30	23
	Gesamt	*159*	*0.6*	*100*	***41***	*30.8*	***34***	***25***
Gesamt		*354*	*0.6*	*100*	***43***	*25.2*	***40***	***33***

Abnehmende Tl-KW-Anteile (xG) in der Reihe Ton > Lehm > Schluff > Sand

Tabelle 23b: ohne Ausreißer (N = 34)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Tl-KW Tl-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	15	89	43	17.9	38	37
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	9	86	38	17.8	32	46
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	24	72	47	24.0	44	55
	Gesamt	71	9	89	***41***	18.0	***35***	***50***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	2	18	54	36	24.9	36	41
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	59	9	100	52	27.5	50	31
	Reinsande (Ss)	64	10	100	50	27.5	44	44
	Gesamt	125	9	100	***51***	27.3	***47***	***43***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	19	13	69	47	17.9	52	43
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	32	13	87	43	18.3	40	39
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	30	9	100	47	22.2	48	34
	Gesamt	81	9	100	***46***	19.6	***44***	***42***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	22	18	83	50	19.3	48	43
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	31	92	57	17.6	53	40
	Gesamt	43	18	92	***53***	18.6	***53***	***41***
Gesamt		320	9	100	***48***	22.9	***45***	***42***

Abnehmende Tl-KW-Anteile (xG) in der Reihe Schluff > Sand > Lehm > Ton

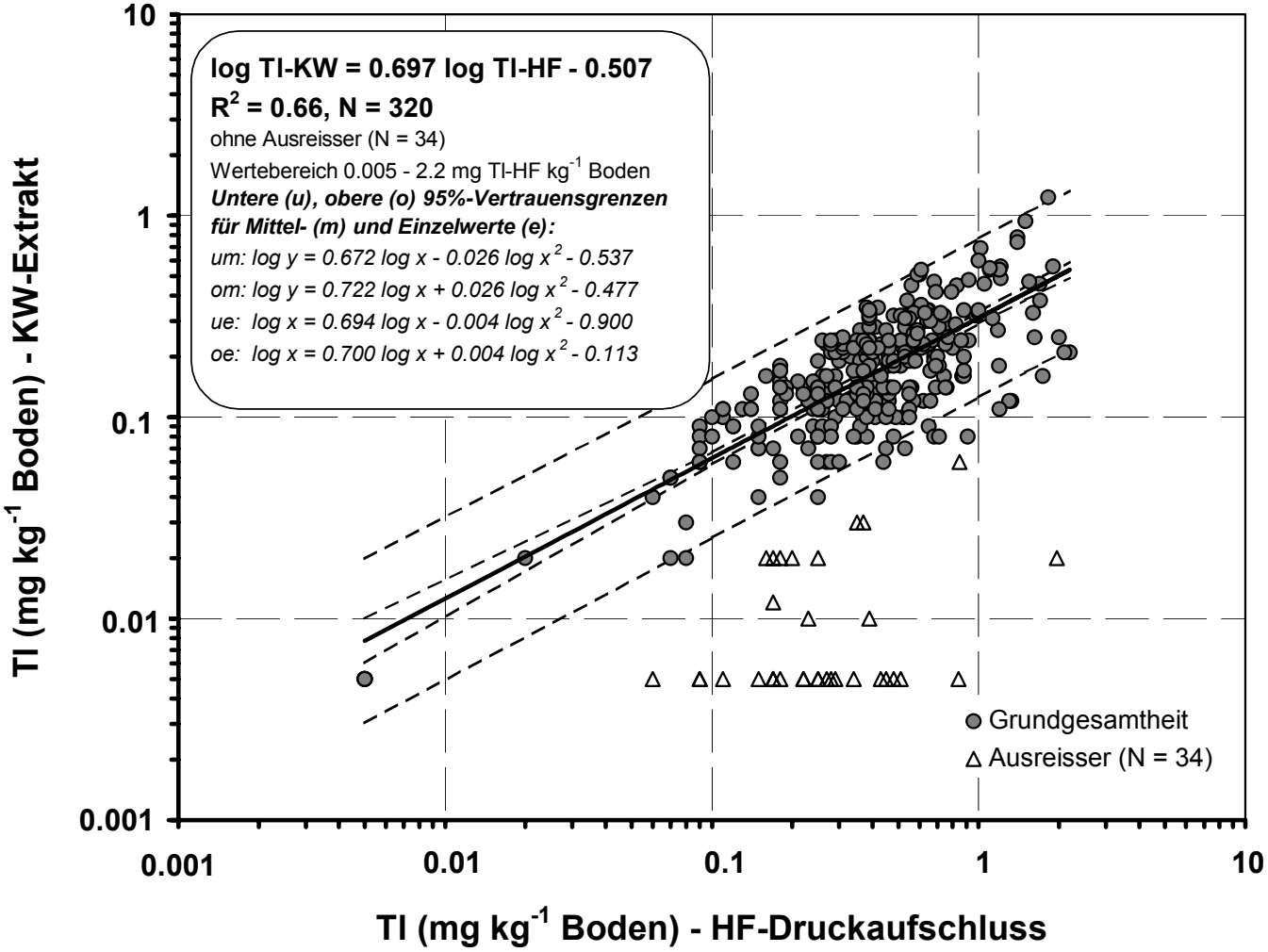


Abbildung 7a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Tl-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Tl-Gehalten

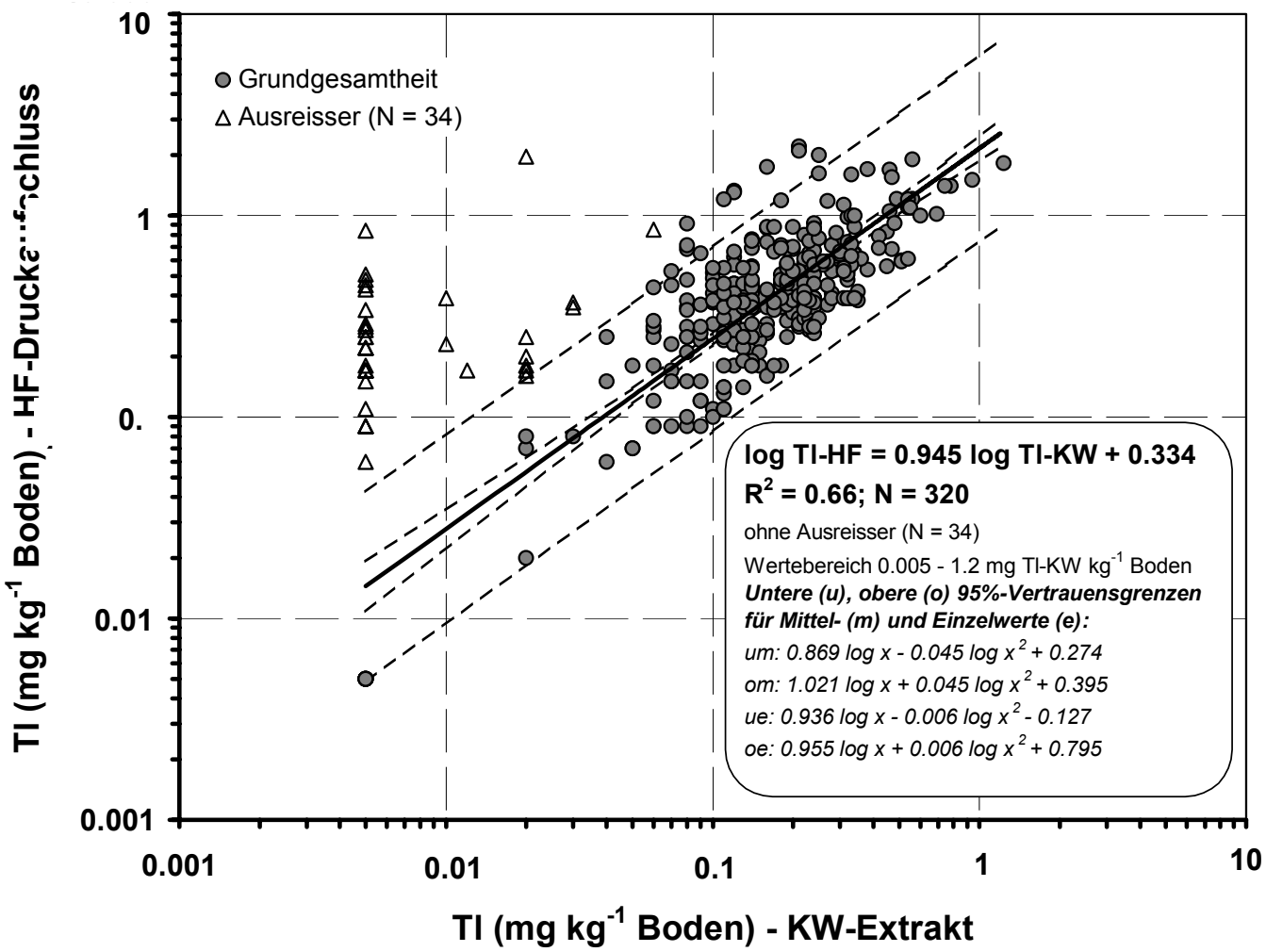


Abbildung 7b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Tl-Gehalten und Tl-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

3.4.8 ZINK

Tabelle 24a: Flusssäure-lösliche und Königswasser-extrahierbare Zinkgehalte der Bodenproben; insgesamt (N = 439) und getrennt nach Bodenartenhauptgruppe

Bodenartenhauptgruppe	Zn-HF (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	142	9.8	190	54	25.0	47	50
Sand	179	4.9	210	28	27.9	22	22
Schluff	73	26	270	63	34.7	55	56
Ton	45	28	175	68	34.7	57	62
Gesamt	*439*	*4.9*	*270*	***46***	*32.9*	***41***	***37***
Bodenartenhauptgruppe	Zn-KW (mg kg^{-1})*)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	142	7.0	110	42	19.6	41	38
Sand	179	2.5	150	22	19.9	17.1	17.3
Schluff	73	14.7	220	50	27.9	45	45
Ton	45	11.3	160	56	32.0	44	49
Gesamt	*439*	*2.5*	*220*	***37***	*26.2*	***33***	***29***

*) Gesamtumfang; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 24b: ohne Ausreißer (N = 26)

Bodenartenhauptgruppe	Zn-HF (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	133	9.8	130	53	21.7	47	49
Sand	166	4.9	210	27	24.9	22	21
Schluff	70	26	270	62	34.3	55	56
Ton	44	32	175	69	34.6	59	63
Gesamt	*413*	*4.9*	*270*	***46***	*31.4*	***41***	***37***
Bodenartenhauptgruppe	Zn-KW (mg kg^{-1})**)						
	N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Lehm	133	7.7	110	44	19.4	41	40
Sand	166	4.8	150	23	20.4	17.5	18
Schluff	70	19.1	220	51	28.0	46	46
Ton	44	22	160	57	31.6	45	51
Gesamt	*413*	*4.8*	*220*	***38***	*26.4*	***34***	***30***

**) ohne Ausreißer (N = 26), Test nach Grubb; HF = Flusssäure, KW = Königswasser

Tabelle 25a: Statistische Kennwerte (Schwankungsbreite, Mittelwert, Standardabweichung, Median (50. P.) und geometrisches Mittel (xG) der Königswasser-(KW)extrahierbaren Zinkgehalte in Prozent vom Totalgehalt (HF) der Proben (N = 439) in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe (Ton, Lehm, Schluff, Sand)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Zn-KW Zn-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	36	41	100	84	13.7	87	79
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	34	32	100	80	12.8	81	84
	Sandschluffe (Us, Uu)	3	38	87.5	65	25.3	71	88
	Gesamt	73	32	100	***81***	*14.1*	***84***	***82***
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	6	21	100	80	29.6	91	54
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	85	30	113	82	16.5	86	86
	Reinsande (Ss)	88	6	118	84	22.1	91	80
	Gesamt	179	6	118	***83***	*19.9*	***89***	***81***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	23	56	100	83	11.3	88	90
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	22	40	102	78	15.8	80	71
	Gesamt	45	40	102	81	13.7	***83***	***78***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	20	22	94	71	22.2	82	81
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	63	36	104	81	13.2	83	79
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	59	31	117	81	17.2	83	71
	Gesamt	142	22	117	***80***	*16.6*	***83***	***76***
Gesamt		439	6	118	***81***	17.4	***85***	***79***

Abnehmende Zn-KW-Anteile (xG) in der Reihe Schluff > Sand > Ton > Lehm

Tabelle 25b: ohne Ausreißer (N = 26)

Bodenarten-hauptgruppe	Bodenartengruppe	% [(Zn-KW Zn-HF^{-1}) x 100]						
		N	Min.	Max.	Mittel	Std.abw.	50. P.	xG
Sand	Schluffsande (Su3, Su4)	5	78	100	91	8.6	91	91
	Lehmsande (St2, Su2, Sl2, Sl3)	81	52	113	84	13.9	87	83
	Reinsande (Ss)	80	51	118	89	14.6	94	88
	Gesamt	*166*	*51*	*118*	***87***	*14.3*	***90***	***85***
Schluff	Tonschluffe (Ut4, Lu)	35	51	100	85	11.8	87	84
	Lehmschluffe (Ut2, Ut3, Uls)	33	61	100	81	9.8	81	81
	Sandschluffe (Us, Uu)	2	71	88	79	11.9	79	79
	Gesamt	*70*	*51*	*100*	***83***	*10.9*	***85***	***82***
Ton	Lehmtone (Tt, Tu2, Tl, Ts2)	23	56	100	83	11.3	88	82
	Schlufftone (Tu3, Tu4, Lt3)	21	53	102	80	13.6	80	79
	Gesamt	44	53	102	82	12.4	***83***	***81***
Lehm	Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4)	15	55	94	82	12.5	86	81
	Normallehme (Lt2, Ls2, Ls3, Ls4)	62	51	104	82	12.0	83	81
	Sandlehme (Slu, Sl4, St3)	56	59	117	83	14.1	84	82
	Gesamt	*133*	*51*	*117*	***82***	*12.9*	***84***	***81***
Gesamt		*413*	*51*	*118*	***84***	13.3	**86**	***85***

Abnehmende Zn-KW-Anteile (xG) in der Reihe Sand > Schluff > Ton = Lehm

Tabelle 26: Multiple Regressionen der Beziehungen zwischen den Zn-Totalgehalten (HF = Flusssäure-Druckaufschluss) bzw. Königswasser-(KW)extrahierbaren Zn-Gehalten der Böden (Grundgesamtheit N = 354) unter Berücksichtigung weiterer Untersuchungsparameter (log = log 10)

Abhängige Variable (mg kg^{-1})	Unabhängige Variable (mg kg^{-1})	einfacher Korrelations-koeffizient	partieller Korrelations-koeffizient	multiples R-Quadrat	B *)	Signifikanz für B
log Zn-KW N = 336 o. Ausreißer (N = 18)	**log Zn-HF**	**+ 0,98 *****	**+ 0,96 *****	**0,95**	**+ 0,997**	**0,000**
	log Ton (%)	**+ 0,66 *****	**- 0,15 *****	**0,96**	**- 0.028**	**0,005**
	Konstante	**-**	**-**	**-**	**- 0,040**	**0,045**
	pH-H_2O	*+ 0,17* ***	-	-	-	-
	log Sand (%)	*- 0,50* ***	-	-	-	-
	log Schluff (%)	*+ 0,61* ***	-	-	-	-
	log KAK ($cmol_c$ kg^{-1})	*+ 0,74* ***	-	-	-	-
	log Al-HF (g kg^{-1})	*+ 0,72* ***				
	log Fe- HF (g kg^{-1})	*+ 0,87* ***	-	-	-	-
	log Mn-HF	*+ 0,67* ***	-	-	-	-
log Zn-HF N = 336 o. Ausreißer (N = 18)	**log Zn-KW**	**+ 0,98 *****	**+ 0,96 *****	**0,95**	**+ 0,920**	**0,000**
	log Ton (%)	**+ 0,70 *****	**+ 0,35*****	**0,96**	**+ 0,061**	**0,000**
	Konstante	**-**	**-**	**-**	**+ 0,129**	**0,000**
	pH-H_2O	+ 0,19 ***	-	-	-	-
	log Sand (%)	- 0,52 ***	-	-	-	-
	log Schluff (%)	+ 0,63 ***	-	-	-	-
	log KAK($cmol_c$ kg^{-1})	+ 0,77 ***	-	-	-	-
	log Al-HF (g kg^{-1})	+ 0,86 ***	-	-	-	-
	log Fe- HF (g kg^{-1})	+ 0.88 ***	-	-	-	-
	log Mn-HF	+ 0,69 ***	-	-	-	-

*) B = standardisierter Regressionskoeffizient
Kursiv gekennzeichnete Parameter wurden nicht in die multiple Regressionsgleichung aufgenommen.

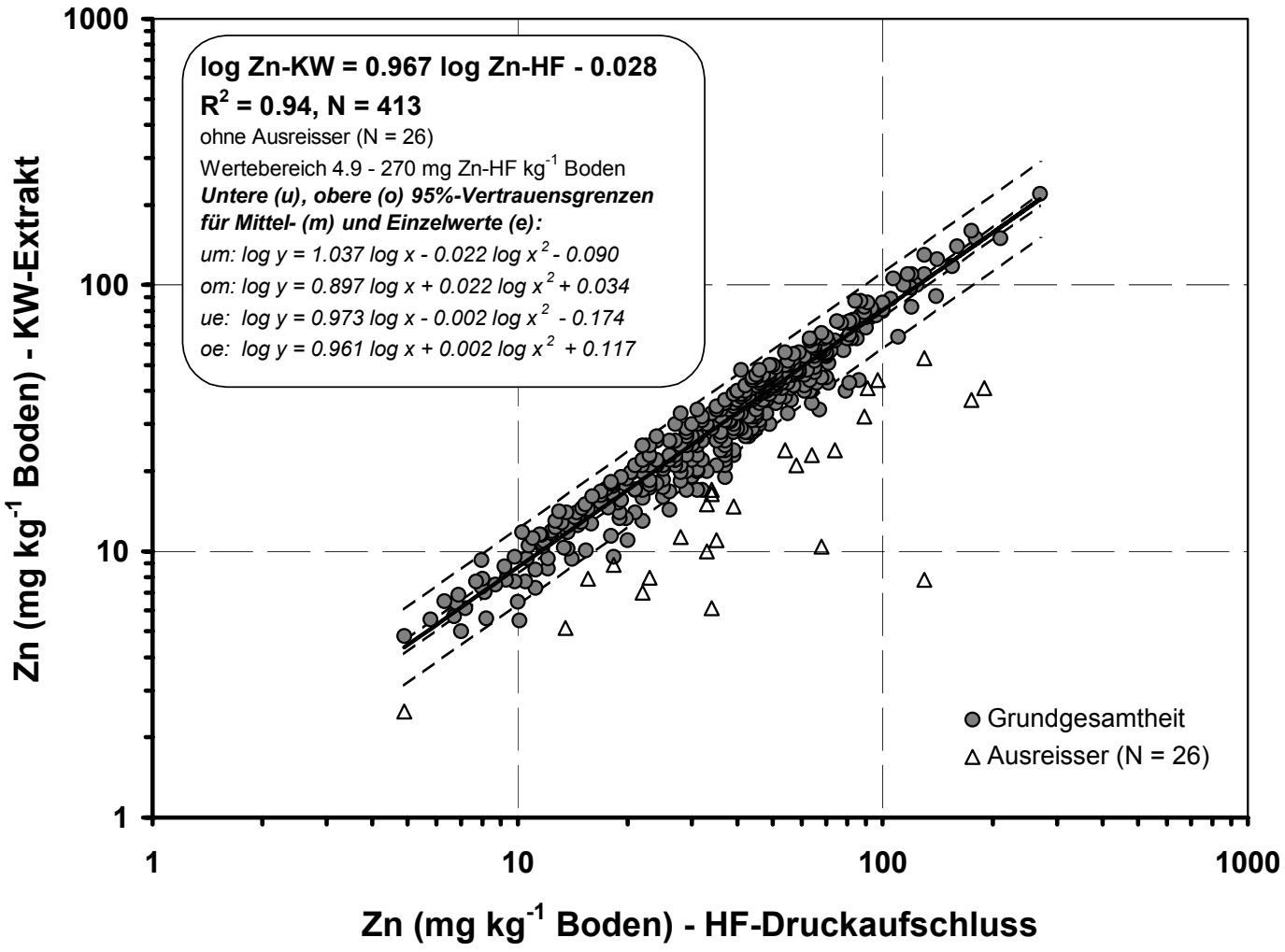


Abbildung 8a: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Zn-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss) und Königswasser-(KW)extrahierbaren Zn-Gehalten

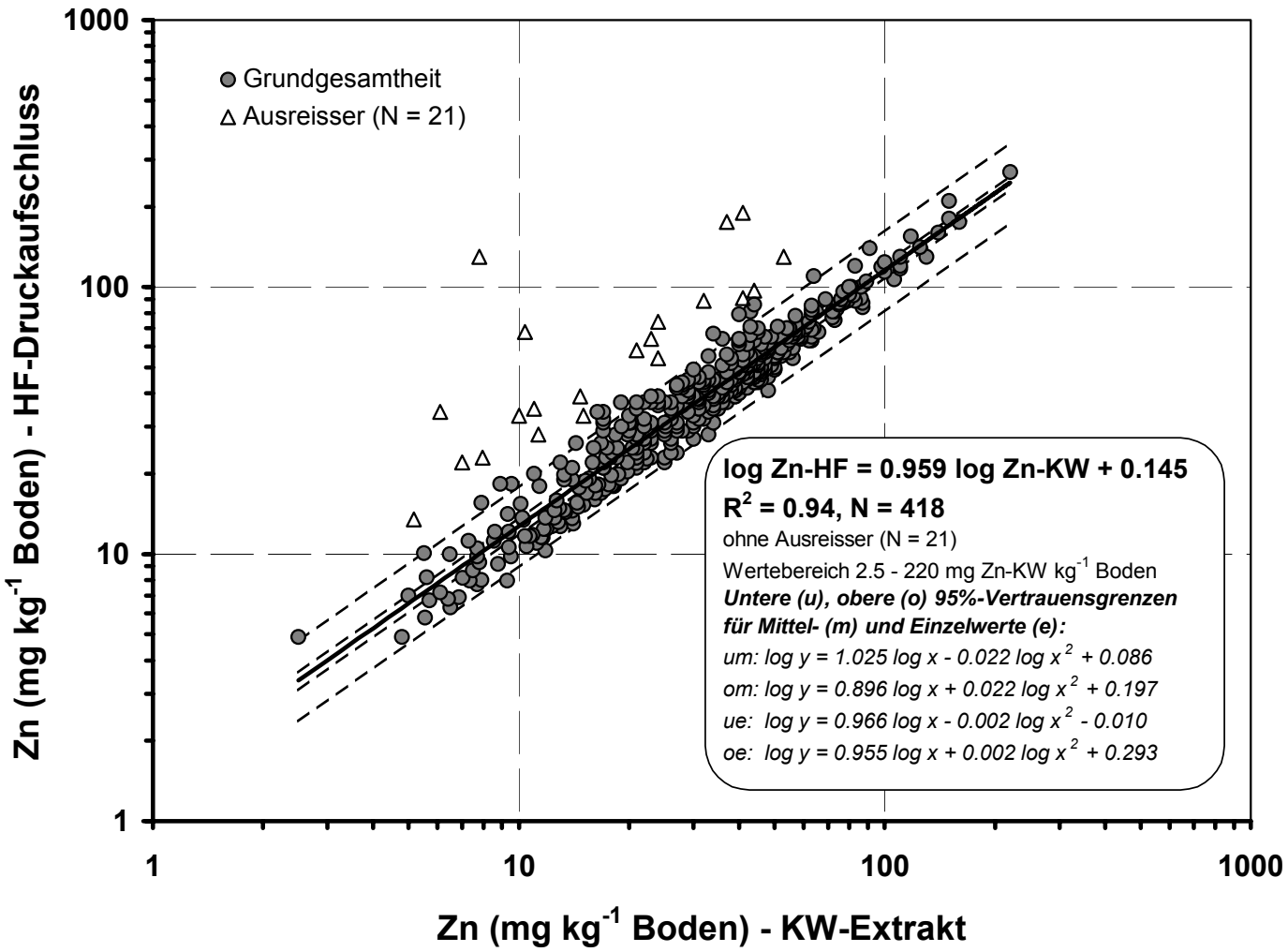


Abbildung 8b: Regressionsgerade und 95% Vertrauensintervalle für die Schätzung des Mittelwertes und der Einzelwerte für den Vergleich zwischen Königswasser-(KW)extrahierbaren Zn-Gehalten und Zn-Totalgehalten (HF-Druckaufschluss)

4 ABSCHLIESSENDE BETRACHTUNGEN

Die Königswasser extrahierbaren Anteile am Totalgehalt (HF-Druckaufschluss) variieren bei 20 untersuchten Elementen zwischen 23% bei Zinn (Sn) und 90% bei Quecksilber (Abb. 22 und Tab. 47). Die in der Literatur verwendete Bezeichnung "Gesamtgehalte" für KW-extrahierbare Gehalte ist deshalb irreführend.

In der Tendenz steigen mit zunehmendem KW-Anteil am Totalgehalt die Bestimmtsheitsmaße der Beziehungen (Abb. 22). Die sehr engen Korrelationen bei Cadmium (Cd), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Quecksilber (Hg), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Nickel (Ni) und Zink (Zn), mit Bestimmtheitsmaßen $\geq$ 93%, lassen sich vor allem auf die hohe Extraktionsausbeute des Königswassers mit 80 - 90% am Totalgehalt zurückführen.

In der Gruppe Arsen (As), Chrom (Cr), Beryllium (Be), Phosphor (P), Blei (Pb) und Vanadium (V) variieren die KW-Anteile zwischen 57% bei Cr und 71% bei As. Die Bestimmtheitsmaße der Beziehungen liegen zwischen 86% (Be, P) bzw. 88% (Pb) und 93% (Cr: 90%, V: 91%, As: 93%) und können auch in dieser Gruppe - zumindest für die Reihe Pb bis As - als eng bis sehr eng bezeichnet werden.

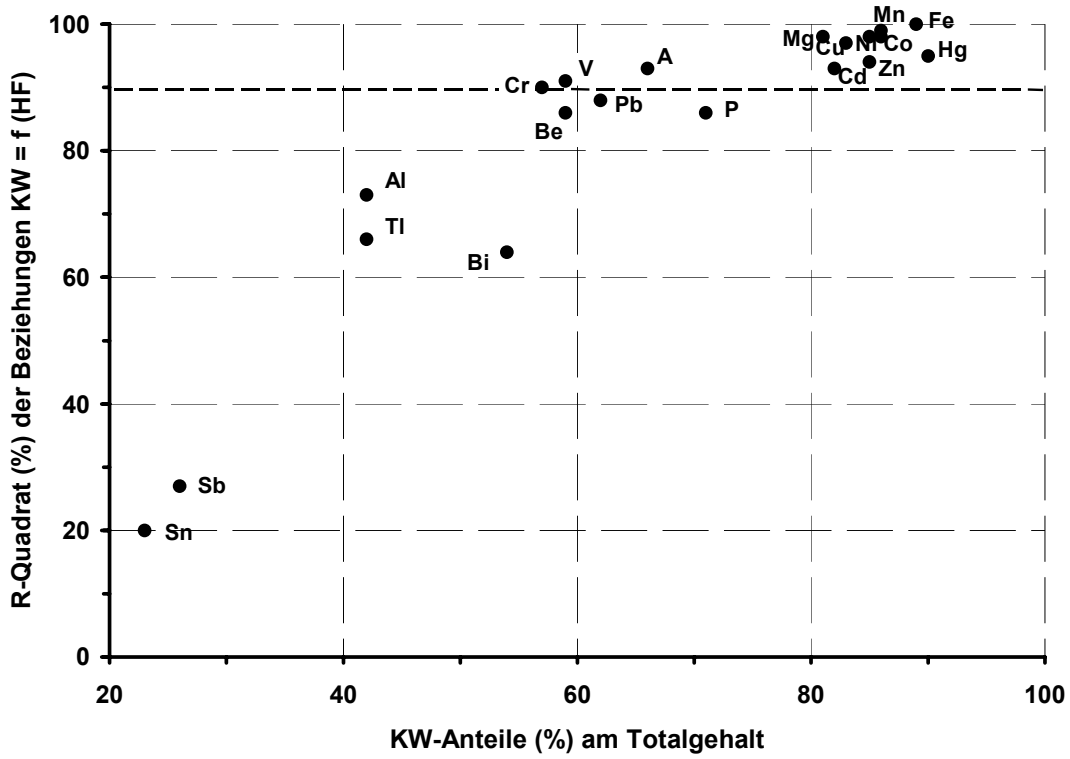


Abbildung 9: Bestimmtheitsmaße (R-Quadrat in %) der Beziehungen (Element-KW = f (Element-HF)) in Abhängigkeit von den KW-extrahierbaren Anteilen

Tabelle 27: Mittlere (xG) Königswasser extrahierbaren Anteile am Totalgehalt (HF-Druckaufschluss) der Elemente

Bodenarten-hauptgruppe	***Geometrisches Mittel der Königswasser-extrahierbaren Anteile am Totalgehalt***									
	Aluminium Al	**Antimon Sb**	**Arsen As**	**Beryllium Be**	**Blei Pb**	**Cadmium Cd**	**Chrom Cr**	**Eisen Fe**	**Kobalt Co**	**Kupfer Cu**
	N = 353	N = 354	N = 79	N = 347	N = 434	N = 321	N = 343	N = 344	N = 332	N = 407
Sand	35	23	65	53	53	84	61	87	85	80
Schluff	42	21	51	66	69	79	51	89	88	82
Lehm	53	25	61	58	69	82	58	91	85	83
Ton	55	20	48	70	82	82	49	90	77	81
gesamt	***42***	***23***	***66***	***59***	***63***	***82***	***57***	***89***	***86***	***83***
Bodenarten-hauptgruppe	**Magnesium Mg**	**Mangan Mn**	**Nickel Ni**	**Phosphor P**	**Quecksilber Hg**	**Thallium Th**	**Vanadium V**	**Wismut Bi**	**Zink Zn**	**Zinn Sn**
	N = 344	N = 336	N = 344	N = 281	N = 340	N = 320	N = 351	N = 275	N = 413	N = 354
Sand	81	82	87	70	89	43	65	61	85	23
Schluff	83	88	86	73	91	50	52	51	82	21
Lehm	82	89	84	70	89	42	59	49	81	25
Ton	77	92	83	71	87	41	50	50	81	20
gesamt	***81***	***86***	***85***	***71***	***90***	***42***	***59***	***54***	***85***	***23***

Als weitere Gruppe sind in Abbildung 22 die Elemente Aluminium (Al), Thallium (Tl) und bedingt auch Wismut (Bismut Bi) zu erkennen. Bei den überwiegend silikatisch gebundenen Elementen Aluminium und Thallium werden jeweils nur 42% (xG) der Totalgehalte durch Königswasser extrahiert. Gleichzeitig weisen die Beziehungen zwischen Al-KW und Al-HF bzw. Tl-KW und Tl-HF deutlich niedrigere Bestimmtheitsmaße mit R^2 = 73% und 66% auf. Ähnlich verhält es sich bei Wismut. Der geometrisch mittlere KW-Anteil am Totalgehalt liegt etwa höher, - bei 54%. Das Bestimmtheitsmaß für die Beziehung log Bi-KW = f (log Bi-HF) beträgt aber lediglich noch 64%.

Als letzte Gruppe werden Antimon (Sb) und Zinn (Sn) ausgemacht (Abb. 22). Beide Elemente stehen im Periodensystem in unmittelbarer Nachbarschaft in der 5. Periode und scheinen beide gegenüber Königswasser relativ beständig zu sein. Dabei ist zu beobachten, dass mit zunehmenden HF-Gehalten beider Elemente die KW-extrahierbaren Anteile jeweils stark abnehmen. (Abb. 3b und Abb. 21b). Vergleichbare Zusammenhänge können bei den übrigen Elementen in dieser Form nicht gezeigt werden. Im geometrischen Mittel werden lediglich 26% bei Sb und 23% bei Sn des Totalgehaltes durch Königswasser extrahiert. Angesichts der niedrigen Anteile stehen die Analysen beider Methoden - gemäß dem aufgezeigten Trend in Abbildung 22 - nur noch in loser Beziehung zueinander.

Die KW-extrahierbaren Gehalte bzw. Anteile werden im wesentlichen durch die Bindungsart der Elemente am Adsorbenten (adsorbtiv, spezifisch, okkludiert, kristallin) bestimmt. Diese ist sowohl abhängig von der Zusammensetzung des Adsorbenten als auch von der Neigung der Elemente bestimmte Bindungen einzugehen (*Herms und Brümmer*, 1978). Die Zusammensetzung der Böden wiederum wird bestimmt durch Ausgangsgestein, Nutzung, Klima und davon abhängigen Transformations- und Translokationsprozessen. In den meisten Fällen lassen sich diese Einflüsse auch durch wichtige Bodenkennwerte wie pH, Humus, Ton, Karbonat, KAK, Aluminium, Eisen und Mangan kennzeichnen.

Aus wissenschaftlicher Sicht macht es wenig Sinn, die für die Auswertungen verwendeten Böden hinsichtlich ihrer Ausgangsgesteine oder genetischen Entwicklung zu klassifizieren und auszuwerten, da die wichtigsten Bodenkennwerte auch in diesen Gruppen in einem jeweils breiten Spektrum auftreten. Auch handelt sich hierbei um Aggregationen unter dem Aspekt "Böden aus" und nicht um Gruppenbildungen von naturnahen Ausgangsgesteinen. Zudem ergibt sich aus diesem Ansatz eine zu große Anzahl an Regressionsgleichungen pro Element (vgl. *UTERMANN ET AL.,* 2000), was dazu führen kann, dass die Ergebnisse in der Praxis nicht mehr angenommen werden.

Es wird deutlich, dass die KW-extrahierbaren Anteile im wesentlichen durch die Bodenart mit seinem silikatischen Spektrum, die Fe-, Mn- und auch Al-Totalgehalte sowie die Kationenaustauschkapazität, die indirekt auch den Einfluss von pH-Wert und Tongehalt widergibt, geprägt werden. Für eine Reihe von Elementen ist zudem bekannt,

welche Fraktionen mit Königswasser oder vergleichbaren Säuregemischen erfasst werden (u. a. *Dües*, 1987; *Zeien und Brümmer,* 1989, 1991 u. a.).

Mit steigendem Anteil silikatischer (kristalliner) und wahrscheinlich auch sulfidischer Bindungsformen (z. B. Arsenkies FeAsS) nimmt der mit Königswasser extrahierbare Anteil ab. Zu welchen Anteilen und in welcher Form jedoch exakt diese für Königswasser nicht mehr zugänglichen Elementgehalte vorliegen ist nicht bekannt und könnte damit Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

5 ZUSAMMENFASSUNG

An 354 Bodenproben von Waldstandorten in Nordrhein-Westfalen wurden die Gesamtgehalte (HF : HNO_3 = 3 : 1) und die mit Königswasser (HCl : HNO_3 = 3 : 1) extrahierbaren Gehalte an Al, As, Be, Bi, Cd, Co Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sb, Sn, Tl, V und Zn untersucht. Zum Vergleich und zur Verbesserung der statistischen Sicherheit wurden zudem bei Cu, Ni, Pb und Zn bereits vorliegende Analysen von weiteren 85 Mineralbodenproben (84 Wald, 1 Gründland) in die Auswertungen einbezogen.

Mit dem Königswasser-(KW)extrakt werden im Vergleich zum Totalaufschluss durchschnittlich niedrigere Elementkonzentrationen erfasst, wobei der Anteil am Totalgehalt, je nach Element und Bodenartenhauptgruppe, zwischen 23% (Sb, Sn) und 90% (Hg) schwankt. Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Beziehungen zwischen KW-Extrakt und Totalaufschluss steigen mit zunehmendem KW-Anteil am Totalgehalt der Elemente. Für die Mehrheit der untersuchten Elemente bestehen sehr enge (As, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, Zn, V) und enge (Cr, Be, P, Pb) Zusammenhänge zwischen beiden Fraktionen. Für diese Elemente können die Total- und KW-extrahierbaren Gehalte ineinander umgerechnet werden. Bei einigen Elementen hingegen sind die Beziehungen schwächer ausgeprägt (Al, Bi, Tl) oder nicht vorhanden (Sb, Sn).

In multiplen Regressionsrechnungen erweisen sich vor allem der Fe- und Mn-Gesamtgehalt (bei Cr), die Kationenaustauschkapazität (bei Al und Be) und der Tongehalt der Böden (bei Pb und Zn) als weitere die Beziehungen zwischen dem KW- und Totalgehalt der Elemente bestimmende Einflussgrößen. Bei Arsen und Kupfer können mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse weitere Einflüsse der pH-H_2O-Werte plus Cu-Gesamtgehalte (bei As) sowie der Al-Gesamtgehalte der Böden (bei Cu) auf die Beziehungen festgestellt werden.

6 LITERATUR

ABFKLÄRV (1992): Klärschlammverordnung vom 15. April 1992; BGBl, Jg. 1992, Teil I, 912 - 930, Bonn.

BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998, BGBl, Jg. 1998, Teil 1, 502, Bonn.

BZE (1994): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald - Arbeitsanleitung, **2**: 92 - 94; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn.

DÜES, G. (1987): Untersuchungen zu den Bindungsformen und ökologisch wirksamen Fraktionen ausgewählter toxischer Schwermetalle in Ihrer Tiefenverteilung in Hamburger Böden. - Univ. Hamburg, FB Geowissenschaften.

HERMS, U. UND G. Brümmer (1978): Löslichkeit von Schwermetallen in Siedlungsabfällen und Böden in Abhängigkeit von pH-Wert, Redoxbedingungen und Stoffbestand. - Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges., **27**: 23 - 34; Oldenburg.

HORNBURG, V. (1996): Schwermetall-Gesamtgehalte in verschiedenen Böden nordrhein-westfälischer Naturräume. - Geol. Jb., **A 144**: 209 - 254, 13 Abb., 15 Tab.; Hannover.

HORNBURG, V. UND B. LÜER (1999): Vergleich zwischen Total- und königswasserextrahierbaren Elementgehalten in natürlichen Böden und Sedimenten. - J. Plant Nutr. Soil Sci., **162**: 131 - 137; Weinheim (Chemie).

LIEBE, F. (1999): Spurenlemente in Böden und Pflanzen Nordrhein-Westfalens - Gehalte verschiedener chemischer Fraktionen in Böden und deren Beziehung zur Bodenreaktion und den Gehalten in Pflanzen. - Bonner bodenkdl. Abh., **28**: 375 S., 206 Abb., 128 Tab.; Bonn.

LIEBE, F.; G. WELP UND G. W. BRÜMMER (1997): Mobilität anorganischer Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens. - Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, **2**: 383 S.; Landesumweltamt Essen.

UTERMANN, J.; O. DÜWEL, H.-E. GÄBLER UND R. HINDEL (2000): Beziehung zwischen Totalgehalten und königswasser-extrahierbaren Gehalten von Schwermetallen in Böden. - in: Bodenschutz Sonderdruck BoS 32. Lfg. XI/00: 36 S.; Erich Schmidt Verlag.

ZEIEN, H. UND G. W. BRÜMMER (1989): Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden. - Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges., **59**: 505 - 510; Oldenburg.

ZEIEN, H. UND G. W. BRÜMMER (1991): Ermittlung der Mobilität und Bindungsformen von Schwermetallen in Böden mittels sequentieller Extraktionen. - Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges., **66**: 439 - 442; Oldenburg.