

Schwermetalle in Auenböden der Vereinigten Mulde



Methodische Untersuchungen zur Ablagerung und räumlichen Verteilung von Schwermetallen in Auenböden der Vereinigten Mulde

Carolin Kaufmann-Boll, Maike Kern, Stefanie Niederschmidt, Michael Kastler, Tina Neef

Inhalt

1	Anlass und Ziel	10
2	Untersuchungsgebiet	10
3	Vorgehensweise und Methoden	12
4	Datengrundlagen	15
4.1	Stoffliche Bodenuntersuchungen	15
4.2	Karten.....	17
5	Testgebiete	20
6	Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte in Böden	22
6.1	Aufbereitung der Stoffdaten.....	22
6.2	Überlegungen zum Ausschluss von Stoffdaten	23
6.3	Arbeitskarten.....	28
6.4	Wirkung der Einflussfaktoren auf Stoffgehalte.....	32
6.4.1	Multivariate Statistik	33
6.4.2	Deskriptive Statistik.....	36
6.4.3	Schlussfolgerungen.....	41
6.5	Homogene Raumeinheiten.....	43
6.6	Ergebniskarten.....	51
6.6.1	Kennzeichnung von Raumeinheiten mit statistischen Kenngrößen	51
6.6.2	Interpolation in Raumeinheiten	53
6.6.3	Diskussion der Varianten „Kenngrößen“ und „Interpolation“	62
6.6.4	Ergänzende Hinweise zu Tiefenprofil und Flächennutzung	63
6.7	Bewertung der verdichtenden Bodenuntersuchungen	66
6.7.1	Auswirkungen auf die Charakterisierung der Raumeinheiten.....	67
6.7.2	Auswirkungen auf die Ergebniskarten der Interpolation	71
7	Übertragung auf die Gesamtau e.....	73
8	Fazit und Handlungsempfehlungen	76
9	Quellen	78
Anlagen	81
A 1	Bodenprofile.....	81
A 1.1	Lage der Schürfe.....	81
A 1.2	Bodenprofil PS_1_2019.....	82
A 1.2.1	Profilbeschreibung PS_1_2019:.....	83
A 1.2.2	Analytik:.....	83
A 1.2.3	Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:.....	85
A 1.3	Bodenprofil PS_2_2019.....	86
A 1.3.1	Profilbeschreibung PS_2_2019:.....	87
A 1.3.2	Analytik:.....	87
A 1.3.3	Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:.....	89
A 1.4	Bodenprofil PS_3_2019.....	90
A 1.4.1	Profilbeschreibung PS_3_2019:.....	91
A 1.4.2	Analytik:.....	91
A 1.4.3	Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:.....	93
A 1.5	Bodenprofil PS_4_2019.....	94

A 1.5.1	Profilbeschreibung PS_4_2019:.....	96
A 1.5.2	Analytik:.....	96
A 1.5.3	Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:.....	98
A 1.6	Bodenprofil PS_5_2019.....	99
A 1.6.1	Profilbeschreibung PS_5_2019:.....	100
A 1.6.2	Analytik:.....	100
A 1.6.3	Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:.....	102
A 1.7	Bodenprofil PS_6_2019.....	103
A 1.7.1	Profilbeschreibung PS_6_2019:.....	104
A 1.7.2	Analytik:.....	105
A 1.7.3	Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:.....	107
A 1.8	Bodenprofil PS_7_2019.....	108
A 1.8.1	Profilbeschreibung PS_7_2019:.....	109
A 1.8.2	Analytik:.....	109
A 1.9	Bodenprofil PS_8_2019.....	111
A 1.9.1	Profilbeschreibung PS_8_2019:.....	112
A 1.9.2	Analytik:.....	112
A 2	Klassifizierungs-Schemata für Stoffgehalte im Untersuchungsgebiet.....	114
A 3	Bewertung der Einflussfaktoren	115
A 4	Ergebniskarten mit statistischen Kenngrößen für Testgebiet Mitte	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes und der Testgebiete	11
Abbildung 2: Vorgehensweise.....	12
Abbildung 3: Darstellung der Kennwerte einer statistischen Verteilung in einem Box-Whisker-Plot.....	13
Abbildung 4: Cadmiumgehalte im Oberboden nach Untersuchungszeitpunkt ohne 2. Messkampagne 2019	25
Abbildung 5: Gegenüberstellung der Probenahmen 2000 in Transekten und 2003 im Raster im Hinblick auf die Arsenkonzentration im Oberboden.....	26
Abbildung 6: Stoffgehalte von Cadmium und Blei im Oberboden nach Untersuchungszeitpunkt vor und nach Hochwasserereignissen 2002 und 2013 (ohne 2. Messkampagne, Herbst 2019)	27
Abbildung 7: Arbeitskarte Deiche / Lage in der Aue vor und nach Anpassung	31
Abbildung 8: Beispiele für Arsengehalte in und außerhalb von Senken des Kleinreliefs im Testgebiet Nord.....	32
Abbildung 9: Anteil der erklärten Varianz bei unterschiedlichen Distanzen und Komponentenladungen für Arsen, Cadmium und Blei.....	34
Abbildung 10: Ausprägung der Komponenten für den Einflussfaktor Auenbereich.....	35
Abbildung 11: Einflussfaktor Altarmbereich nach BEAK 2018, aggregiert im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Cadmium im Oberboden.....	37
Abbildung 12: Einflussfaktor Anzahl Dämme/Lage in der Aue (Layer für Cadmium nach BEAK 2018, überarbeitet) im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Arsen im Oberboden	37
Abbildung 13: Einflussfaktor Flussabschnitte (basierend auf Auentyp nach KOENZEN 2005 bzw. BMU & BFN 2009 in Kombination mit den Einmündungen der Gewässer 1. Ordnung) im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Arsen im Oberboden.....	38
Abbildung 14: Korrelation der Cadmiumgehalte mit Corg-Gehalten im Oberboden an 15 Probenahmepunkten im Untersuchungsgebiet.....	38
Abbildung 15: Gering ausgeprägte Korrelation der Bleigehalte mit Tongehalten im Oberboden an 151 Probenahmepunkten in den drei Testgebieten	40
Abbildung 16: Vergleich der Arsengehalte in den Bodenartenklassen BK50 im Gesamtgebiet.....	40
Abbildung 17: RE-Modell 3.3 im Testgebiet Süd mit Werteverteilungen von Arsen und Cadmium im Oberboden	46
Abbildung 18: RE-Modell 3.3 im Testgebiet Mitte mit Werteverteilungen von Arsen und Cadmium im Oberboden	47
Abbildung 19: RE-Modell 3.3 im Testgebiet Nord mit Werteverteilungen von Arsen und Cadmium im Oberboden	48
Abbildung 20: RE-Modell 3.3 im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden	49
Abbildung 21: Varianten von Ergebniskarten mit statistischen Kenngrößen für Cadmium im Testgebiet Mitte.....	52
Abbildung 22: Ergebniskarte der Interpolation für Arsen in Testgebiet Mitte (RE-Modell 3.1 ohne Flussabschnitte, Faktor Altarmbereich).....	55
Abbildung 23: Ergebniskarte der Interpolation für Arsen in Testgebiet Süd (RE-Modell 3.1 ohne Flussabschnitte, Faktor Altarmbereich).....	56
Abbildung 24: Ergebniskarte der Interpolation für Cadmium in Testgebiet Mitte (RE-Modell 3.1 ohne Flussabschnitte, Faktor Altarmbereich).....	57
Abbildung 25: Ergebniskarte der Interpolation für Cadmium in Testgebiet Mitte (RE-Modell 3.2 ohne Flussabschnitte, Faktoren Altarmbereich/Dämme).....	58

Abbildung 26: Cadmiumgehalte in Oberböden in zwei vom Datenausschluss betroffenen Flächen in Testgebiet Nord und Testgebiet Mitte.....	60
Abbildung 27: Ergebniskarte der Interpolation für Cadmium in Testgebiet Mitte (in Raumeinheiten 3.2 ohne Flussabschnitte, Faktoren Altarmbereich/Dämme) und Ergebniskarte Bodenbelastung in HRE nach BEAK (2018).....	61
Abbildung 28: Raumeinheiten des RE-Modells 3.2 (Faktoren Flussabschnitt/Altarmbereich/ Dämme) mit in der Tiefe höher belasteten Untersuchungsstandorten (Arsen, Cadmium).....	64
Abbildung 29: Einordnung der Bodenuntersuchungen 2018/19 ins bestehende Messnetz anhand der Arsengehalte in Oberböden des Testgebietes Nord	67
Abbildung 30: Einordnung der Bodenuntersuchungen 2018/19 ins bestehende Messnetz anhand der Arsengehalte in Oberböden des Testgebietes Mitte	69
Abbildung 31: Einordnung der Bodenuntersuchungen 2018/19 ins bestehende Messnetz anhand der Arsengehalte in Oberböden des Testgebietes Süd.....	70
Abbildung 32: Ergebniskarten der Interpolation für zwei Raumeinheiten im Testgebiet Mitte ohne und mit ergänzenden Bodenuntersuchungen.....	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl von Standorten mit stofflichen Bodenuntersuchungen im Untersuchungsgebiet und in den Testgebieten.....	16
Tabelle 2: Schürfe im Untersuchungsgebiet.....	17
Tabelle 3: Eigenschaften der Testgebiete.....	20
Tabelle 4: Statistische Kenngrößen der Schadstoffgehalte im Untersuchungsgebiet (Altdaten, 1. und 2. Messkampagne nach Datenauswahl)	23
Tabelle 5: Anzahl von Probenahmepunkten im Untersuchungsgebiet mit Analytik Oberboden nach Nutzung	24
Tabelle 6: Potenzielle Einflussfaktoren für Schadstoffgehalte in Böden	28
Tabelle 7: Zusammenfassende Auswertung der Komponentenladungen für Einflussfaktoren.....	35
Tabelle 8: Schritte der Raumeinheitenbildung.....	44
Tabelle 9: Flächennutzung in den Raumeinheiten des Modells 3.3 im Gesamtgebiet.....	50
Tabelle 10: Teilflächen des Raumeinheitenmodells 3.3 im Gesamtgebiet.....	50
Tabelle 11: Statistische Kenngrößen für das finale Raumeinheitenmodell 3.3 im Gesamtgebiet.....	53
Tabelle 12: Homogene Raumeinheiten (HRE) (BEAK 2018, S. 60)	61
Tabelle 13: Anteil von in der Tiefe höher belasteten Untersuchungsstandorten je Raumeinheit des RE-Modells 3.2 ohne Flussabschnitte (Faktoren Altarmbereich/Dämme).....	65
Tabelle 14: Anteil von in der Tiefe höher belasteten Untersuchungsstandorten je Raumeinheit des RE-Modells 3.2 mit Flussabschnitten (Faktoren Flussabschnitt/Altarmbereich/Dämme).....	66
Tabelle 15: Statistische Kenngrößen für Arsen in Raumeinheiten des Testgebietes Nord vor und nach den Probenahme 2018/19.....	68
Tabelle 16: Statistische Kenngrößen für Arsen in Raumeinheiten des Testgebietes Mitte vor und nach den Probenahme 2018/19	69
Tabelle 17: Statistische Kenngrößen für Arsen in Raumeinheiten des Testgebietes Süd vor und nach den Probenahme 2018/19	71

Abkürzungsverzeichnis

A	Altarmbereich (Einflussfaktor)
A1	Flussnah (Gewässerbereiche und ufernahe Aue)
A2	Jüngste Altarmbereiche
A3	Am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche
A4	Ältere Altarmbereiche
Ac	Acker
As	Arsen
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AZB	Auenzustandsbericht
BDF	Bodendauerbeobachtungsfläche
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BK50	Bodenkarte 1:50.000
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Cd	Cadmium
C _{org}	organischer Kohlenstoff
D	Anzahl Dämme (Einflussfaktor)
D1	Kein Damm zum Fluss
D2	Mindestens ein Damm zum Fluss
DGM	Digitales Geländemodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
EW	Empfehlungswert
FIS	Fachinformationssystem
FSK	Forstliche Standorterkundung
GeoSN	Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen
GK25	Geologische Karte 1:25.000
GI	Grünland
GOK	Geländeoberkante
HQ	Hochwasser
HRE	Homogene Raumeinheiten nach BEAK (2018)
IQA	Interquartilsabstand
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
KW	Königswasseraufschluss
LABO	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LTV	Landestalsperrenverwaltung
MW	Maßnahmenwert
n	Anzahl
N	Nutzung
OTIEF	obere Horizontgrenze
P	Perzentil
Pb	Blei
pH	pH-Wert
PW	Prüfwert

Q	Flussabschnitt (Einflussfaktor)
Q1	Flussabschnitt „Auentyp Schotter/Grundgebirge vor Mündung Lossa“
Q2	Flussabschnitt „Auentyp Kies/Flach- und Hügelland vor Mündung Lossa“
Q3	Flussabschnitt „Auentyp Kies/Flach- und Hügelland nach Mündung Lossa bis Mündung Schwarzbach“
Q4	Flussabschnitt „Auentyp Kies/Flach- und Hügelland nach Mündung Schwarzbach“
SächsABG	Gesetz zur Abfallwirtschaft und zum Bodenschutz im Freistaat Sachsen
SN	Sachsen
UBODEN	Erfassungsprogramm für das Fachinformationssystem Boden UBODEN.net des LfULG
W	Wald

1 Anlass und Ziel

Die Auengebiete der Vereinigten Mulde sind Schwerpunkte stofflicher Belastung insbesondere mit anorganischen Schadstoffen sowohl geogenen als auch anthropogenen Ursprungs. Vorangegangene Untersuchungen (z. B. LFUG 2006, LFUG 2008, LFULG 2015, BEAK 2018) belegen eine Belastung der Auenböden v. a. mit Arsen sowie den Schwermetallen Cadmium und Blei. Schadstoffe in Böden von Flussauen sind im Allgemeinen kleinräumig sehr ungleich verteilt. Daher ist die flächenhafte Abbildung und Vorhersage von Belastungsmustern komplexer als in nicht überschwemmungsbeeinflussten Gebieten. Bisher eingesetzte Verfahren zur flächenhaften Abbildung von Bodenbelastungen lieferten bislang nicht die erwünschte kleinräumig differenzierte Auflösung. Hier setzt das Projekt „Methodische Untersuchungen zur Ablagerung und räumlichen Verteilung von Schwermetallen in Auenböden der Vereinigten Mulde“ an. Mit Hilfe weiterführender Auswertungen und verdichtender Bodenuntersuchungen soll die Charakterisierung und Darstellung der räumlichen Verteilung der Schadstoffbelastung verbessert werden. Dazu werden in drei Testgebieten Sedimentationsszenarien für Schwermetalle in Auenböden entwickelt und es wird ein Methodenvergleich der flächenhaften Darstellung der Schwermetallbelastung durchgeführt. Zu prüfen ist, ob und wo neue Bodenuntersuchungen, die das vorhandene Messnetz weiter verdichten, im Gebiet einen Erkenntnisgewinn liefern bzw. zu einer besseren flächenhaften Abbildung der Bodenbelastungen führen. Ein wichtiger Ausgangspunkt für die Untersuchungen sind die Ergebnisse von BEAK (2018), die im Auftrag der Landesdirektion Sachsen (Dienststelle Chemnitz) zur Erstellung des digitalen Kartenwerks für die Festlegung eines Bodenplanungsgebietes gemäß § 9 SächsABG im Überschwemmungsgebiet der Vereinigten Mulde vorgelegt wurden.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Aue der Vereinigten Mulde innerhalb der festgelegten Außengrenze des Bodenplanungsgebietes „Überschwemmungsgebiet Vereinigte Mulde“. Die südliche Begrenzung des Untersuchungsgebietes liegt nahe der Orte Sermuth und Erlin, etwa auf Höhe des Zusammenflusses von Freiburger und Zwickauer Mulde. Im Nordwesten wird das Gebiet durch den Austritt der Vereinigten Mulde aus Sachsen nach Sachsen-Anhalt auf Höhe des Ortes Löbnitz begrenzt (siehe Abbildung 1). Der Abgrenzung im Flusslängsverlauf liegen im Wesentlichen die äußeren Umrisse des HQ500 sowie des Überschwemmungsereignisses 2013 zugrunde, mit einer Anpassung an den Böschungsfuß der Aue sowie an randliche Wald- und Siedlungsflächen (BEAK 2018). Das Untersuchungsgebiet weist eine Fläche von ca. 121 km² auf, ohne den zu Sachsen-Anhalt zählenden Bereich zwischen Bad Dübener Heide und Löbnitz.

Nach dem Zusammenfluss von Freiburger und Zwickauer Mulde durchfließt die Vereinigte Mulde die Ausläufer des Lösshügellandes sowie das nördlich vorgelagerte Tiefland. Das Einzugsgebiet der Vereinigten Mulde wird dominiert von känozoischen Sedimenten; seine geochemischen Verhältnisse werden jedoch stark durch die vom Bergbau geprägten Teileinzugsgebiete der Zwickauer und Freiburger Mulde bestimmt. Zwickauer und Freiburger Mulde bringen schwermetallreiche Sedimente und Wasser in das Gebiet der Vereinigten Mulde ein. Von größter Bedeutung sind hohe Belastungen der Böden mit Arsen, Cadmium und Blei, die sich besonders von der Freiburger Mulde auf die Vereinigte Mulde übertragen. Die direkten Nebenflüsse der Vereinigten Mulde mit vorwiegend schwermetallarmen Lockersedimenten im Einzugsbereich konnten keinen Verdünnungseffekt bewirken (LFUG 2006, LFUG 2008).

Die extrem hohen Gehalte von Arsen, Cadmium und Blei in den Auenböden der Vereinigten Mulde stehen in Zusammenhang mit den Schwermetallgehalten der Böden im Einzugsgebiet und der dortigen, Jahrhunderte währenden Bergbau-, Erzaufbereitungs- und Hüttentätigkeit (LFUG 2006, LFULG 2015). Des Weiteren verur-

sachten Abspülung und Verlagerung von Haldenmaterial sowie von schwermetallbelasteten Flusssedimenten im Freiburger Raumeine Verfrachtung bis in den Unterlauf der Vereinigten Mulde. Die Sedimentablagerungen aufgrund der Hochwasserereignisse der Jahre 2002 und 2013 wurden diesbezüglich eingehend untersucht und belegten einen großen Einfluss auf die Belastung der Böden mit anorganischen Schadstoffen. Aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung vor allem im morphologisch breiten Bereich der Aue nördlich von Wurzen besteht ein erheblicher Handlungsbedarf im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze (BEAK 2018).

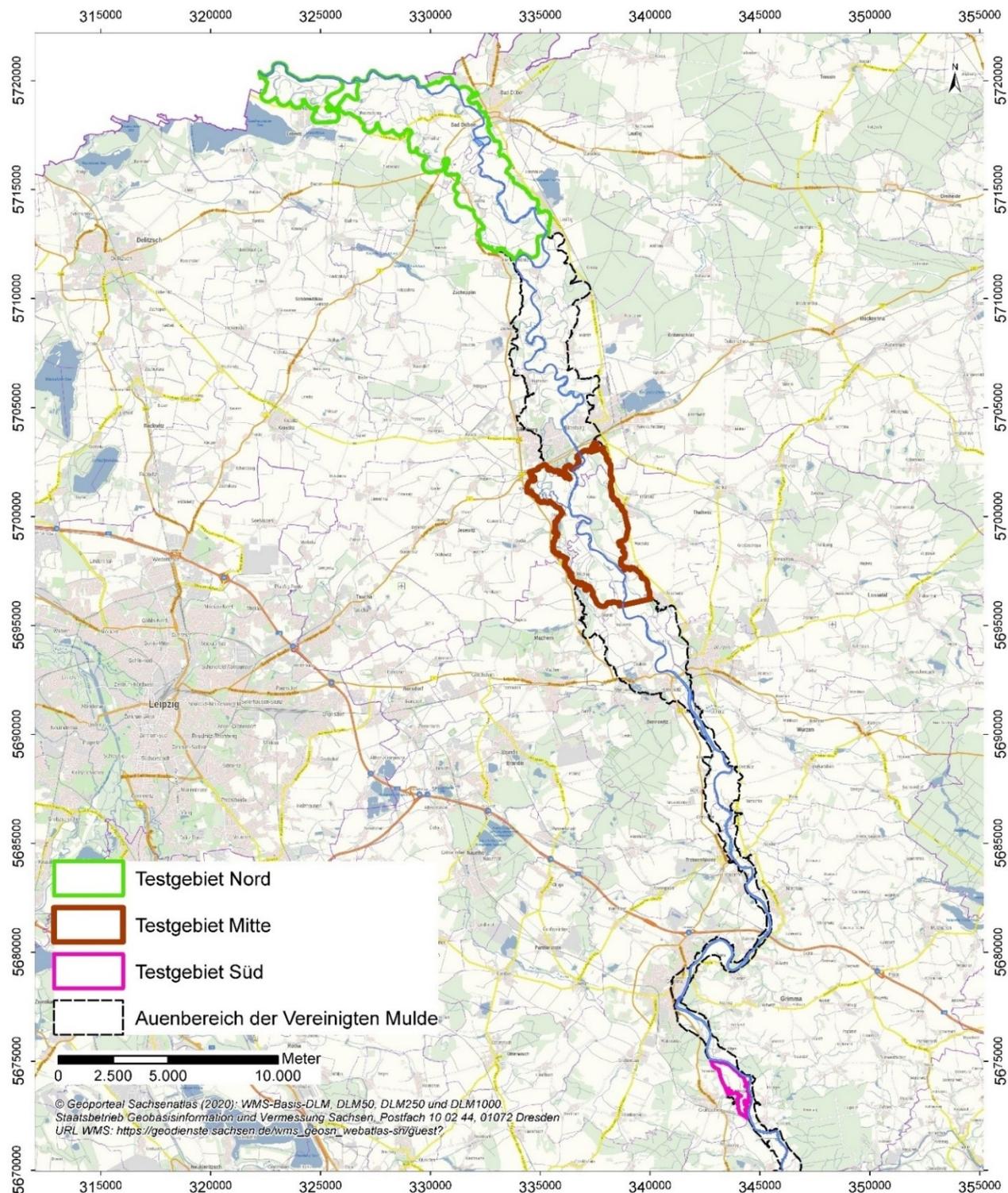


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes und der Testgebiete

3 Vorgehensweise und Methoden

Die Untersuchungen basieren auf den im Gebiet vorliegenden umfangreichen Daten und Informationen über Schadstoffbelastungen in Auenböden und deren Ursachen und knüpfen an die Vorarbeiten des LfULG und BEAK (2018) an. Aus der Erstellung des digitalen Kartenwerks für die Festlegung eines Bodenplanungsbereiches gemäß § 9 SächsABG im Überschwemmungsgebiet der Vereinigten Mulde liegen umfangreiche Daten und Erkenntnisse zu Einflussfaktoren für Bodenbelastungen und deren räumlicher Abgrenzung sowie zur Raumeinheitenbildung vor. Hier wurden bereits Belastungskarten mit geostatistischen Verfahren berechnet und in Teilflächen durch manuelle Digitalisierung angepasst.

Die verfolgte Vorgehensweise und die eingesetzten Methoden im aktuellen Projekt sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Das Vorgehen gliedert sich in die Grundlagenermittlung/vorbereitenden Arbeiten und in die Entwicklung des Vorhersagemodells für Stoffgehalte in den Böden der Testgebiete. An insgesamt 150 Messpunkten erfolgten verdichtende Bodenuntersuchungen mit bodenkundlicher Profilaufnahme und Probenentnahme. Zusätzlich wurden acht Profilgruben bodenkundlich charakterisiert und beprobt. Die Feldarbeiten wurden durch das Büro für Bodenwissenschaft, Dr. Falk Hieke, Freiberg, die chemische Analytik und Korngrößenanalysen durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft in Sachsen durchgeführt. In die hier durchgeführten Untersuchungen fließen Erkenntnisse aus anderen Auengebieten (z. B. LANUV NRW 2011, JAHN & KASTLER 2006, SPALTMANN 2017) sowie aus bundesweiten Arbeiten zur Kennzeichnung des stofflichen Bodenzustands in Auen (KASTLER ET AL. 2015, KASTLER ET AL. 2017) ein.

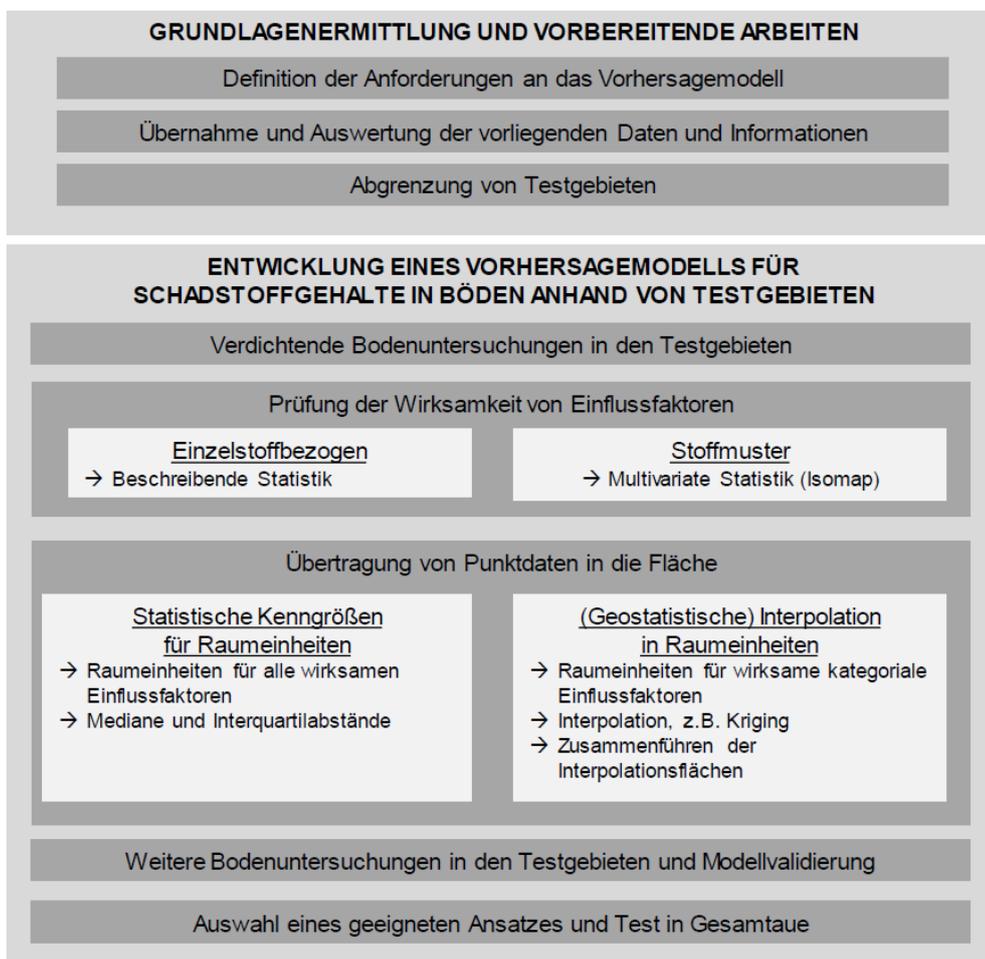


Abbildung 2:Vorgehensweise

Die Bearbeitung umfasste folgende Arbeitsschritte:

- Definition der Anforderungen an das Vorhersagemodell hinsichtlich des Maßstabs, abzubildender Zielgrößen sowie dem räumlichen und stofflichen Differenzierungsgrad
- Übernahme, Recherche und Eignungsbewertung vorliegender Daten und Informationen
- Abgrenzung von drei Testgebieten anhand der Kriterien Faktorenausprägung, Umfang Analysedaten und Repräsentativität für das Untersuchungsgebiet und Messnetzplanung in den Testgebieten für Bodenuntersuchungen
- Zwei Probenahmekampagnen im Herbst 2018 (100 Messpunkte) und im Herbst 2019 (50 Messpunkte)
- Untersuchungen zur Weiterentwicklung eines Vorhersagemodells für Schadstoffgehalte in Böden anhand von Testgebieten
- Aufbereitung des Datenbestands für Bodenuntersuchungen
- Erarbeitung von Sedimentationsszenarien in den Testgebieten anhand von Arbeitskarten für Einflussfaktoren und einem Raumeinheitenmodell
- Überprüfung der Szenarien anhand der Analyseergebnisse mit statistischer Auswertung zur Prüfung der Wirksamkeit von Einflussfaktoren und einer Übertragung von Punktdaten in die Fläche
- Anpassung der Sedimentationsszenarien und Methoden zur Bildung eines belastbaren Vorhersagemodells
- Einarbeitung weiterer Analyseergebnisse und Auswertung
- Erstellung von Ergebniskarten
- Übertragung der Ergebnisse auf die gesamte Aue
- Bewertung des Erkenntnisgewinns und Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Für die methodischen Untersuchungen wurden Verfahren der deskriptiven und multivariaten Statistik eingesetzt. Die Berechnungen erfolgten mit der Software R (R CORE TEAM 2019). Für die Darstellung der statistischen Verteilung von Messwerten werden Box-Whisker-Plots (Boxplots) verwendet (siehe z. B. Abbildung 3) und diese hinsichtlich der Wirkung von Einflussfaktoren interpretiert.

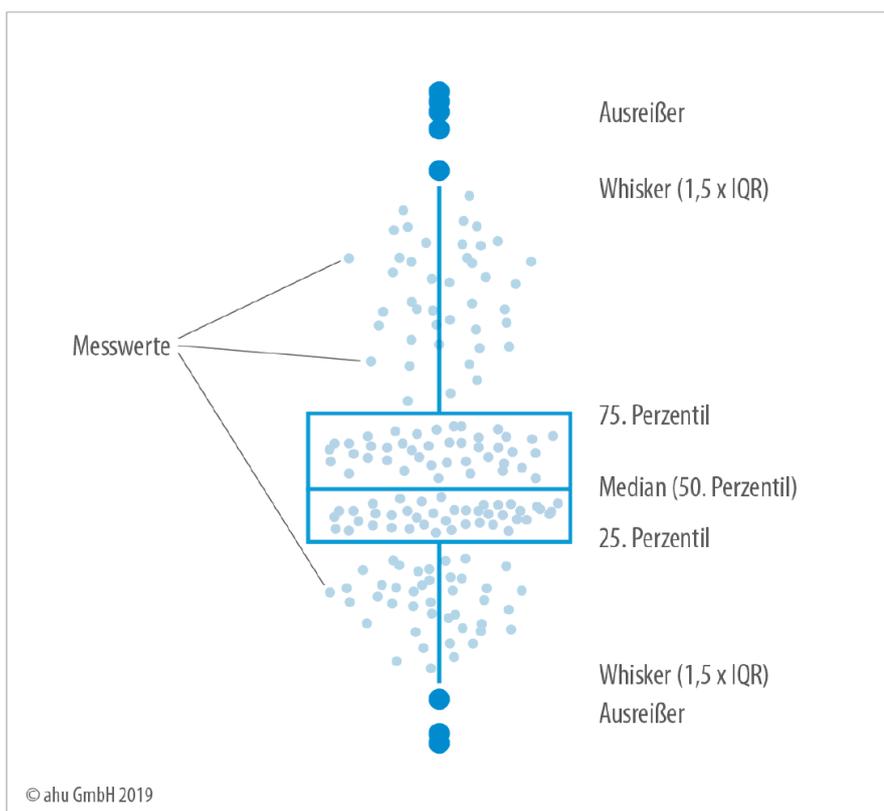


Abbildung 3: Darstellung der Kennwerte einer statistischen Verteilung in einem Box-Whisker-Plot

Die Beurteilung der Ähnlichkeit und der Unterschiede von Werteverteilungen erfolgte anhand von Boxplots und nur im Rahmen der multivariaten Statistik mittels Wilcoxon-Rangsummentest. Unterschiedliche Kennzeichnungen mit Kleinbuchstaben (a, b, c ...) im Boxplot deuten auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen hin.

Die Boxplots wurden automatisiert angefertigt. Die Farblegenden neben den Boxplots sind stets in umgekehrter Reihenfolgesortiert. Die Boxplots stellen auch Stichproben mit einer sehr geringen Anzahl von Werten dar, z. B. $n=1$ oder $n=2$. So ist erkennbar, für welchen Einflussfaktor nur wenige Daten vorliegen und wie die Einzelwerte charakterisiert sind. Die statistischen Kennwerte dieser kleinen Stichproben, die auch hier im Boxplot dargestellt werden, dürfen jedoch nicht interpretiert werden, sondern sind als Einzelwerte anzusehen.

4 Datengrundlagen

Für die methodischen Untersuchungen wurden Laboranalysen von Arsen, Cadmium und Blei im Boden sowie flächenhafte Karten in Form von digitalen Geodaten eingesetzt. Die Daten werden in ArcGIS-Geodatabases verwaltet und in einem GIS-Projekt mit Gruppen-Layern verarbeitet. Alle digitalen Daten liegen dem LfULG in Form eines GIS-Projekts vor.

4.1 Stoffliche Bodenuntersuchungen

Aus dem FIS Boden des LfULG liegen mit Stand vom 21.09.2018 innerhalb des Untersuchungsgebietes Standortdaten und Analytik für 3.705 Standorte mit Messwerten für Arsen, Blei und Cadmium vor. Die Untersuchungen fanden vorrangig auf Acker- und Grünlandflächen statt; es sind aber in kleiner Anzahl auch Forst und siedlungstypische Nutzungen vertreten. An den Standorten liegen Analysenergebnisse für mindestens einen Horizont vor. Die maximale Beprobungstiefe liegt bei 80 cm unter GOK. Proben aus humosen Oberböden, die nach bestimmten nutzungsabhängigen Entnahmetiefe ausgewählt wurden (vgl. Kap. 6.1), liegen aus dem FIS Boden an 3.240 Standorten vor (siehe Tabelle 1).

Im Zuge der Messnetzplanung für die erste Probenahmekampagne im Herbst 2018 (17.10.-26.10.2018) wurden 100 zusätzliche Probenahmepunkte auf drei Testgebiete verteilt (siehe Tabelle 1). Für die Testgebiete Mitte und Nord erfolgte die Festlegung der Punkte mit den Zielen einer Verdichtung des Messnetzes bzw. Schließen von Lücken zur vollständigen Abbildung potenzieller Einflussfaktoren/Raumeinheiten und einer Validierung vorhandener Messpunkte/Informationen über Schadstoffgehalte. Die Dichte vorhandener Messpunkte war mit 31 Punkten (Mitte) bzw. 35 Punkten (Nord) je km² bereits hoch, sodass eine signifikante Erhöhung der Gesamt-Probenanzahl in diesen Testgebieten nicht das Ziel der ergänzenden Untersuchungen war. Als Kriterien zur Festlegung der Messpunkte wurden besonders die Ausprägungen der Faktoren Auenbereich (Altaue und rezente Aue nach BfN), Flächennutzung (Acker und Grünland; auf Basis ATKIS und Luftbildern), Relief (Kuppen und Senken; nach DGM2) und Überflutungseinfluss (HQ25, HQ50 und Höhe über dem Fluss) berücksichtigt. Die Festlegung der Messpunkte im Testgebiet Süd erfolgte schematisch anhand eines Rasters, welches sich an Ackerschlägen, Wegeführung und Auenrelief orientierte. Das Ziel der ergänzenden Untersuchungen im Testgebiet Süd war eine Erhöhung der Probenzahl für eine ausgewählte Fläche unter Ackernutzung zur Erklärung und Überprüfung vorliegender Schadstoffmuster.

Im Herbst 2019 (16.10.-18.11.2019) fand eine zweite Probenahmekampagne mit 50 Punkten in den Testgebieten Nord und Mitte auf Acker- und Grünlandflächen statt. Ziel der zweiten Kampagne war die Überprüfung von Arbeitshypothesen, die nach einer ersten Datenauswertung entwickelt wurden. Dazu zählt die Annahme, dass in Senken des Mikroreliefs höhere Schadstoffgehalte vorgefunden werden als im Umfeld. Weiterhin wurde geprüft, ob die in länger zurückliegenden Untersuchungskampagnen beobachteten hohen Schadstoffgehalte in tiefer unter der Geländeoberfläche liegenden Bodenhorizonten gegenüber oberflächennahen Horizonten durch die aktuellen Analysen bestätigt werden. Weitere Aspekte waren die Belastbarkeit von Messergebnissen aus Oberböden aus länger zurückliegenden Untersuchungskampagnen, z. B. innerhalb von Transekten, und die Prüfung von Raumeinheiten-Grenzen.

Im Rahmen der beiden Probenahmekampagnen in 2018 und 2019 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Anlegen einer Profilgrube bis 60 cm Tiefe mit Entnahme einer repräsentativen Probe aus dem Oberboden zur Untersuchung auf anorganische und organische Parameter, Entnahme jeweils einer weiteren Probe aus dem Oberboden bei Vorliegen eines Substratwechsels innerhalb des Horizonts sowie Entnahme einer repräsentativen Probe aus dem Unterboden zur Untersuchung auf anorganische Parameter
- Ergänzende Bohrung mittels Peilstange bis zu 2 m Tiefe
- Bodenkundliche Profilbeschreibung nach KA 5 in analogen Formblättern und UBODEN
- Fotodokumentation von Standort und Profil.

Insgesamt stehen damit Analysenergebnisse für 3.391 Standorte zur Verfügung (siehe Tabelle 1). Alle Proben (257 aus Kampagne 1 und 134 Proben aus Kampagne 2) wurden tabellarisch erfasst und der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft zur Analytik übergeben, die Profilaufnahmen und Analyseergebnisse wurden in das FIS Boden und in die Projektdatenbank aufgenommen.

Tabelle 1: Anzahl von Standorten mit stofflichen Bodenuntersuchungen im Untersuchungsgebiet und in den Testgebieten

	FIS Boden 09/2018		FIS Boden 09/2018 mit Analytik As, Pb, Cd im Oberboden nach Definition LABO (2017)		Ergänzende Probenahmen 2018/19*		Gesamt mit Analytik As, Pb, Cd im Oberboden nach Definition LABO (2017)	
Untersuchungsgebiet	3.705	Ac: 2.145 Gl: 1.171 W: 79 Sonst.: 310	3.240	Ac: 2.134 Gl: 870 W: 66 Sonst.: 170	151	Ac: 68 Gl: 81 Sonst.: 2	3.391	Ac: 2.202 Gl: 951 W: 66 Sonst.: 172
Testgebiet Süd	21	Ac: 18 Gl: 3	19	Ac: 17 Gl: 2	37	Ac: 37 Gl: 0	56	Ac: 54 Gl: 2
Testgebiet Mitte	650	Ac: 264 Gl: 317 W: 22 Sonst.: 47	511	Ac: 264 Gl: 213 W: 19 Sonst.: 15	54	Ac: 12 Gl: 40 Sonst.: 2	565	Ac: 276 Gl: 253 W: 19 Sonst.: 17
Testgebiet Nord	1.216	Ac: 952 Gl: 277 W: 19 Sonst.: 68	1.189	Ac: 950 Gl: 183 W: 15 Sonst.: 41	60	Ac: 19 Gl: 41	1.249	Ac: 969 Gl: 224 W: 15 Sonst.: 41

- * 1. Kampagne 2018: 97 Punkte mit aufbereiteten Messergebnissen (in der Aufbereitung sind aus technischen Gründen 3 Aufschlüsse entfallen)
 2. Kampagne 2019: 50 Punkte und 4 Schürfe mit aufbereiteten Messergebnissen (ausschließlich Testgebiet Nord und Testgebiet Mitte)
 Ac = Acker, Ackerbrache, Gl = Grünlandfläche, allg., Weide, Dauergrünland, naturnah (Wiese);
 W = Forst allg., Naturwaldparzelle; Sonst. = Sonstige Nutzungen: Brachfläche, allg., Brach- und Ödland, Sumpfbereiche, Sonderkulturen, Naturschutzgebiete, Kleingartenanlagen, Hausgarten, Gartenland, Kinderspielfläche (Spielplatz), Park-/Grünanlage, Sportanlage, städtisch geprägte Fläche, Siedlung, Dorfanlage

Bei der Probenentnahme 2018 hat sich gezeigt, dass die Entnahme je einer Probe aus dem Ober- und Unterboden bei einer maximalen Entnahmetiefe von ca. 60 cm die komplexe Ablagerung der kleinräumig wechselnden Auensedimente z. T. unzureichend abbildet. Daher wurden in den Testgebieten Mitte und Nord zusätzlich acht Schurfgruben mit einer Teufe bis max. 2 m angelegt (siehe Tabelle 2 und Anlage A 1), nach den Vorgaben der KA 5 dokumentiert und horizontbezogen in ca. 20 cm-Intervallen beprobt (gestört und ungestört). Die Analyseergebnisse von vier Schürfen lagen rechtzeitig vor und konnten mit in die Auswertung einbezogen werden (vgl. Tabelle 2). Die Schürfe sind flächenrepräsentativ sowohl in Hinblick auf die ausgewählten Testgebiete als auch auf die Einheiten der BK50 Sachsen. Zur Standortwahl wurden in den Testgebieten die vorhandenen Bodenuntersuchungen, BK50, GK25, Bodenschätzung und Forstliche Standorterkundung (FSK) ausgewertet.

Tabelle 2: Schürfe im Untersuchungsgebiet

Profil	Lage in der Aue	Nutzung	Untersuchungsgrund	Bemerkungen
PS_1_2019*	Rezente Aue	Acker, Brache	Bodengenese und Stoffe	Untersuchung des jetzigen Zustands
PS_2_2019*	Altaue	Acker	Bodengenese	Untersuchung des jetzigen Zustands
PS_3_2019	Altaue	Grünland, Acker	Bodengenese	Wölbacker (Scheitel)
PS_4_2019	Rezente Aue	Grünland	Bodengenese und Stoffe	Normvega
PS_5_2019	Rezente Aue	Grünland	Bodengenese	Normvega
PS_6_2019	Altaue	Forst	Bodengenese	Nutzungsänderung von Wald zu Acker
PS_7_2019*	Rezente Aue	Acker	Bodengenese und Stoffe	Neuer Schurf in diesem Gebiet
PS_8_2019*	Altaue	Acker	Bodengenese und Stoffe	Neuer Schurf in diesem Gebiet

* Profil wurde in der Auswertung berücksichtigt.

Weitere Parameter zur Charakterisierung der Bindungseigenschaften für Schadstoffe (Bodenart, C_{org} , pH) wurden an den Proben von rund 150 Standorten der 1. und 2. Messkampagne untersucht.

4.2 Karten

Geodaten zu Topographie und Überschwemmungseinfluss im Untersuchungsgebiet liegen vor. Außerdem wurde auf das GIS-Projekt der Untersuchungen von BEAK (2018) zurückgegriffen, welches u. a. bereits definierte Einflussfaktoren der Schadstoffbelastung sowie deren Kombination in Homogenen Raumeinheiten (HRE) enthält. Von BEAK wurden 2018 folgende Faktoren geprüft:

Dämme in der Aue → sehr sensitiv

Altarmbereiche¹ → sehr sensitiv

Höhe über dem Fluss → sensitiv

Flächennutzung → sensitiv

Flächennutzung und Dämme → sehr sensitiv; Homogene Raumeinheiten (HRE)

Bodensubtyp → gering sensitiv

Flussgefälle → gering sensitiv

¹ Die Karte „Altarmbereiche“ gliedert die gesamte Flussaue unter Berücksichtigung der zahlreichen Altarme und deren Relikte, die sich im Relief nachzeichnen. An die „Gewässerbereiche“ (Wasserflächen) im Hauptlauf der Vereinigten Mulde schließen sich zunächst Flächen der „ufernahen Aue“ mit einer Querausdehnung von ca. 100 bis max. 700 m an, die stets in der rezenten Aue liegen. An diese grenzen die „jüngsten Altarmbereiche“ an, die meist – aber nicht an allen Stellen – innerhalb des rezenten Überflutungsbereichs liegen. Einige Flächen der „jüngsten Altarmbereiche“ liegen auch hinter dem ersten Damm/ Deich in der Altaue. An die jüngsten Altarmbereiche schließen sich nach außen hin Altarmbereiche an, die „am weitesten vom Fluss entfernt“ liegen und schließlich am Außenrand der Aue die „älteren Altarmbereiche“. Diese beiden Einheiten liegen zumeist in der Altaue außerhalb des rezenten Überflutungsbereichs. Die Teilflächen der Altarmbereiche liegen nicht stets in gleicher Höhe über dem Fluss; an einigen Stellen zeichnen ihre Grenzen aber die Flussterrassen nach – dies ist insbesondere im südlichen, schmaleren Teil der Aue südlich von Wurzen der Fall.

Zur Abbildung des Flussgefälles wurde die Flussaue nach vorhandenen Querbauwerken und Ortschaften gegliedert. Im Abschlussbericht wurde festgehalten, dass es keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem Flussgefälle und den Stoffgehalten in der Aue gibt. Die Bodensubtypen nach BK50 wurden ebenfalls geprüft und „[...] weisen eine geringe Sensitivität zu den Elementgehalten in der Aue auf.“ (BEAK 2018, S. 50), wobei sich die regelmäßig überschwemmten Böden (Paternien, Vegen) mit einer höheren Variabilität der Schwermetallgehalte von den selten überschwemmten Böden (Gleye, Pseudogleye, Parabraunerden) unterscheiden. Der Maßstab der Bodenkarte BK50 ist mit 1:50.000 nur bedingt für die Raumeinheitenbildung in der Flussaue geeignet. Die Einflussfaktoren Flussgefälle und Bodensubtypen wurden im aktuellen Projekt nicht weiter untersucht.

Nach der Übernahme der Daten erfolgte die Bewertung der Differenzierung der im Untersuchungsgebiet potenziell wirksamen Einflussfaktoren für die räumliche Verteilung von Schadstoffen in der Aue. Die Bewertung wurde getrennt für zwei Abschnitte des Untersuchungsgebietes durchgeführt: für den südlichen Teil mit einer vergleichsweise geringen Breite der Aue von ca. 300 bis etwa 1.600 m (Sermuth bis Wurzen, Flusskilometer 0 bis 33²) und für einen nördlichen Teil mit deutlich breiterem Auenbereich mit einer Breite von ca. 2.200 bis 3.700 m (Wurzen bis Löbnitz, Flusskilometer 33 bis 92).

Folgende flächenhafte Einflussfaktoren wurden berücksichtigt:

- Lage in der Altaue oder in der rezenten Aue (Auenbereich)
- Überflutungshäufigkeit
- Bodenartenklasse nach BK50
- Bodeneigenschaften gemäß Bodenschätzung³
- Flächennutzung
- Schadstoffquellen/potenzielle Einleiter aus Industrie, Gewerbe, Siedlung
- Altlasten und Altablagerungen, Aufschüttungen und Abgrabungen
- Dämme/Deiche
- Altarme, historischer Gewässerumbau
- stoffliche Situation im Einzugsgebiet von Zuflüssen
- Systematik des Auengewässers und hydromorphologische Gliederung
- Hydrologie (Durchflussvariabilität)
- Segmentierung nach Vorflutern.

Die für die räumliche Darstellung der Einflussfaktoren verwendeten Datengrundlagen sind im Quellenverzeichnis dokumentiert.

² Es wurde eine Definition der Flusskilometer im Untersuchungsgebiet vorgenommen, beginnend mit km 0 am Zusammenfluss von Zwickauer und Freiburger Mulde. Auf Basis der Gewässerstrukturkarte wurde der Gewässerlauf bis zur Landesgrenze Sachsen/Sachsen-Anhalt bei Löbnitz in Fließrichtung in Abschnitte von 3 km Länge eingeteilt. Daraus ergibt sich eine vom Untersuchungsgebiet abgedeckte Flusslänge von rund 92 Kilometern.

³ Bodenart, Anteil abschlämbarer Teilchen (tonige Bestandteile: Ton + Feinschluff + 50 % Mittelschluff), Kulturart (Nutzung), Entstehung (Ausgangssubstrat Ackerböden), Boden- und Zustandsstufe (Humusgehalt, Durchwurzelung, für Acker: auch Steingehalt) sowie Humusgehalt (Angabe der Grablöcher wurde für die Schätzflächen verwendet)

Für die Beurteilung der Differenzierung und Abbildbarkeit von Schadstoffgehalten wurden die Kriterien Messpunktdichte sowie Stoffgehalte von Arsen, Cadmium und Blei beurteilt. Im ersten Schritt zeigte sich, dass v. a. die Einflussfaktoren Auenbereich (Lage in rezenter Aue/Altaue), Überflutungshäufigkeit (Intensitäts- und Gefährdungsklasse nach HQ25 und HQ50) und Flächennutzung hinsichtlich ihrer Differenzierung und Abbildbarkeit im Untersuchungsgebiet relevant sind. Andere Faktoren, wie z. B. Auentypologie oder stoffliche Situation im Einzugsgebiet von Zuflüssen, werden hingegen im Untersuchungsgebiet nicht durch vorliegende Geodaten in geeigneter Weise abgebildet.

Untersuchungen zum Einfluss der Lage von Standorten im Bereich von Gleit- und Prallhängen auf die Höhe der Gehalte von Schadstoffen in Böden haben ergeben, dass meist eine Überlagerung mit anderen Faktoren – insbesondere der Höhenlage über der mittleren Höhe des Gewässerspiegels – gegeben ist (KASTLER ET AL. 2015, KASTLER ET AL. 2017). Zudem zeigte sich in diesen bundesweiten Betrachtungen am Beispiel von zwei Flussabschnitten mit Längen von ca. 10-20 km, dass automatisierte Ansätze für eine Abgrenzung von Flächen, die entweder Gleit- oder Prallhängen zuzuordnen sind (z. B. anhand von Flächengrößen von Auensegmenten rechts/links der Gewässermittellinie), schwierig umzusetzen sind und in hohem Maße manuelle Nacharbeiten erfordern. Da entsprechende Zuordnungen nicht systematisch reproduzierbar sind (z. B. Umgang mit Nebengerinnen) und insbesondere bei einer Übertragung auf die gesamte Aue der Vereinigten Mulde einen sehr hohen Aufwand erfordern würden, erfolgten hier keine entsprechenden Auswertungen zur flächenhaften Abgrenzung von Gleit- und Prallhängen und zur Zuordnung von Bodenuntersuchungspunkten zu diesen Flächen.

5 Testgebiete

Für die vertiefenden methodischen Untersuchungen zur Schwermetallverteilung der Böden wurden drei Testgebiete ausgewählt. Bei einer Gesamtlängelänge von 92 km innerhalb des Untersuchungsgebietes sollten durch die Testgebiete mindestens 20 % der Fließlänge der Vereinigten Mulde (entsprechend > 9 km) abgedeckt werden, verteilt auf den Südteil mit ca. einem Drittel (> 6 km) und den Nordteil mit zwei Dritteln (> 13 km). Die Eignung der Testgebiete wurde anhand folgender Kriterien geprüft:

- Vorkommen von Acker- und Grünlandflächen (Untersuchungsschwerpunkt), von rezenter und Altaue, von unterschiedlicher Auenmorphologie (Gleit- und Prallhänge), von einmündenden Vorflutern (Gewässer I. Ordnung): Lossa und Schwarzbach sowie von Altarmen (insbes. Nord-Teil)
- keine maßgeblichen Flächenanteile mit Siedlungen
- Differenzierung der Geodaten zum Überflutungseinfluss (insbes. HQ25, HQ50, Höhe über Fluss)
- Differenzierung von Schadstoffgehalten an vorhandenen Untersuchungspunkten (exemplarisch für Arsen)
- Anzahl vorhandener Untersuchungspunkte im Verhältnis zur Testgebietsgröße.

Anhand mehrerer Optionen erfolgte die Auswahl von drei Testgebieten, eines im südlichen und zwei im nördlichen Auenabschnitt (siehe Tabelle 3 und Abbildung 1). Die Abgrenzung der Testgebiete orientiert sich im Längsverlauf an der Außengrenze des Untersuchungsgebietes nach BEAK (2018) und im Auenquerschnitt an Nutzungsgrenzen (Flächennutzung nach ATKIS aus BEAK 2018).

Tabelle 3: Eigenschaften der Testgebiete

Testgebiet	Fluss-km	Ab-schnitts-länge	Fläche	Ort-schaften	Fläche nach Nutzung (ATKIS; ha)	Kurzbeschreibung/ Begründung der Auswahl
Süd	3,5 bis 7,5	ca. 4 km	170 ha	nord-östlich Großbothen	Ac: 170 Gl: 0 W: 0 Σ 170	geringe Ausdehnung der Aue geringe Anzahl vorliegender Bodenuntersuchungen vorhandene Abbildung von Raumeinheiten entspricht nicht der Ausprägung der Schadstoffgehalte vorhandener Punktdaten
Mitte	39 bis 49	10 km	2.039 ha	Nischwitz bis Eilenburg	Ac: 605 Gl: 947 W: 330 Σ 1.882	Abschnitte mit und ohne Eindeichung Übergang von schmaler zu breiter Aue dichtes Messnetz für Acker und Grünland vorhanden Differenzierung des DGM im Flussverlauf sowie kleinräumige Differenzierung im Flussquerschnitt heterogenes Schadstoffbild in rezenter Aue und Altaue Überflutungseinfluss (HQ25 und HQ50) auch in Altaue differenzierend

Test-ge-biet	Fluss-km	Ab-schnitts-länge	Fläche	Ort-schaften	Fläche nach Nutzung (ATKIS; ha)	Kurzbeschreibung/ Begründung der Auswahl
Nord	69 bis 92	23 km	3.698 ha	Laußig bis Löbnitz	Ac: 2.068 Gl: 1.080 W: 223 Σ 3.371	große Breite der Altaue dichtes Messnetz in Altaue, Verdichtungsbedarf in rezenter Aue heterogenes Schadstoffbild Nutzungsdifferenzierung in rezenter Aue und Altaue Differenzierung des DGM im Flussverlauf sowie kleinräumige Differenzierung auch im Flussquerschnitt Zufluss (Schwarzbach) vorhanden

Die Testgebiete unterscheiden sich jeweils hinsichtlich der Abschnittslänge und -fläche, der Breite der Aue, der Ausprägung von rezenter Aue und Altaue, der Anzahl vorhandener Probepunkte und Punktdichte, auch in Abhängigkeit von Nutzung und Auenbereich, der Nutzungsdifferenzierung und -anteile (Grünland und Acker), sowie der Ausprägung und Differenzierung der Schadstoffgehalte.

Gegenüber den Vorüberlegungen (> 20 % der Flusslänge) umfassen die Testgebiete insgesamt einen deutlich größeren Anteil der Flusslänge (ca. 40 %). Die Größe wurde gewählt, um eine ausreichend hohe Probenzahl für statistische Analysen in homogenen Raumeinheiten berücksichtigen zu können. Mit rund 20 km² und 37 km² sind die Flächen der Testgebiete Mitte und Nord besonders groß. Im Testgebiet Nord wurden ergänzende Bodenuntersuchungen nur in etwa der Hälfte des Testgebietes vorgenommen. Im Süd-Teil des Untersuchungsgebietes wurde die Testgebietsfläche in Abstimmung mit dem LfULG auf eine ausgewählte Ackerfläche mit variablen Schadstoffgehalten beschränkt. Auf dieser Fläche wird die Untersuchungsichte mit zusätzlichen Probenentnahmen erhöht. Der Süd-Teil des Untersuchungsgebietes südlich von Wurzen weist aufgrund des geringeren Schadstoffgehalts insgesamt eine geringe Probendichte der zuvor vorhandenen Untersuchungen auf.

6 Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte in Böden

Das auf Basis der Vorarbeiten weiterentwickelnde Vorhersagemodell sollte möglichst auf die gesamte Aue der vereinigten Mulde anwendbar sein. Unter Berücksichtigung der Sedimentations- und Anreicherungsmechanismen von Schwermetallen in Böden muss das Modell die Gehalte der Hauptbelastungsparameter Arsen, Blei und Cadmium in Oberböden abbilden und dabei robust gegenüber Ausreißern sein.

Auf der Grundlage der digitalen Darstellung der Einflussfaktoren wurden in den drei Testgebieten Szenarien für die Akkumulation und Erosion von Sedimenten auf Auenböden und der damit verbundenen Verlagerung von Schadstoffen entworfen. Dazu waren die im jeweiligen Testgebiet als potenziell relevanten raumeinheitenbildende Faktoren den anzunehmenden historisch stattgefundenen Akkumulations- und/oder Erosionsprozessen zuzuordnen. In homogenen Raumeinheiten lassen sich Erwartungshypothesen für Schadstoffanreicherungen aufstellen. Bereiche der rezenten Aue und Altaue werden dabei gesondert betrachtet.

Die Modellentwicklung erfolgte in mehreren Schritten. Sie basiert auf den 2018 vorhandenen Bodenuntersuchungen (Altdaten + 1. ergänzende Messkampagne) und beinhaltet eine Validierung der auf Basis des ersten Raumeinheitenmodells erwarteten Stoffgehalte anhand zusätzlicher Bodenuntersuchungen (2. Messkampagne). Ergebniskarten visualisieren die aus Punktdaten in der Fläche prognostizierten Stoffgehalte in Böden und werden wiederum anhand vorher ausgeschlossener Messdaten validiert.

6.1 Aufbereitung der Stoffdaten

Der in Kapitel 4.1 beschriebene Datenbestand aus den bereits vorliegenden Altdaten und den Ergebnissen der zwei neuen Messkampagnen 2018 und 2019 wurde wie folgt aufbereitet:

- Berechnung von benötigten Kenndaten der Bodenhorizonte (obere Horizontgrenze „OTIEF“, Horizontmächtigkeit) (Organischen Auflagehorizonten wurde kein OTIEF zugeordnet)
- Klassifizierung der Bodenhorizonte in „Oberboden“ und „nicht Oberboden“ Als Grundlage diente die Definition für Oberboden der LABO-Redaktionsgruppe (LABO 2017): Oberboden = oberste Mineralboden- und Moorhorizonte mit den Hauptsymbolen A, H, R oder M, deren Untergrenze für Ackernutzung, Garten- oder Sonderkulturen ≤ 30 cm beträgt und bei Grünland- oder Forstnutzung ≤ 10 cm beträgt. Liegen die Horizonte mit den obengenannten Hauptsymbolen mit 50 % ihrer Mächtigkeit oder mehr oberhalb der Untergrenze, werden diese als Oberbodenhorizonte klassifiziert.
- Aufbereitung der Eingangswerte für Auswertungen (Setzen auf Null bei unterschrittener Bestimmungsgrenze, Mittelwertbildung bei Parallelanalysen und Auswahl der aktuellsten Werte bei Wiederholungsbeobachtungen auf Bodendauerbeobachtungsflächen)
- Berechnung tiefengewichteter Mittelwerte für Stoffgehalte bei mehreren Oberbodenhorizonten
- Ausschreiben eines Geodatensatzes aus den aufbereiteten Daten.

Die Auswahl der Proben nach deren Entnahmetiefe wurde vorgenommen, um die in humosen Oberböden angereicherten Schadstoffe zu erfassen und Verdünnungseffekte aufgrund der Beprobung tieferliegender weniger humoser Horizonte zu vermeiden. Messdaten für Unterbodenhorizonte (G-, S-, B- und C-Horizonte) wurden somit nicht berücksichtigt. Ausgeschlossen wurden aber auch Messdaten für Standorte, an denen der Oberboden nicht nach den Tiefenkriterien nach LABO (2017) beprobt worden ist oder Tiefen im FIS Boden angegeben waren, die den Kriterien nicht entsprechen. Dazu gehören A-, H- und M-Horizonte unter Grünland oder Feuchtgebiet, die in einer Tiefe > 10 cm beprobt wurden, sowie A- und M-Horizonte unter Acker, die in einer Tiefe > 30 cm beprobt wurden. Von den aus diesen Gründen insgesamt 465 ausgeschlossenen Untersuchungsstandorten handelt es sich bei den meisten ($n=301$) um Grünlandstandorte, größtenteils aus dem nach dem Hochwasser durchgeführten Projekt „Schwermetallbelastung

Auenböden Vereinigte Mulde SN“ von 2003. In diesem Fall ist der Ausschluss erfolgt, weil die Probenahmetiefen jeweils bis 30 cm unter GOK angegeben waren. Im Nachhinein wurde festgestellt, dass die Tiefenangaben fehlerhaft waren und die Proben mit einer Entnahmetiefe bis 15 cm durchaus als repräsentativ für den humosen Oberboden angesehen werden können. Der Datenausschluss konnte aufgrund des Bearbeitungsfortschritts nicht rückgängig gemacht werden, so dass die Punkte nicht in die Entwicklung des Vorhersagemodells für Schadstoffgehalte eingegangen sind. Sie konnten aber noch zu Validierungszwecken der Schätzkarten genutzt werden.

Die angesetzten Tiefenkriterien sind für Auen kritisch zu hinterfragen. Im Lauf der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass 10 cm unter Grünland nicht als Kriterium geeignet ist. Stattdessen sollten unter Grünland entnommene Proben aus Horizonten mit einer Untergrenze von ≤ 15 cm unter GOK – ggf. auch bis ≤ 30 cm unter GOK (reliktische Ap-Horizonte) – mit in Betrachtungen von Oberböden einbezogen werden.

Nach Anwendung der o. g. Auswahlkriterien für Oberbodenhorizonte liegen aus dem Altdatenbestand und den zwei ergänzenden Untersuchungskampagnen Analysenergebnisse für die Gehalte von Blei und Cadmium im Oberboden an 3.391 und für Arsen an 3.390 Untersuchungsstandorten vor. Davon liegen 56 im Testgebiet Süd, 565 im Testgebiet Mitte und 1.249 im Testgebiet Nord. Die restlichen 1.521 Standorte verteilen sich in der Aue außerhalb der Testgebiete. Die Bodenbelastung im Untersuchungsgebiet mit Arsen, Blei und Cadmium lässt sich anhand der in Tabelle 4 angegebenen statistischen Kenngrößen einordnen.

Tabelle 4: Statistische Kenngrößen der Schadstoffgehalte im Untersuchungsgebiet (Altdaten, 1. und 2. Messkampagne nach Datenauswahl)

	n	P10 [mg/kg]	P25 [mg/kg]	Median [mg/kg]	P75 [mg/kg]	P90 [mg/kg]	P95 [mg/kg]	IQA [mg/kg]	Min [mg/kg]	Max [mg/kg]
Cd (KW)	3.391	0,77	1,1	1,8	4,9	12	17	3,8	0,03	37
Pb (KW)	3.391	62	99	180	330	490	610	231	1,5	1.400
As (KW)	3.390	20	53	94	150	220	270	97	0,25	690

Für die Visualisierung der räumlichen Verteilung wurden die Stoffgehalte von Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden nach Quartilen der 3.390 (Arsen) bzw. 3.391 (Cadmium, Blei) Probenahmepunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes sowie ergänzend unter Berücksichtigung von Referenzwerten klassifiziert (siehe Anlage A 2).

6.2 Überlegungen zum Ausschluss von Stoffdaten

Ausreißer und Extremwerte

Ausreißer und Extremwerte treten in Werteverteilungen von Schwermetallgehalten in Gebieten mit kleinräumig variablen Boden- und Sedimentationseigenschaften der Flussaue häufig auf. Sie spiegeln das real vorliegende in der Fläche variierende Spektrum der Bodenbelastung wider. Ein Ausschluss von Ausreißern und Extremwerten kann insbesondere bei stark streuenden Datenbeständen dazu führen, dass die verbleibenden Werte die reale Belastung nicht mehr vollständig repräsentieren. Vor allem ist eine Eliminierung von Ausreißern und Extremwerten am Gesamtdatenbestand nicht zielführend, da hier zu viele – wahrscheinlich für bestimmte Sedimentationsbedingungen typische – Messwerte entfallen würden.

Die Ausreißer und Extremwerte verbleiben somit im Datenbestand und es werden zwei Ansätze verfolgt, um ein Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte im Boden zu entwickeln, das robust gegenüber sehr hohen Werten ist:

- a) Der Datenbestand wird in möglichst homogene Teilkollektive aufgeteilt (homogene Raumeinheiten), die möglichst wenige Ausreißer und Extremwerte aufweisen und
- b) zur Prognose werden Methoden gewählt, die möglichst wenig von punktuellen Spitzenwerten beeinflusst werden.

Dies können statistische Kenngrößen, die robust gegenüber Extremwerten sind (z. B. Perzentilwerte), oder glättende Interpolationsverfahren leisten.

Flächennutzung

Die methodischen Untersuchungen zielen vorrangig auf landwirtschaftliche Nutzflächen (Ackerbau, Grünland) ab. Bodenuntersuchungen liegen jedoch auch für andere Nutzungen vor, wenn auch in deutlich geringerer Anzahl (vgl. Tabelle 5). Die Arsen-, Blei- und Cadmiumgehalte in den Oberböden der anderen Nutzungen liegen innerhalb des Wertespektrums der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Auch weichen die Messwerte nicht systematisch von Messwerten benachbarter Messpunkte unter landwirtschaftlicher Nutzfläche ab. Aus diesen Gründen verbleiben die Messwerte der Untersuchungspunkte unter Wald und sonstigen Nutzungen im Datenbestand.

Tabelle 5: Anzahl von Probenahmepunkten im Untersuchungsgebiet mit Analytik Oberboden (FIS Boden 9/2018 und ergänzende Bodenuntersuchungen 2018 und 2019) nach Nutzung

Nutzungs- klasse	Nutzung FIS Boden	Anzahl (n) (gesamt = 3.391)
Acker	Ackerland allgemein (A, n=2.196) Ackerbrache (BA, n=6)	2.202
Grünland	Grünlandfläche, all. (G, n=480) Weide (GE, n=447) Dauergrünland, naturnah (Wiese) (GI, n=24)	951
Wald	Forst allgemein (F, n=38), Naturwaldparzelle (FN, n=28)	66
Sonstige	Sonderkulturen (S, n=1) Brachfläche, Grünbrache, Brachland mit natürl. Sukzession, landw. Fläche (B, BG, BS, L, n=16) Ödland (naturnah, ungenutzt oder extensiv genutzt)(O, n=36) Feucht-, Sumpf-Gebiet (OF, n=15) Schotterflächen, Blockfelder (OG, n=2) Naturschutzgebiet (NSG, n=2) Sonstige Nutzung (N, n=4) Kleingartenanlagen, Hausgarten, Gartenland (NG, n=46) Kinderspielfläche (Spielplatz) (NK, n=7) Park-/Grünanlage (NP, n=15) Sportanlage (NS, n=6) Parkplatz (VP, n=1) städtisch geprägte Fläche, Siedlung, Dorfanlage (VS, n=15) kein Erkenntnisstand (nur für Altdaten) (-1, n=6)	172

Kursiv: siedlungstypische Nutzungen

Zeitpunkt der Bodenuntersuchungen

Die ältesten Proben im Datenbestand stammen aus dem Jahr 1992. Mithilfe deskriptiver Statistik und einer visuellen Prüfung der räumlichen Lage wurde die Aussagekraft der gemessenen Arsen-, Cadmium- und Bleigehalte in Abhängigkeit des Probenalters geprüft. In Abbildung 4 sind die Werteverteilungen für Cadmium einzelner Probenahmejahre gegenübergestellt. Sie zeigen in einigen Jahren eine relativ große Streuung der Messwerte; insbesondere im Jahr 2000 mit einer besonders hohen Spannweite der Messwerte (ca. 0,5 - 37 mg Cd/kg). Dies ist bei näherer Betrachtung mit dem Probenahmemuster zu erklären: In den Jahren vor 2003 wurden Transekte quer durch die gesamte Aue und beidseitig des Gewässers gelegt. Dadurch wurden flussnahe und flussferne Bereiche beprobt, wobei flussnahe Bereiche etwas stärker vertreten sind als in späteren Kampagnen. Die Stoffgehalte streuen aufgrund der Berücksichtigung des gesamten Auenquerschnitts entsprechend stark. Die umfangreichen Beprobungen von 2003 (n=2.432) wurden demgegenüber im Raster (ca. 130x130 und 250x250 Meter) durchgeführt (siehe Abbildung 5). Flussferne Gebiete sind dabei deutlich häufiger beprobt worden, als es drei Jahre zuvor mittels der Transekten erfolgt ist. Die Spannweite und die Streuung der Messwerte reduzieren sich dadurch bei Cadmium deutlich (vgl. Min/Max und Interquartilsabstände in Abbildung 4). Diese Tendenzen treffen auch für Blei und Arsen zu.

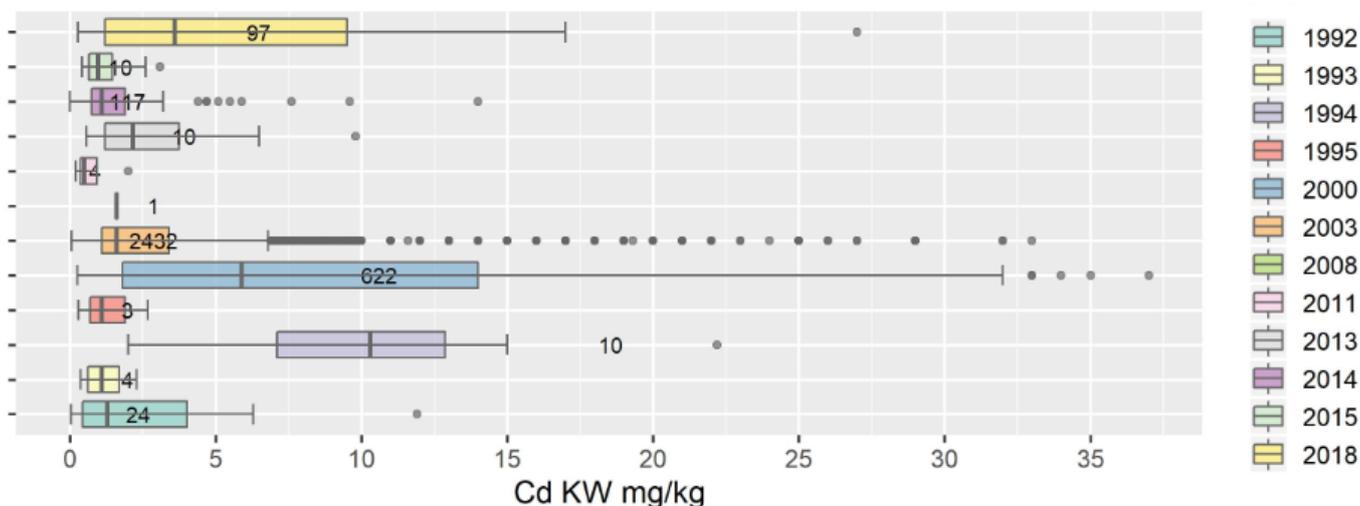


Abbildung 4: Cadmiumgehalte im Oberboden nach Untersuchungszeitpunkt ohne 2. Messkampagne 2019

Um die im Jahr 2000 gemessenen Schadstoffgehalte auf ihre Aktualität und mögliche Veränderung zu überprüfen, wurden 10 Untersuchungsstandorte der zweiten im Projekt durchgeführten Probenahmeaktion 2019 in Transekte aus dem Probenahmejahr 2000 integriert. Dieser stichpunktartige Abgleich bestätigt im Großteil der Fälle die 17 Jahre zuvor ermittelten Stoffgehalte und liefert keine Hinweise darauf, dass diese Altdaten für Auswertungen zu verwerfen bzw. eingeschränkt verwendbar sind.



Abbildung 5: Gegenüberstellung der Probenahmen 2000 in Transekten (links) und 2003 im Raster (rechts) im Hinblick auf die Arsenkonzentration im Oberboden

Weiterhin stellte sich die Frage, inwiefern die großen Hochwasserereignisse von 2002 und 2013 die Stoffgehalte im Oberboden beeinflusst haben, z. B. durch Verdünnungseffekte oder die Anlieferung neuer Schadstofffrachten. Der Datensatz des Untersuchungsgebietes wurde für eine Prüfung dieses Sachverhalts in die Teilmengen „vor Hochwasser 2002“⁴ (n=663), „zwischen den Hochwasserereignissen 2002 und 2013“⁵ (n=2.440) sowie „nach Hochwasser 2013“⁶ (n=233) eingeteilt. In Abbildung 6 sind die Werteverteilungen für Cadmium und Blei dargestellt.

⁴ 1992 und August 2002

⁵ Mitte August 2002 bis Mai 2013 (erste Probe nach Hochwasser 2002: 13.12.2002, letzte Probe vor Hochwasser 2013: 08.05.2013)

⁶ nach Mitte Mai 2013 (erste Probe nach Hochwasser 2013: 12.06.2013)

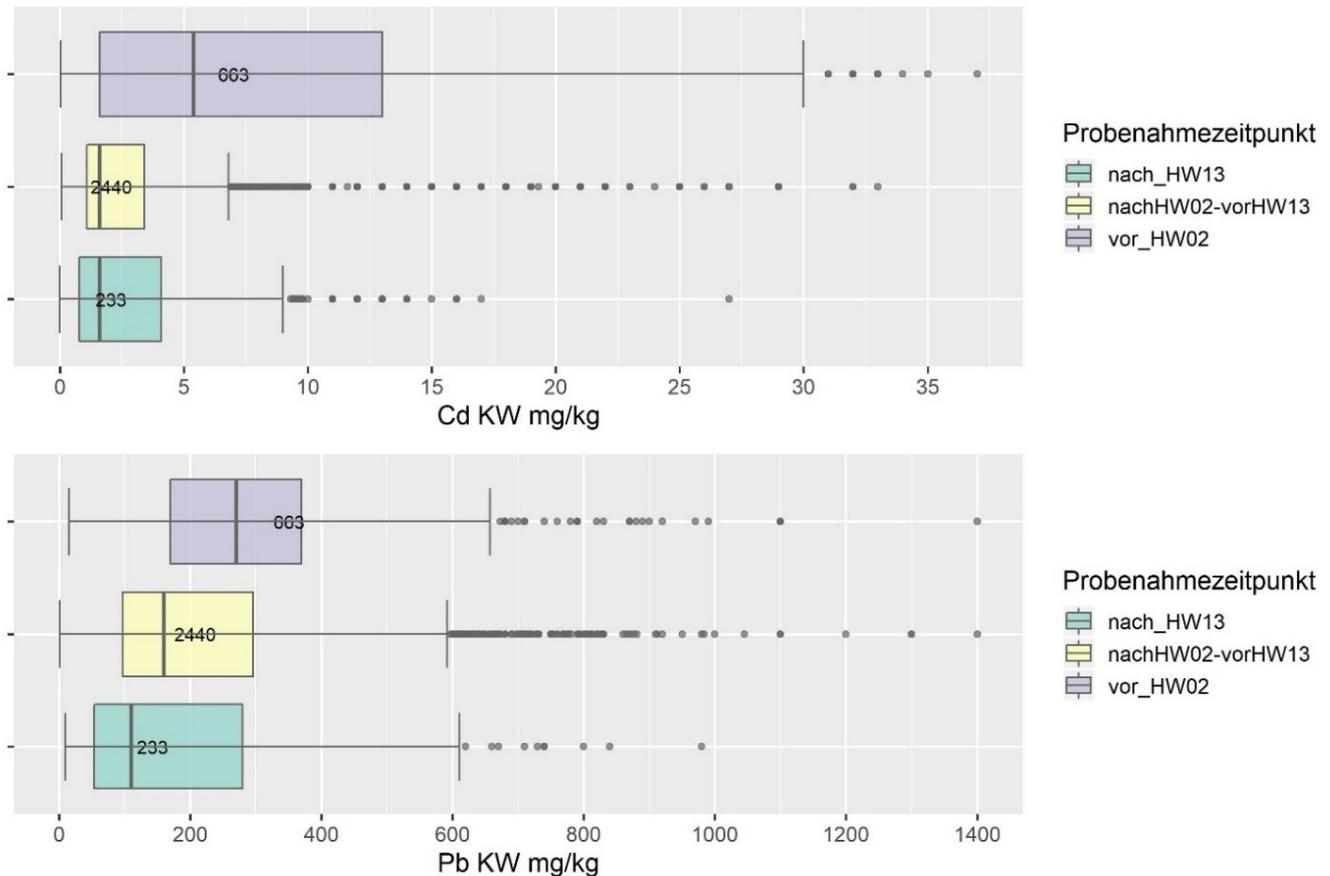


Abbildung 6: Stoffgehalte von Cadmium und Blei im Oberboden nach Untersuchungszeitpunkt vor und nach Hochwasserereignissen 2002 und 2013 (ohne 2. Messkampagne, Herbst 2019)

Die Werteverteilungen der Stoffgehalte vor dem Hochwasser 2002 unterscheiden sich deutlich von den anderen beiden Datenkollektiven für die Zeit zwischen 2002 und 2013 sowie nach 2013, was auf die oben beschriebenen Unterschiede im Probenahmemuster vor 2002 zurückzuführen ist. Ein direkter Vergleich der Stoffgehalte von Proben an benachbarten Punkten, die vor dem Hochwasser 2002 (Probenahmejahr: 2000) und nach dem Hochwasser 2002 (Probenahmejahr: 2003) genommen wurden, zeigt keine deutlichen Unterschiede in den Stoffgehalten im Oberboden. Bei der Betrachtung von Stoffgehalten im Bodenprofil über die Tiefe zeigt sich in Teilbereichen der rezenten Aue, dass die Oberböden geringere Stoffgehalte aufweisen als größere Bodentiefen, d. h. dass eine Abnahme der Schadstofffrachten mit jüngeren Hochwasserereignissen anzunehmen ist (siehe Kap. 6.6.4).

Die zwischen 2002 und 2013 gemessenen Stoffgehalte sind in ihrer Werteverteilung ähnlich charakterisiert wie die seit 2013 bis 2018 ermittelten Gehalte, wobei Blei und Arsen (letzteres ist hier nicht dargestellt) im Mittel etwas geringere Belastungen bei ähnlicher Streuung zeigen (siehe Abbildung 6). Der Vergleich von Proben in zeitlicher Nähe vor dem Hochwasser 2013 (Probenahmejahr 2011 und Frühjahr 2013; n=5) und nach dem Hochwasser 2013 (Mitte 2013 bis Ende 2013; n=9) zeigt im Mittel eine Erhöhung der Stoffgehalte nach dem Hochwasserereignis. Das einzige Probenpaar darunter, das an benachbarten Punkten (50 m Entfernung⁷) entnommen wurde, zeigt nach dem Hochwasserereignis 2013 um 20 mg/kg As, 0,3 mg/kg Cd und

⁷ AufschlussID 130385 und 130789, Raumeinheit [A3-D2], Acker, Testgebiet Mitte

40 mg/kg Pb höhere Werte gegenüber der Probenahme vor dem Hochwasserereignis (vorher 120 mg/kg As, 2,0 mg/kg Cd und 200 mg/kg Pb). Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs (n=5 bzw. 9) sowie der großen räumlichen Distanz bei allen weiteren Messstandorten liefert diese Prüfung jedoch nur punktuelle Anhaltspunkte für eine eventuell auch lokale Erhöhung der Schadstoffgehalte im Oberboden durch das Hochwasserereignis. Insgesamt spiegeln die vor den großen Hochwasserereignissen gemessenen Stoffgehalte in den Oberböden die aktuell in den Oberböden gemessenen Stoffgehalte wider.

Bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebietes lässt sich feststellen, dass der Zeitpunkt der Bodenuntersuchung keinen erkennbaren Einfluss auf die Datenqualität oder die Höhe der stofflichen Belastung im Oberboden ausübt. Vielmehr spiegeln sich in den Zeitschnitten die Unterschiede im Probenahmeschema (Transekte vs. Raster) wider. Die Ergebnisse der vor 2018 erhobenen Bodenuntersuchungen auf Arsen, Cadmium und Blei – insbesondere auch jene der Transekte von 2000 – wurden durch neuestichpunktartige Untersuchungen bestätigt. Damit können die Proben aller Erhebungszeiträume gemeinsam für ein Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte in Böden verwendet werden. Ein Ausschluss von Proben aus der Zeit vor 2003 würde dazu führen, dass die in den Transekten gefundene – und 2018/19 bestätigte – hohe Variabilität der Stoffgehalte im Auenquerschnitt nicht mehr realistisch abgebildet werden würde.

Hinweise darauf, dass mit jüngeren Hochwasserereignissen geringere Schadstofffrachten eingetragen werden und zu geringeren Stoffgehalten in Oberböden führen, sind vorhanden. In Kap. 6.6.4 wird beschrieben, inwiefern dies im Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte in Böden über die Abgrenzung entsprechender Raumeinheiten berücksichtigt werden kann.

6.3 Arbeitskarten

Die potenziell wirksamen Einflussfaktoren der Schadstoffbelastungen in Auenböden sind in Tabelle 6 aufgeführt. Sie sind entsprechend ihrer Ausprägung (Attribute) in den Testgebieten klassifiziert.

Tabelle 6: Potenzielle Einflussfaktoren für Schadstoffgehalte in Böden

Geodaten	Faktor	Attribute
Auentyp (Auenzustandsbericht BfN)	Auentyp	CgrGCFHW (Schotter, gefällereich, Grundgebirge, Flussaue, Winterhochwasser) KgrFHFHW (Kies, gefällereich, Flach-/Hügelland, Flussaue, Winterhochwasser)
Auenbereich (Auenzustandsbericht BfN)	Lage im Auenbereich	Fluss Rezente Aue Altaue
Flächennutzung (ATKIS)	Nutzung	Ackerbau/Nutzgarten Grünland Wald Gewässer Industrie- und Gewerbegrundstücke Park- und Freizeitanlagen Wohngebiet mit Haus- und Kleingarten sowie Kinderaufenthalt
HQ 25, HQ 50, HQ 500	Intensität und Gefahr von HQ 25, HQ 50, HQ 500	≤ 0,5 m Wasserstand/niedrige Gefahr > 0,5 m bis < 2 m Wasserstand/mittlere Gefahr ≥ 2 m Wasserstand/hohe Gefahr
Altarmbereiche (BEAK)	Lage im Altarmbereich	Gewässerbereiche Ufernahe Aue

Geodaten	Faktor	Attribute
		Jüngste Altarmbereiche Am weitesten vom Fluss entfernt Ältere Altarmbereiche
Deiche und Dämme/Lage in der Aue (BEAK, überarbeitet)	Anzahl Deiche und Dämme	Kein Damm Ein Damm Zwei Dämme Drei Dämme
Höhe über dem Fluss (DGM2, BEAK)	Höhe über dem Fluss	≤ 0,5 m > 0,5 m bis ≤ 2 m > 2 m bis ≤ 4 m > 4 m bis ≤ 5 m > 5 m bis ≤ 10 m > 10 m bis ≤ 20 m > 20 m
Bodenartklasse BK50	Bodenartklasse nach KA 5 (oberste Schicht)	Reinsande Lehmsande Schluffsande Sandlehme Normallehme Tonlehme u. a.
Bodenschätzung Schätzflächen	Bodenart nach Bodenschätzung	Lehm Stark lehmiger Sand Sand u. a.
Bodenschätzung Schätzflächen	Kultur	Acker-Grünland Ackerland Grünland Grünland-Acker
Bodenschätzung Schätzflächen	Bodenstufe	Bodenstufe I Bodenstufe II Bodenstufe III
Bodenschätzung Schätzflächen	Zustandsstufe	Zustandsstufe 2 ... Zustandsstufe 7
Bodenschätzung Schätzflächen	Abschlämmbare Teile	<10 Masse-% (Sand) 19-23 Masse-% (stark lehmiger Sand) 30-44 Masse-% (Lehm) u. a.
Bodenschätzung Schätzflächen	Entstehung Ackerflächen	Alluvium Diluvium, gesteinig Löß über Verwitterung u. a.
Bodenschätzung Schätzflächen und (bestimmende) Grablöcher	Humusstufe	h1 h2 u. a.

Geodaten	Faktor	Attribute
Einzugsgebiete DLM1000 (BfN)	Gebietsbezeichnung der Flussabschnitte	Freiberger Mulde unterhalb Mündung Zschopau, Vereinigung mit Zwickauer Mulde Lossa Mulde Vereinigung von Zwickauer und Freiberger Mulde oberhalb Mündung Lossa Mulde unterhalb Mündung Lossa oberhalb Mündung Schwarzbach Mulde unterhalb Mündung Schwarzbach oberhalb Mündung Lober-Leine-Kanal Schwarzbach Zwickauer Mulde unterhalb Mündung Chemnitz Vereinigung mit Freiberger Mulde
Raumeinheiten nach UBA (KASTLER ET AL. 2015)	Lage in UBA-Raum- einheiten	01-09-04-16-MLD 02-18-06-16-FMD 02-18-06-16-ZMD
Testgebiete	Lage im Testgebiet	Nord Mitte Süd

Deiche

Die Geodaten zum Einflussfaktor „Deiche/Lage in der Aue“ wurden von BEAK (2018) übernommen und angepasst. Basierend auf Luftbildern (2012-2014) und dem DGM2 wurde der Deichverlauf an drei Stellen angepasst (vgl. z. B. Abbildung 7). Dadurch wurden die Attribute dieses Einflussfaktors an 247 Messstandorten geändert⁸. Zum Teil wurden Vereinfachungen vorgenommen, wenn Grenzen sich nicht eindeutig an topographischen Merkmalen entlangführen ließen. Letztendlich wirken sich die Änderungen nur dort auf die Raumeinheitenbildung aus, wo Verläufe der Grenze zwischen „kein Einfluss von Damm“ und „mindestens ein Damm (1 bis 3 Dämme)“ verändert wurden (siehe z. B. die in Abbildung 7 nach Anpassung vergrößerte Fläche ohne Dammeinfluss im Norden), denn die Flächen der Arbeitskarte mit einem, zwei und drei Dämmen zwischen Mulde und diesem Gebiet wurden für die Raumeinheitenbildung aggregiert (vgl. Kap. 6.4).

⁸ „Drei Dämme“ → „Ein Damm“ (128 Standorte), „zwei Dämme“ → „ein Damm“ (44 Standorte), „ein Damm“ → „Zwei Dämme“ (42 Standorte), „ein Damm“ → „kein Damm“ (30 Standorte) und „kein Damm“ → „ein Damm“ (3 Standorte).

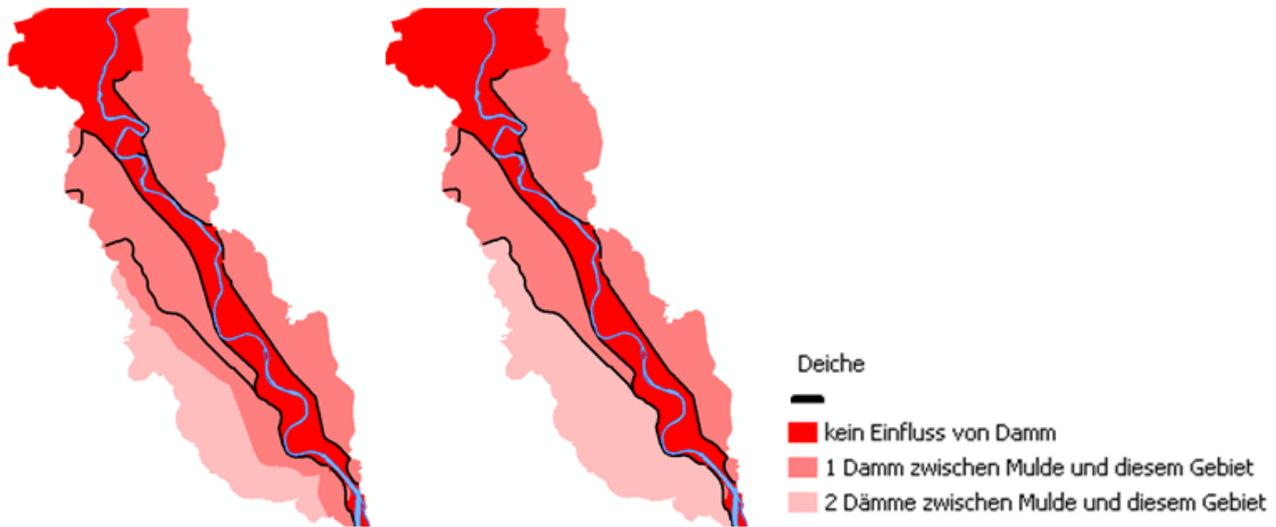


Abbildung 7: Arbeitskarte Deiche / Lage in der Aue vor (links) und nach Anpassung (rechts)

Kleinrelief (Senken)

Vor dem Hintergrund der Hypothese einer längeren Sedimentation von schadstoffbefrachtetem Material in abflusslosen Geländesenken und damit einer Anreicherung von Stoffen im Oberboden werden Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Kleinreliefs untersucht. Zur Ermittlung von Geländesenken aus einem digitalen Geländemodell diente eine Oberflächenanalyse in ArcGIS. Zu Beginn wurde unter Anwendung der Resampling Methode „Bilinear“ ein DGM2 auf 5 m x 5 m-Zellen zu einem DGM5 gerechnet. Dies diente zur Reduzierung von kleinteiligen Geländesenken, die aus Datenfehlern resultieren. Die Oberflächenanalyse wurde mithilfe des Toolsets „Hydrologie“ aus der ArcGIS-Toolbox Spatial Analyst durchgeführt. Dazu wurde zuerst die Fließrichtung für jede einzelne Rasterzelle des DGM unter Anwendung des Werkzeugs „Fließrichtung“ berechnet. Daraufhin ließen sich die Geländesenken identifizieren, indem das Fließrichtungs-Raster des Werkzeugs „Senke“ ausgewertet wird. Das Ergebnis ist ein Raster von abflusslosen Senken in den Testgebieten. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde mit dem Tool „Neigung“ aus dem Toolset „Oberfläche“ die Hangneigung berechnet. Mit Hilfe dieses Rasters wurde die Lage der Senken validiert.

Die identifizierten Geländesenken sind in den Testgebieten flächenhaft vorhanden und nehmen einen Anteil von ca. 3-4 % an der Gesamtfläche ein. Sie verteilen sich mit einer mittleren Größe von 40 m² recht regelmäßig über die Fläche und befinden sich sowohl innerhalb als auch außerhalb von linienhaften Strukturen wie Rinnen und Gräben (vgl. z. B. Abbildung 8). Die identifizierten Zellen weisen oftmals eine Flächengröße von ca. 25 m² und kleiner auf. In seltenen Fällen wurden Senken von 150 m² Größe oder mehr identifiziert. Linienhafte Reliefstrukturen wie Altarme oder vernässte Senken werden in den Ergebnissen nicht vollständig abgebildet, sondern nur die innerhalb dieser Strukturen gefundenen Senken. Auch wenn einige der Untersuchungsstandorte der 2. Messkampagne gezielt in Senken platziert wurden, liegen nur einzelne der insgesamt 3.391 untersuchten Messstandorte in den ermittelten Senken (davon 45 von 1.249 in Testgebiet Nord, 31 von 565 in Testgebiet Mitte und 0 von 56 in Testgebiet Süd). Die Messstandorte in Senken des Kleinreliefs weisen Arsengehalte im Rahmen der gesamten Spannweite der Oberböden des Untersuchungsgebietes auf. Sie bestätigen nicht die Hypothese einer systematisch höheren stofflichen Belastung innerhalb dieser Senken aufgrund einer längeren Sedimentationszeit gegenüber umliegenden Flächen. Auch zehn Untersuchungspunkte, die 2019 gezielt in Senken platziert worden sind, zeigen zum größten Teil Arsengehalte, die sich gut in die außerhalb der Senken ermittelte Werteverteilungen der jeweiligen

Raumeinheit einordnen. Eine systematische vergleichende Auswertung des Zusammenhangs von Stoffgehalten im Boden zwischen Punkten innerhalb und außerhalb von Senken ist aufgrund der geringen Probenzahl innerhalb von Senken nicht sinnvoll möglich.

Mit einem Flächenanteil in der Größenordnung von 3-4 % spielen die gefundenen Kleinformen eine untergeordnete Rolle für die flächenhafte Darstellung von Schadstoffbelastungen. Die stichprobenhaft gewonnenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass es für die Höhe der Bodenbelastung keine Rolle spielt, ob Untersuchungen innerhalb von kleinen Senken bis zu 25 m² Größe oder außerhalb entnommen werden. Eine Arbeitskarte für das Kleinrelief wird somit nicht bei der Modellentwicklung berücksichtigt.

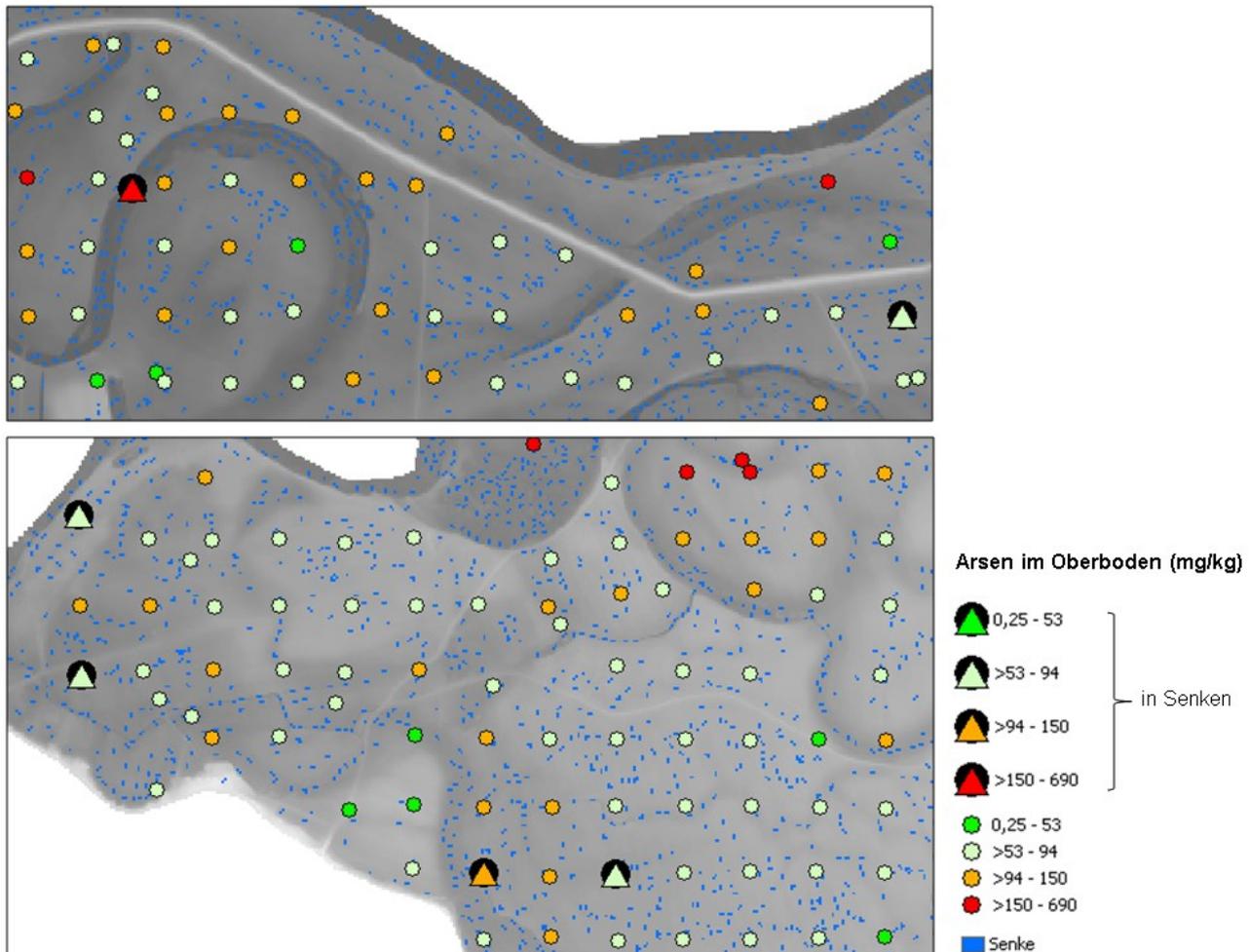


Abbildung 8: Beispiele für Arsengehalte in und außerhalb von Senken des Kleinreliefs im Testgebiet Nord

6.4 Wirkung der Einflussfaktoren auf Stoffgehalte

Das Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte in Böden sollte mit Hilfe von Szenarien gebildet werden, die die Sedimentations- und Abtragsbedingungen in der Aue der Vereinigten Mulde widerspiegeln. Dazu war zunächst herauszuarbeiten, welche flächenhaft abbildbaren Faktoren die Sedimentation und damit die Schadstoffgehalte statistisch nachweisbar beeinflussen. Eingesetzt wurden dazu multivariate und deskriptive statistische Verfahren.

Nach erfolgter Klassifizierung der Einflussfaktoren (siehe Tabelle 6) wurden alle Untersuchungsstandorte entsprechend ihrer Lage gekennzeichnet (z. B. Lage in rezenter Aue, flussnah, Grünland). Angewendet wurden die statistischen Verfahren auf die tiefengewichteten Konzentrationen für Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden an den Probenahmestandorten im Untersuchungsgebiet (vgl. Kapitel 4.1). Die Ergebnisse der Bewertung der Einflussfaktoren sind in Anlage A 3 zusammengefasst. Darin berücksichtigt sind auch Erkenntnisse von BEAK (2018).

6.4.1 Multivariate Statistik

Die Suche nach Mustern in der Verteilung von Arsen, Cadmium und Blei im Untersuchungsgebiet erfolgte durch das nicht-lineare multivariate Verfahren Isometric Feature Mapping (Isomap, TENNENBAUM ET AL. 2000). Viele bodenchemische Prozesse und die Verteilung der Stoffgehalte in den Böden entlang eines Fließgewässers sind durch nicht-lineare Zusammenhänge gekennzeichnet, die durch Isomap identifiziert werden können (LISCHEID & BITTERSÖHL 2008, SCHILLI ET AL. 2010, SCHILLI 2017). Mit Hilfe der Komponentenladungen, die die erklärte Varianz innerhalb des Datensatzes der drei betrachteten Stoffe abbilden, lässt sich die Relevanz einzelner Prozesse und Einflüsse quantifizieren. Für die Interpretation der Komponenten und das Maß der Wirkung eines Prozesses wurden Boxplots berechnet, die die unterschiedlichen Einflussfaktoren und die Komponentenladungen beinhalten. Folgende potenziell wirksamen Einflussfaktoren wurden im multivariaten Verfahren betrachtet:

- Altarmbereich nach BEAK (2008)
- Auenbereich nach BFN & BMU (2009)
- Auentyp nach BFN & BMU (2009)
- Bodenartenklasse BK50
- Anzahl Dämme nach BEAK (2008)⁹
- Nutzung ATKIS¹⁰
- Flussabschnitte nach Einzugsgebieten der Nebengewässer (Gebietskennzahl) nach BMU & BFN (2009)
- Höhe über dem Fluss nach BEAK (2008)
- HQ25, HQ50 und HQ500 (Gefahr und Intensität)
- Raumeinheiten UBA nach KASTLER ET AL. (2015)
- Testgebiet.

Da Bodenschätzungsdaten erst in einer späteren Projektphase zur Verfügung standen, wurden diese in diesem Verfahren nicht einbezogen. Weiterhin nicht berücksichtigt wurden die Bodensubtypen nach BK50 aus den in Kapitel 4.2 genannten Gründen. Das DGM fließt über den Faktor „Höhe über dem Fluss“ ein.

Im Ergebnis des Isomap-Verfahrens wurde festgestellt, dass mit der 1. Komponente ca. 85 % der Variabilität und unter Hinzunahme der 2. Komponente bereits ca. 99 % erklärt werden. Die 3. Komponente erklärt nur noch 1 % der gefundenen Variabilität der Stoffgehalte (vgl. Abbildung 9 oben). Hinsichtlich der Ausprägungen der maßgeblichen Komponenten 1 und 2 verhalten sich Arsen und Blei bei den untersuchten Einflussfaktoren im Untersuchungsgebiet ähnlich. Cadmium hingegen zeigt ein anderes Verhalten in der 2. Komponente (vgl. Abbildung 9 unten).

⁹ vor der in Kap. 6.3 beschriebenen Anpassung

¹⁰ Eventuell abweichende Nutzungsangaben der Felddaufnahme wurden nicht berücksichtigt.

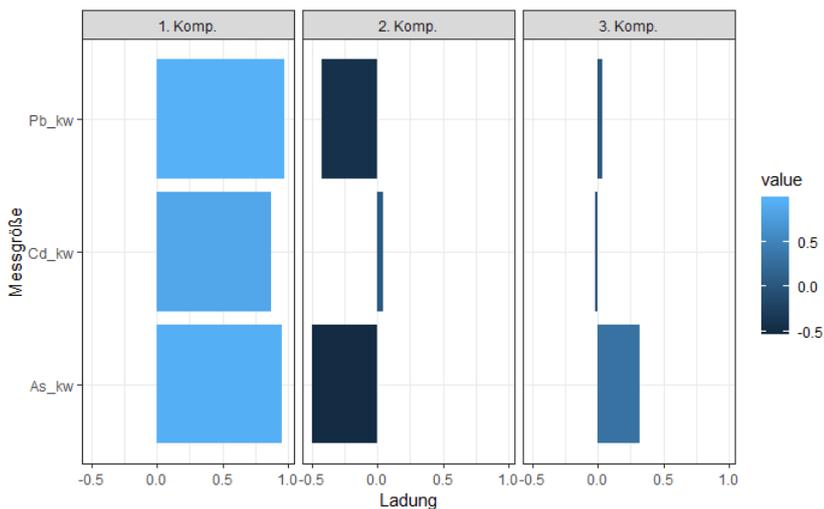
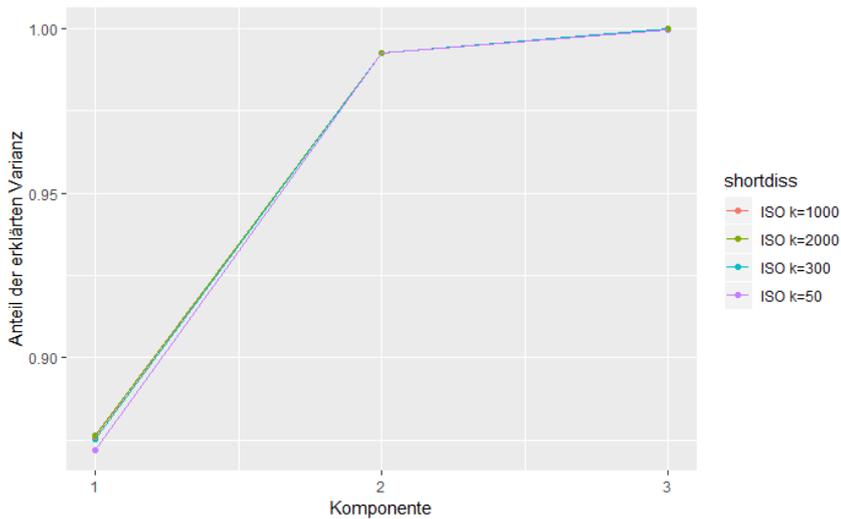


Abbildung 9: Anteil der erklärten Varianz bei unterschiedlichen Distanzen (oben) und Komponentenladungen für Arsen, Cadmium und Blei (unten)

Es zeigt sich, dass die meisten der untersuchten Einflussfaktoren zu einer Differenzierung der Stoffmuster in der Aue beitragen, so z. B. insbesondere der Faktor Auenbereich (vgl. Abbildung 10). Die Ausprägungen der Komponentenladungen zeigen signifikant höhere Stoffgehalte in den Oberböden der rezenten Aue und in Flussnähe („Fluss“) gegenüber der Altaue an. Neben dem Auenbereich sind es insbesondere die Flächennutzung, der Altarmbereich, der Auentyp, HQ25/50, die Anzahl der Dämme und die Höhe über dem Fluss, z. T. auch die Bodenartenklasse der BK50, die einen deutlichen Einfluss auf die Schadstoffgehalte in den Oberböden in einer oder mehreren Komponenten zeigen (vgl. Tabelle 7). Davon differenzieren die Ladungen der 2. Komponente nur bei den Faktoren Altarmbereich, Auenbereich, Auentyp, Bodenartenklasse, Anzahl Dämme und HQ25. Das Bild der 2. Komponente wird durch Faktoren hervorgerufen, die gemeinsam auf Arsen und Blei wirken und Cadmium hingegen nicht beeinflussen bzw. hier einen geringen gegenteiligen Effekt haben. Hier könnte eine Rolle spielen, dass Arsen und Blei in Flussaue unter reduzierenden Bedingungen gemeinsam vorkommen. Beide sind dort in Eisenhydroxiden gebunden. Die Eisenhydroxide sind unter wechselnden Redox-Bedingungen frisch entstanden und deshalb noch schwach kristallin; der Goethit in flussferneren, trockenen Braunerden ist dagegen kristallin. Arsen und Blei kommen am häufigsten in der Ton-Fraktion, etwas weniger in der Schlufffraktion, aber auch an gröberem Sandpartikeln (Coatings) vor (ACKERMANN ET AL. 2010). Das Bild der 2. Komponente könnte diesen Prozessen zugeordnet werden, die mit Flussnähe und häufig hohem Grundwasserstand bzw. häufiger Überschwemmung und dadurch hervorgerufen häufig reduzierenden Bedingungen in einem engen Zusammenhang stehen.

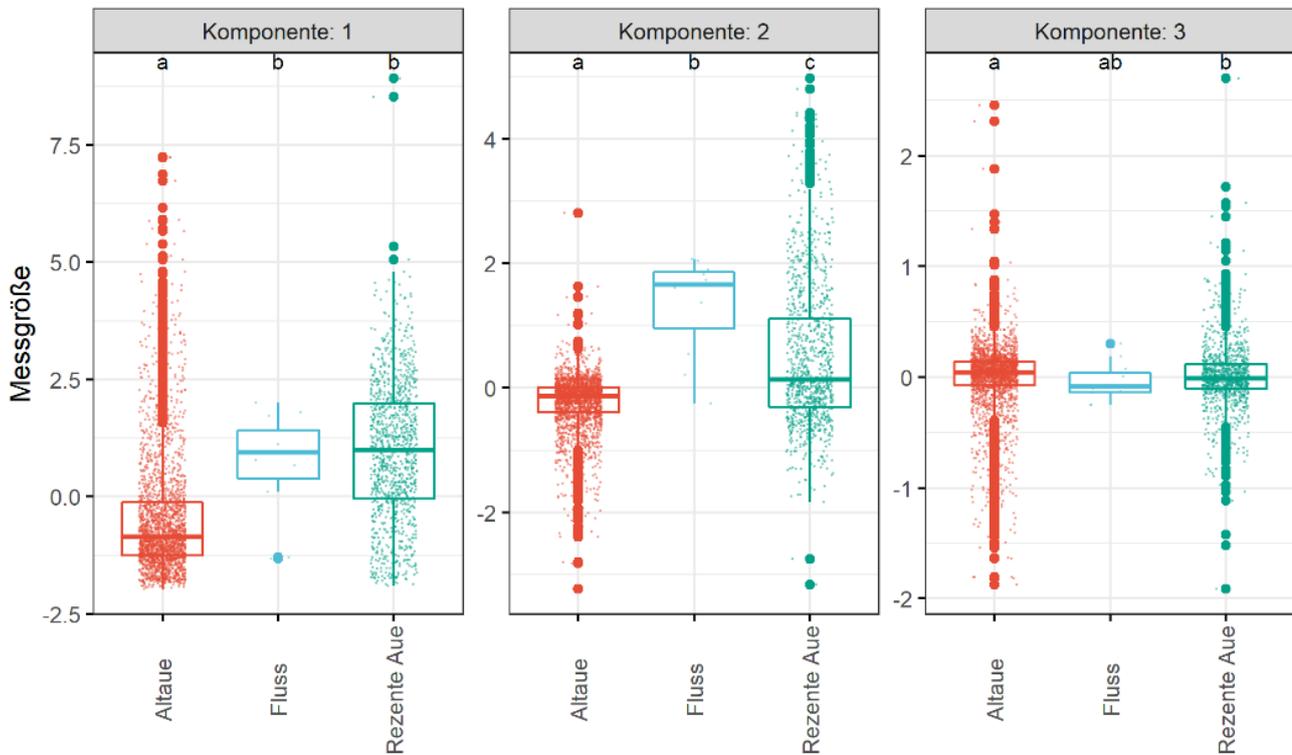


Abbildung 10: Ausprägung der Komponenten für den Einflussfaktor Auenbereich

Im Ergebnis der multivariaten statistischen Auswertung lässt sich feststellen, dass die vorangehend genannten Einflussfaktoren prinzipiell für die Entwicklung des Vorhersagemodells für Schadstoffgehalte geeignet sind. Die Testgebiete unterscheiden sich in ihrem Stoffmuster, so dass eine Differenzierung des Vorhersagemodells im Flussverlauf zu prüfen ist. Ein geringer Einfluss zeigte sich im Isomap für die Faktoren HQ500, die Gebietskennzahl/Flussabschnitte nach Einzugsgebieten der Nebengewässer und die im nationalen Kontext abgegrenzten Raumeinheiten nach UBA (KASTLER ET AL. 2015). Diese sind nach diesem Ergebnis nicht für die Modellentwicklung geeignet.

Tabelle 7: Zusammenfassende Auswertung der Komponentenladungen für Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Differenzierung in Komponente 1	Differenzierung in Komponente 2	Differenzierung in Komponente 3*
Altarmbereich	deutlich	z.T. deutlich	gering
Auenbereich	z.T. deutlich	deutlich	gering
Auentyp	deutlich	deutlich	gering
Bodenartenklasse BK50	z.T. deutlich	z.T. deutlich	z.T. deutlich
Anzahl Dämme	z.T. deutlich	z.T. deutlich	gering
Nutzung ATKIS	deutlich	deutlich	gering
Flussabschnitte (Gebietskennzahl)	gering	gering	gering
Höhe über dem Fluss	deutlich	gering	gering
HQ25	deutlich	deutlich	gering
HQ50	deutlich	gering	gering
HQ500	gering	gering	gering
Raumeinheiten UBA	gering	gering	gering
Testgebiete	deutlich	gering	gering

*Die 3. Komponente ist begrenzt aussagekräftig (erklärt ca. 1 % der Variabilität).

6.4.2 Deskriptive Statistik

Die Prüfung der Wirksamkeit verschiedener Einflussfaktoren erfolgte weiterhin mit deskriptiven statistischen Methoden. Die gewichteten Mittelwerte von Arsen, Blei und Cadmium in den Oberböden wurden für die Ausprägungen aller in Tabelle 6 genannten Faktoren in Boxplots dargestellt. Der Median ist bei diesem Verfahren die statistische Kenngröße für die mittleren Schadstoffgehalte innerhalb der Faktorenklasse; als Streuungsmaß und zur Darstellung der Variabilität werden der Interquartilsabstand (IQA), die Spannweite sowie die Lage der Extremwerte genutzt. Anhand der Boxplots erfolgte ein Vergleich der Werteverteilungen für die Ausprägungsklassen der potenziell wirksamen und abbildbaren Einflussfaktoren sowie der Kombination von Einflussfaktoren (Sedimentationsszenarien), z. B. Lage zu Deichen mit und ohne Nutzung, Lage zu Deichen in Flussabschnitten. Zur Prüfung von Zusammenhängen der Arsen-, Blei- und Cadmiumgehalte im Oberboden mit stetigen Variablen (pH-Wert, C_{org} -, Ton-, Sandgehalt) wurden Streudiagramme verwendet (vgl. z. B. Abbildung 14 und Abbildung 15).

Die geprüften Faktoren unterscheiden sich in ihrem Einfluss auf die Stoffgehalte und hinsichtlich ihrer Eignung für ein Vorhersagemodell wie folgt:

Faktor hat Einfluss auf Stoffgehalte

Bestimmte Faktoren beeinflussen die Stoffverteilung von Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden nachweisbar und sind prinzipiell für ein Vorhersagemodell geeignet. Dies sind:

- Altarmbereiche¹¹ (vgl. Abbildung 11)
- Anzahl Dämme/Lage in der Aue (Layer für Cadmium nach BEAK 2018¹², überarbeitet, vgl. Abbildung 12)
- Flussabschnitte (basierend auf Auentyp (KOENZEN 2005 bzw. BMU & BFN 2009) in Kombination mit den Einmündungen der Gewässer 1. Ordnung (vgl. Abbildung 13))
- Auenbereich (Lage in rezenter Aue/Altaue)
- Höhe über dem Fluss
- Nutzung
- gemessener C_{org} ($n=151$) (Cadmium: $R^2=0,64$, Blei: $R^2= 0,51$, Arsen: $R^2= 0,45$ ¹³, vgl. z. B. Abbildung 14).

Die Faktoren sind nicht immer für alle drei Stoffe gleichermaßen geeignet und überlagern sich zum Teil in ihrer flächenhaften Verbreitung. Zudem lassen sich Ausprägungen (Attribute) von Faktoren zusammenfassen (aggregieren) (siehe unten). Hinweise dazu sind für alle Faktoren in Anlage A 3 aufgeführt.

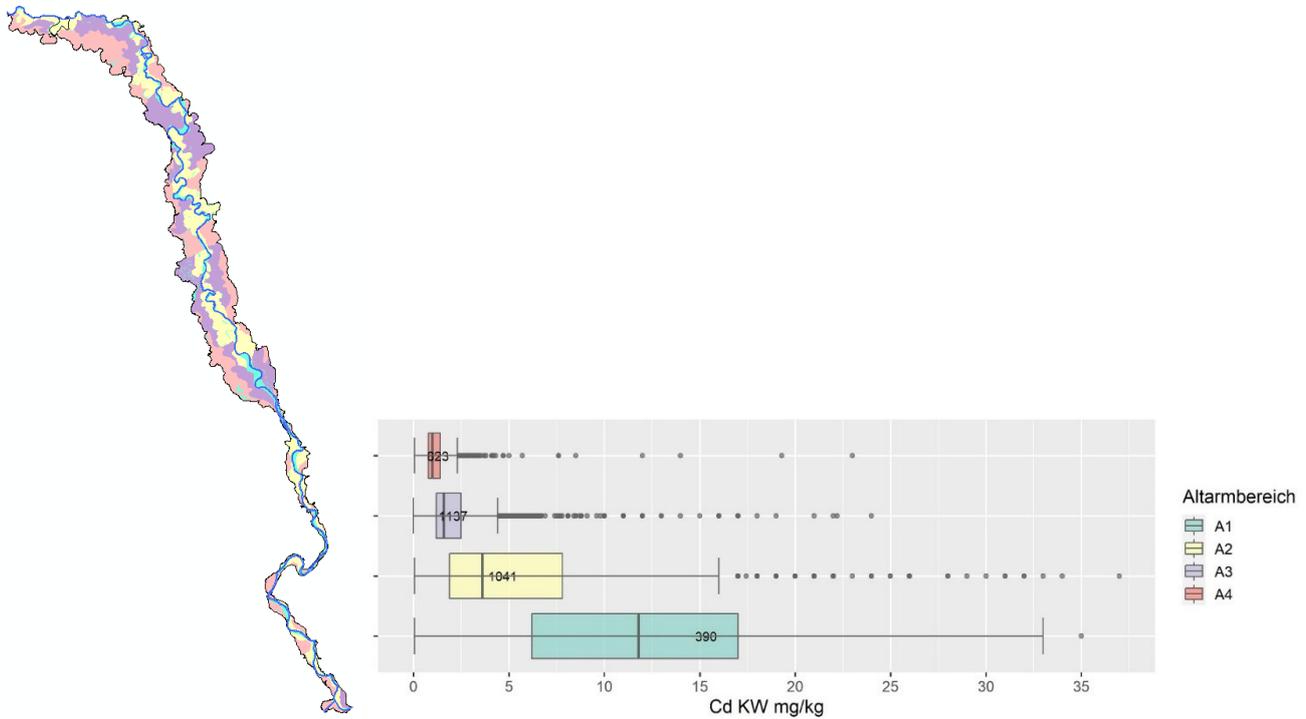
Flächendeckende Karten der Humusstufen liegen nicht vor¹⁴, so dass die gefundenen Zusammenhänge der C_{org} -Gehalte mit den Arsen-, Cadmium- und Bleigehalten nicht in Form einer Arbeitskarte in das Vorhersagemodell integriert werden können. Die Höhe über dem Fluss wurde nicht mittels einer Korrelation geprüft, da der Datensatz ausschließlich in klassifizierter Form zur Verfügung stand.

¹¹ Die Altarmbereiche gliedern die gesamte Flussaue unter Berücksichtigung des Verlaufs von Altarmen und deren Relikten, die sich im Relief nachzeichnen. Die Einheiten „Gewässerbereiche“, „ufernahe Aue“ und „jüngste Altarmbereiche“ liegen zu großen Teilen im rezenten Überflutungsbereich, nicht aber im Bereich von neueren Dämmen und Deichen. Die Einheiten „am weitesten vom Fluss entfernte Altarmbereiche“ und „ältere Altarmbereiche“ liegen meist in der Altaue.

¹² Die von BEAK erarbeiteten Layer des Geofaktors Lage in der Aue für Arsen und Blei wurden stichprobenhaft geprüft und nicht als Einflussfaktor genutzt, da sich der Layer für Cadmium am besten eignet, um die Stoffgehalte wiederzugeben (so auch in BEAK 2018 beschrieben).

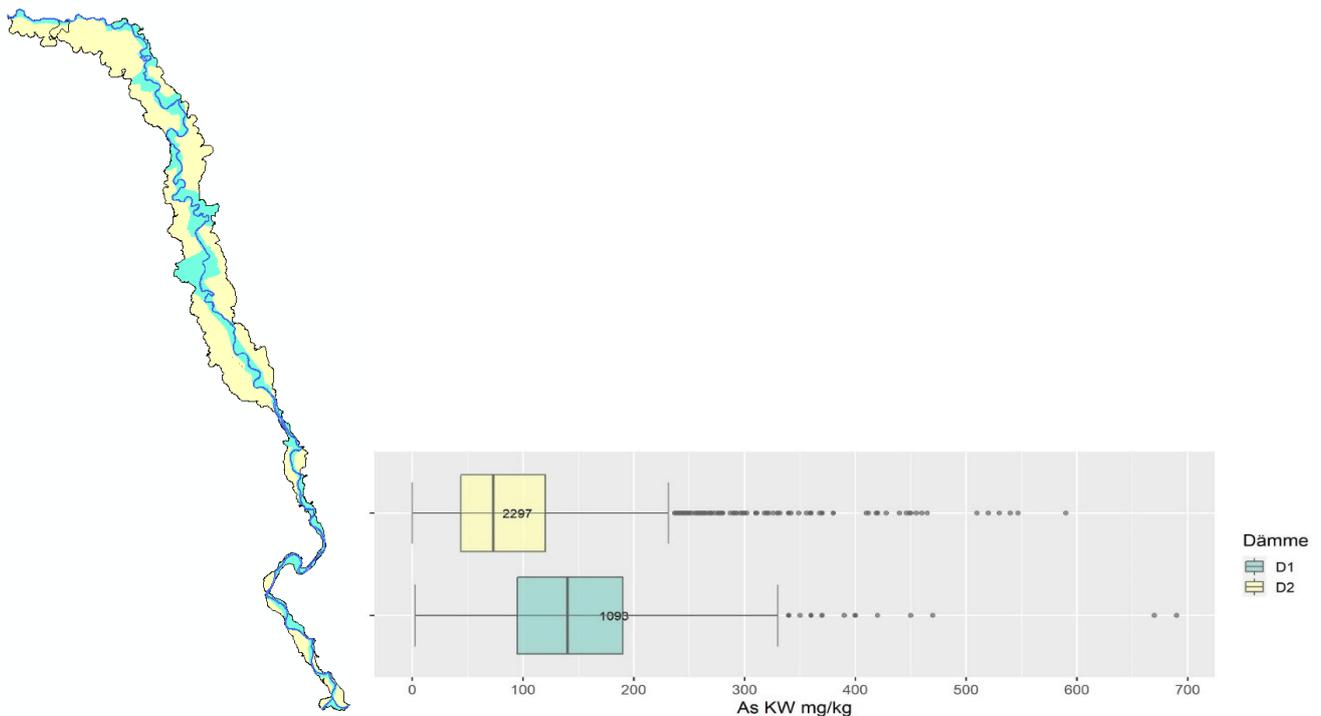
¹³ Die Bestimmtheitsmaße beziehen sich auf logarithmierte Werte.

¹⁴ Bodenschätzflächen liegen nur für einen Teil des Untersuchungsgebietes vor (ca. 1/3 des Testgebietes Mitte und 2/3 des Testgebietes Nord sowie Teilflächen außerhalb der Testgebiete).



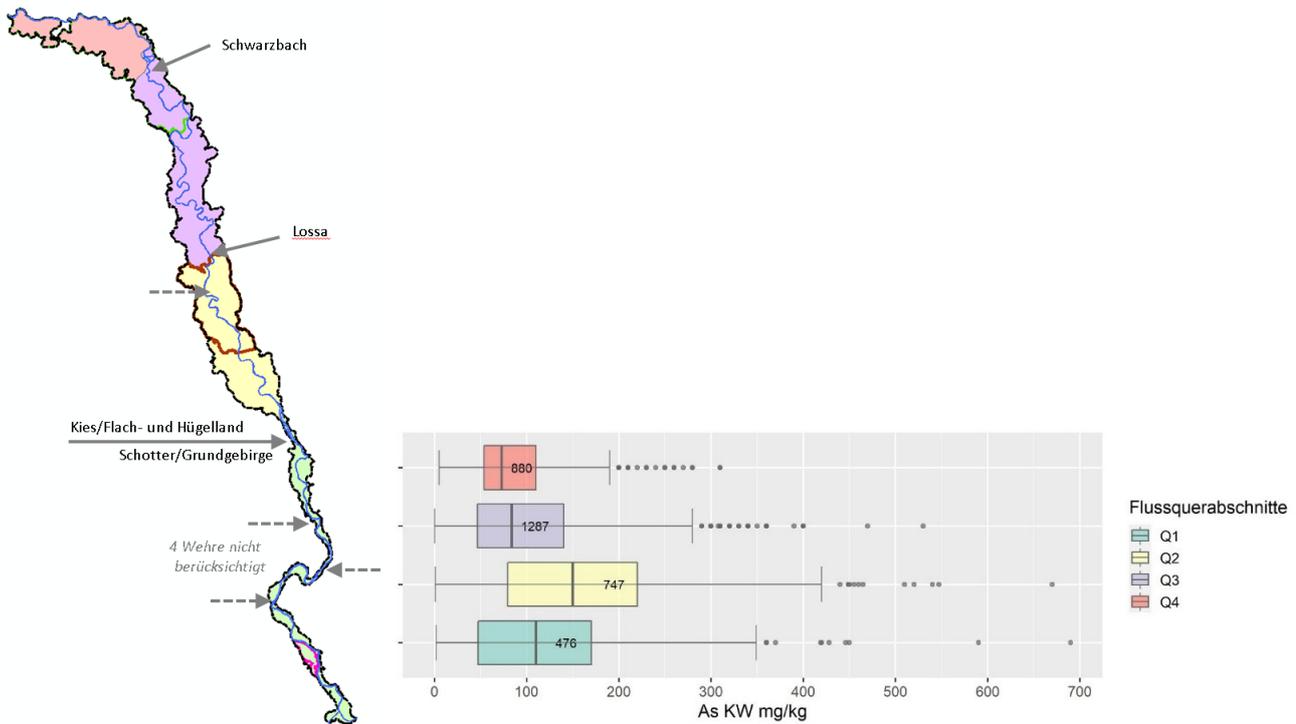
A1: flusssnah; A2: jüngste Altarmbereiche; A3: am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche; A4: ältere Altarmbereiche

Abbildung 11: Einflussfaktor Altarmbereich nach BEAK 2018, aggregiert im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Cadmium im Oberboden



D1: kein Damm zum Fluss; D2: mind. ein Damm zum Fluss

Abbildung 12: Einflussfaktor Anzahl Dämme/Lage in der Aue (Layer für Cadmium nach BEAK 2018, überarbeitet) im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Arsen im Oberboden



- Q1: Auentyp Schotter/Grundgebirge vor Mündung der Lossa;
- Q2: Auentyp Kies/Flach- und Hügelland vor Mündung der Lossa;
- Q3: Auentyp Kies/Flach- und Hügelland nach Mündung der Lossa bis Mündung des Schwarzbachs;
- Q4: Auentyp Kies/Flach- und Hügelland nach Mündung des Schwarzbachs

Abbildung 13: Einflussfaktor Flussabschnitte (basierend auf Auentyp nach KOENZEN 2005 bzw. BMU & BfN 2009 in Kombination mit den Einmündungen der Gewässer 1. Ordnung) im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Arsen im Oberboden

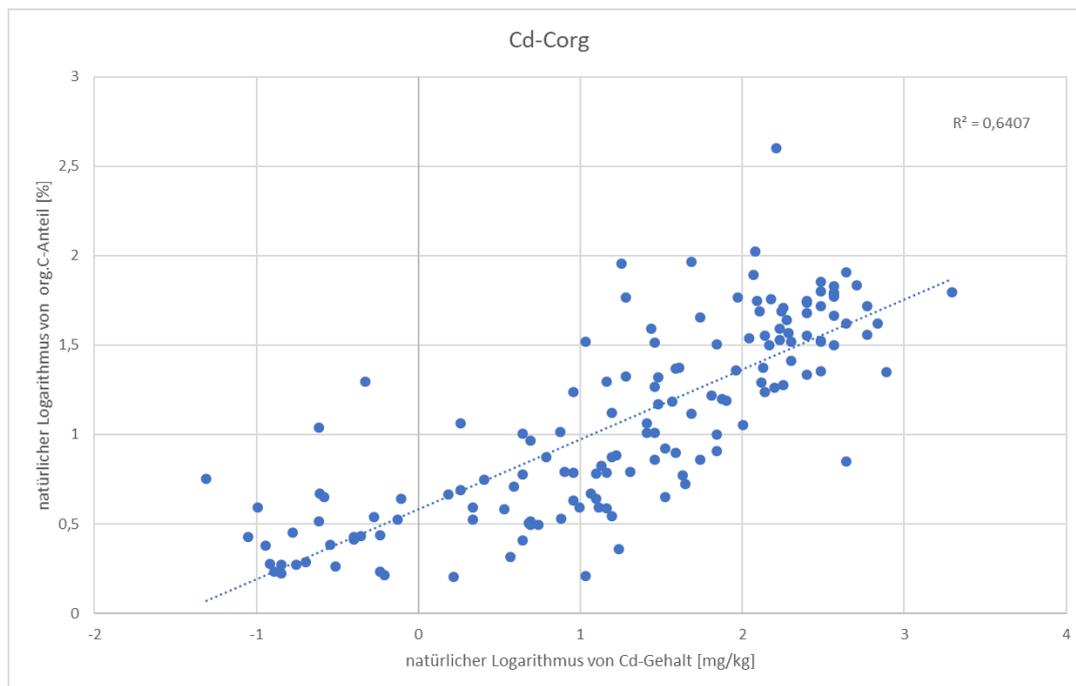


Abbildung 14: Korrelation der Cadmiumgehalte mit Corg-Gehalten im Oberboden an 15 Probenahme-punkten im Untersuchungsgebiet

Faktor hat keinen Einfluss auf Stoffgehalte

Für bestimmte Faktoren ist kein Einfluss auf die Stoffgehalte nachweisbar, so dass diese für die Modellentwicklung verworfen werden können. Dies sind:

- gemessener Tongehalt ($n=151$) ($R^2 \leq 0,19$), vgl. Abbildung 15
- gemessener Sandgehalt ($n=151$) ($R^2 \leq 0,18$)
- gemessener pH-Wert ($n=151$) ($R^2 \leq 0,19$)
- Bodenartklasse BK50, vgl. Abbildung 16
- Bodenschätzung: Bodenart, abschlämmbare Teilchen (Ton, Feinschluff und 50 % Mittelschluff), Kulturart (Nutzung), Entstehung (Ausgangssubstrat Ackerböden), Boden- und Zustandsstufe (Humusgehalt, Durchwurzelung, für Acker: auch Steingehalt), Humusangabe der Grablöcher¹⁵.

Die Bewertung des Zusammenhangs der Stoffgehalte von Arsen, Cadmium und Blei von der Bodenartenklasse anhand von Angaben der BK50 hat den Nachteil, dass die Bodenartenangaben aufgrund des mittleren Maßstabs der Karte mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. Sie wurde hier dennoch vorgenommen, da nur für einen kleinen Teil der Proben Laboranalysen der Korngrößenverteilung vorhanden sind und die Möglichkeit gesehen wurde, zumindest Anhaltspunkte für Zusammenhänge ermitteln zu können. Ein Einfluss auf die Variabilität der Arsen-, Blei- und Cadmiumgehalte in Oberböden deutet sich im Ergebnis der multivariaten Statistik zwischen Klassen der Sande, Schluffe und Tone an. Aus den Werteverteilungen sind jedoch keine gerichteten Unterschiede in der Höhe der Stoffgehalte zu erkennen (vgl. Abbildung 16). Vermutlich spiegeln die BK50-Bodenarten in zu geringem Maße die vor Ort-Bedingungen wider und/oder eventuell vorliegende Zusammenhänge sind von anderen Einflussfaktoren überlagert wie z. B. der Nähe zum Fluss und der Überflutungshäufigkeit. Diese Faktoren lassen sich auch in der Fläche abbilden, während eine flächendeckende und plausible Kartengrundlage für Bodenarten im Untersuchungsgebiet fehlt.

¹⁵ Bodenschätzflächen liegen für einen Teil des Untersuchungsgebietes vor (ca. 1/3 des Testgebietes Mitte und 2/3 des Testgebietes Nord sowie Flächen außerhalb der Testgebiete). Hier wurden die Werteverteilungen der untersuchten Stoffe mit Bodenart, Kulturart, Entstehung sowie Boden- und Zustandsstufe und Humus aus Grablöchern anhand von Boxplots verglichen. Die räumliche Verteilung der Bleigehalte in Abhängigkeit der abschlämmbaren Teilchen wurde zusätzlich in der Karte visuell geprüft, da Ton-Blei immerhin mit einem R^2 über 0,1 einen mäßigen Zusammenhang aufweist ($R^2 = 0,1908$). Die Prüfung ließ keine systematischen Abhängigkeiten im Raum erkennen. Die Definition der abschlämmbaren Teilchen wurde aus FINANZAMT GIEßEN (2011) übernommen.

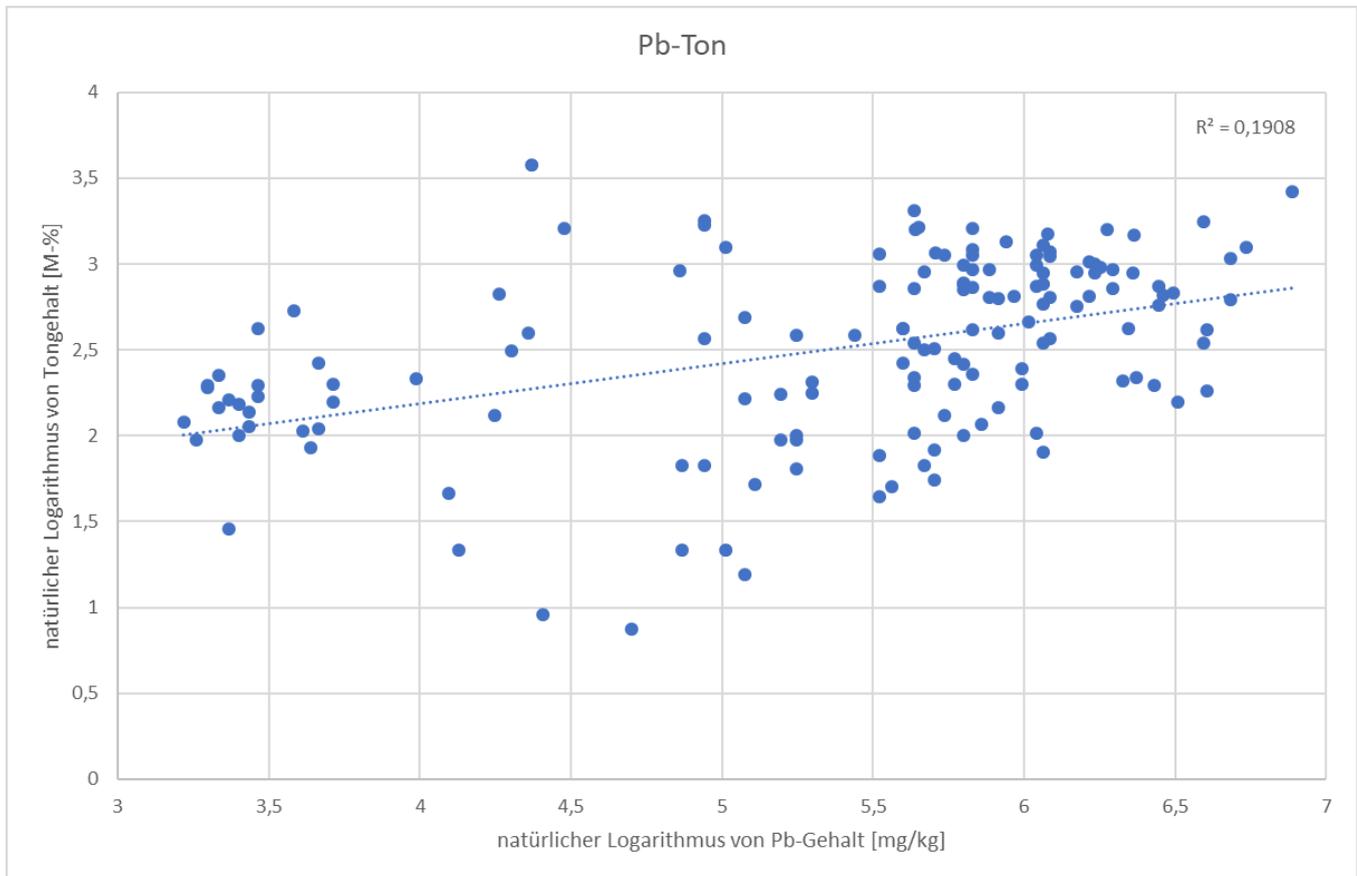


Abbildung 15: Gering ausgeprägte Korrelation der Bleigehalte mit Tongehalten im Oberboden an 151 Probenahmepunkten in den drei Testgebieten

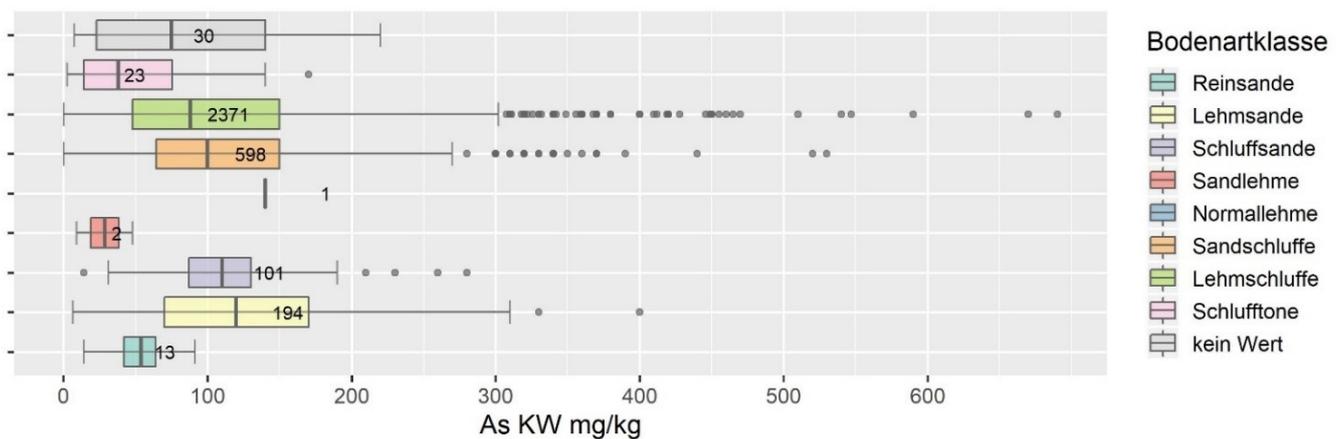


Abbildung 16: Vergleich der Arsengehalte in den Bodenartenklassen BK50 im Gesamtgebiet

Faktor eignet sich nicht zur Raumeinheitenbildung

Bestimmte Faktoren sind aus unterschiedlichen Gründen ungeeignet für eine Raumeinheitenbildung. Dies sind:

- HQ25/50 Gefahr/Intensität (ungünstige Flächenausprägung im Raster mit vielen Kleinstflächen, überlagert Höhe ü. Fluss und Altarmbereiche)
- HQ500 Intensität (ungünstige Flächenausprägung im Raster mit vielen Kleinstflächen, überlagert Altarmbereich (Altaue $\approx \geq 2$ m) und Höhe ü. Fluss)
- Raumeinheiten nach UBA (KASTLER ET AL. 2015) (ungeeigneter Maßstab und keine eindeutige Differenzierung der Stoffgehalte)
- Auentyp (KOENZEN 2005 bzw. BMU & BFN 2009) (zwei Klassen im Gesamtgebiet, in den Testgebieten jeweils nur eine Klasse)
- Einzugsgebiete der Nebengewässer (DLM1000) (ungeeigneter Maßstab)
- Lage in der Aue für Arsen und Blei (BEAK 2018) (keine maßgebliche Verbesserung gegenüber „Lage in der Aue für Cadmium“)
- Altlasten und Altablagerungen, Aufschüttungen und Abgrabungen (Punktdaten sind nicht geeignet für Raumeinheitenbildung)
- Bodenartklasse BK50 (ungeeigneter Maßstab).

Faktor eignet sich nach Zusammenfassung von Ausprägungen zur Raumeinheitenbildung

Ausprägungen (Attribute) von Faktoren (vgl. Tabelle 6) lassen sich aufgrund einer ähnlichen Werteverteilung zusammenfassen. Das sind:

- Auenbereich: Flussnahe Lage und Lage in rezenter Aue
- Altarmbereich: Gewässerbereich und ufernahe (rezente) Aue
- Anzahl Dämme: 1 bis 3 Dämme (im Folgenden als Faktor „Damm“ verwendet)
- Höhe ü. Fluss: > 5-10 m und > 10 m
- Nutzung: Parkanlage, Wohngebiet, Industrie.

Bei der Prüfung und Identifikation geeigneter Faktoren ist zu berücksichtigen, dass die Aussagen im Testgebiet Süd auf einem deutlich geringeren Stichprobenumfang basieren als in den Testgebieten Mitte und Nord.

6.4.3 Schlussfolgerungen

Im Ergebnis der statistischen Auswertung haben sich die Faktoren Flussabschnitte, Damm und Altarmbereich als die am besten geeigneten Faktoren erwiesen. Diese spiegeln die gemessenen Stoffgehalte von Arsen, Blei und Cadmium in den Oberböden des Untersuchungsgebietes in einer brauchbaren Differenzierung wider und eignen sich sowohl für alle drei Testgebiete als auch für das Gesamtgebiet.

Für den Einflussfaktor **Flussabschnitte** wurden die Geodaten basierend auf dem Auentyp nach KOENZEN (2005) bzw. BMU & BFN (2009) und den Einmündungen der Gewässer 1. Ordnung (Schwarzbach und Lossa) erstellt. Die Abschnittsgrenzen orientieren sich an Schlaggrenzen und am Deichverlauf. Querbauwerke sind nicht berücksichtigt, um die Anzahl der Abschnitte möglichst gering zu halten (vier Flussabschnitte¹⁶). Dieser Einflussfaktor gibt die naturräumlichen Veränderungen der Aue von Süd nach Nord wieder (z. B. auch die veränderte Auenmorphologie beim Übergang vom Lösshügelland in das Tiefland mit vergleichsweise hohen Stoffgehalten nördlich der Aufweitung der Aue am Übergang von Abschnitt Q1 und Q2 (vgl. Abbildung 13) und ermöglicht eine geeignete Gliederung des Vorhersagemodells im Flussverlauf.

¹⁶ Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Querbauwerke (Trebsen, WKW Golzermühle, Wehr Grimma) würde sich der Abschnitt Q1 im Süden des Untersuchungsgebietes in 4 weitere Teilabschnitte unterteilen.

Die Geodaten zur Lage in der Aue (Layer Cadmium) von BEAK (2018) sind die Grundlage für den Faktor **Damm** und wurden stellenweise an die realen Deichverläufe angepasst, basierend auf Luftbildern und einem digitalen Geländemodell (DGM2), da nicht unbedingt die realen Dammverläufe, sondern Dammbereiche dargestellt sind. Für den Layer Lage in der Aue wurden Dämme und jüngere bzw. ältere Flussschleifen kombiniert, um den Verlauf der Stoffgehalte zu beschreiben und dafür Bereiche auszuweisen. Die von BEAK erarbeiteten Layer des Geofaktors Lage in der Aue für Arsen und Blei wurden stichprobenhaft geprüft und nicht als Einflussfaktor genutzt, da sich der Layer für Cadmium am besten eignet, um die Stoffgehalte wiederzugeben (so auch in BEAK 2018 beschrieben).

Die **Altarmbereiche** von BEAK (2018) basieren auf einem DGM5 und weisen eine stärkere Differenzierung des Reliefs auf als der Faktor Höhe über dem Fluss. Die Gewässerbereiche im Altarmbereich-Layer beruhen auf den ATKIS-Daten der Nutzung. In großen Teilen entsprechen die Bereiche der „ufemahen Aue“ und der „jüngsten Altarmbereiche“ der „rezenten Aue“ aus dem Layer Auenbereich (BfN).

Nach detaillierter Betrachtung der Testgebiete wurde eine Kombination der drei beschriebenen Faktoren und ihrer Ausprägungen erarbeitet, die innerhalb der entstehenden Raumeinheiten eine möglichst homogene Verteilung der Schadstoffgehalte im Gesamtgebiet zeigt (siehe Kap. 6.5):

- Im gesamten Untersuchungsgebiet werden die Flächen mit den Attributen „flussnah (Gewässerbereiche und ufernahe Aue)“ (A1) und „ältere Altarmbereiche“ (A4) aus dem Layer Altarmbereich übernommen
- Im gesamten Untersuchungsgebiet werden Flächen mit dem Attribut „jüngste Altarmbereiche“ (A2) im Layer Altarmbereich mit dem Faktor Damm (D1, D2) kombiniert (Union)
- Im **zweiten Flussabschnitt** (Q2: Auentyp Kies/Flach- und Hügelland vor Mündung Lossa) werden Flächen des Altarmbereichs „am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche“ (A3) mit dem Faktor Damm (D1, D2) kombiniert.

Zu begründen ist dies damit, dass im Testgebiet Mitte ein Einfluss des Faktors Damm innerhalb des Altarmbereichs A3 für Cadmium festzustellen ist und die Dämme daher im Raumeinheitenmodell zu berücksichtigen sind.

Der Faktor Nutzung zeigt im Gesamtgebiet einen Einfluss auf die Gehalte von Arsen, Blei und Cadmium in den Oberböden, so auch im Testgebiet Nord. Im Testgebiet Mitte beschränkt sich der Einfluss auf Cadmium. Die Nutzung überlagert sich in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes mit dem Faktor Damm (Grünland ≈ kein Damm). Im Folgenden wird die Prüfung der Nutzung als Faktor im Raumeinheitenmodell dargestellt. Um eine zu starke Untergliederung von Flächen zu vermeiden, wird sie schließlich nicht als weiterer Faktor in die Bildung von Raumeinheiten einbezogen (siehe Kap. 6.5).

6.5 Homogene Raumeinheiten

Die Bildung und Darstellung homogener Raumeinheiten (RE) für das Vorhersagemodell erfolgte in drei Schritten mit Raumeinheiten in unterschiedlichen Varianten (RE-Modell 1, RE-Modell 2, RE-Modell 3). Einbezogen wurden diejenigen Einflussfaktoren, die in der Wirkungsuntersuchung einen Einfluss auf die Arsen-, Blei- und Cadmiumgehalte im Oberboden gezeigt haben und als geeignet bewertet wurden. In Tabelle 8 ist aufgeführt, welche Faktorenkombinationen in den einzelnen Schritten gewählt sowie in welchen (Test-) Gebieten und für welche Stoffe sie geprüft wurden. Es erfolgte ein Abgleich der durch statistische Kenngrößen (Median, Interquartilsabstand, 90. Perzentil) beschriebenen Raumeinheiten der Modelle 1, 2 und 3 mit den an den Untersuchungspunkten gemessenen Gehalten. Die Qualität des Modells wurde mit Hilfe des Stichprobenumfangs und einem einfachen Streuungsmaß der einzelnen Raumeinheiten untersucht (prozentualer halber Interquartilsabstand in Bezug auf den Median) und zwischen RE-Modell 1 und RE-Modell 3 (in zwei Varianten 3.1 und 3.2) vergleichend gegenübergestellt. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen leitet sich der Vorschlag für das finale RE-Modell 3.3 ab.

Raumeinheiten – Variante 1 (RE-Modell 1)

Zur Bildung des RE-Modells 1 wurden für jedes Testgebiet die jeweils am besten geeigneten Einflussfaktoren identifiziert und zu Raumeinheiten verschnitten (vgl. Tabelle 8). Sie bilden die mittleren Schadstoffgehalte und die Variabilität insbesondere in den Testgebieten Nord und Süd gut ab. Raumeinheiten mit geringer Variabilität wurden insbesondere für Cadmium gut herausgearbeitet. Defizite, d. h. Abweichungen zwischen den mittleren Schadstoffgehalten der Raumeinheit und der Messpunkte, zeigten sich im Testgebiet Mitte und punktuell auch im Testgebiet Nord.

Die einzelnen Flächen sind in diesem Modell teilweise sehr klein. Durch die Überlagerung der Altarmbereiche und Anzahl der Dämme in allen Faktorenausprägungen entstanden bei der Verschneidung fragmentarische Kleinstflächen, die im Vorhersagemodell nicht erwünscht sind. Der Faktor Nutzung wurde in den Testgebieten Süd und Mitte, der Faktor Höhe über Fluss in den Testgebieten Mitte und Nord nicht verwendet, da diese sich dort jeweils mit anderen gleichgerichteten Faktoren überlagern. Die einzelnen Raumeinheiten aus Altarmbereich und Dämmen weisen hier eine weitgehend einheitliche Nutzung auf. Im Vergleich mit den homogenen Raumeinheiten nach BEAK 2018 (Lage in der Aue/Dämme und Nutzung) haben die Raumeinheiten des RE-Modells 1 eine höhere räumliche Differenzierung, im Testgebiet Nord wurden hier ähnliche Faktoren genutzt wie in der Arbeit von BEAK (2018).

Raumeinheiten – Variante 2 (RE-Modell 2)

Für das RE-Modell 2 wurden in allen Testgebieten dieselben Einflussfaktoren genutzt und auf das Gesamtgebiet übertragen (vgl. Tabelle 8). Die Flussabschnitte dienen zur Gliederung des Untersuchungsgebietes im Längsverlauf, denn im Gesamtgebiet zeigt sich eine Abnahme der mittleren Arsen-, Blei- und Cadmiumgehalte in den Oberböden sowie deren Variabilität (vgl. Kap. 6.4). Der zweite Abschnitt Q2 weist wiederum höhere Gehalte und eine stärkere Streuung auf (vgl. Abbildung 13). Erklärbar ist dies durch abnehmende Fließgeschwindigkeiten insbesondere bei Hochwasserereignissen in diesem Abschnitt nach Aufweitung des Auenquerschnitts mit deutlich größeren Flächen, die von HQ25 und HQ50 betroffen sind, und eine dadurch vermehrte – aber auch in der Fläche unterschiedlich ausgeprägte – Sedimentation von schadstoffbefrachtetem Bodenmaterial bei verringerten Fließgeschwindigkeiten.

Tabelle 8: Schritte der Raumeinheitenbildung

	Gebiet	Stoffe	Berücksichtigte Faktoren	Anzahl RE
RE-Modell 1	Testgebiet Süd	As, Cd, Pb	Höhe ü. Fluss H	2
	Testgebiet Mitte	As, Cd, Pb	Altarmbereich A Damm D	8
	Testgebiet Nord	As, Cd, Pb	Nutzung N Altarmbereich A Damm D	23
RE-Modell 2	alle Testgebiete und Gesamtgebiet	As, Cd, Pb	Flussabschnitte Q Altarmbereich aggregiert in vier Klassen A Damm angepasst, aggregiert in zwei Klassen D	31
RE-Modell 3.1	alle Testgebiete und Gesamtgebiet	As, Pb	Flussabschnitte Q Altarmbereich aggregiert in vier Klassen A	15
RE-Modell 3.2	alle Testgebiete und Gesamtgebiet	Cd	Flussabschnitte Q Altarmbereich A1, A3, A4 A2 + Damm in Q2: A3 + Damm	21
RE 3.3-Modell final	alle Testgebiete und Gesamtgebiet	As, Cd, Pb	Altarmbereich A1, A3, A4 A2 + Damm in Q2: A3 + Damm	7

Im Layer Altarmbereich wurden Flächen mit den Attributen „Gewässerbereiche“ und „ufernahe Aue“ zur Einheit „flussnah“ zusammengefasst, da die in Flächen des „Gewässerbereichs“ verorteten Bodenuntersuchungen (n=29 im Gesamtgebiet) im ufernahen Bereich durchgeführt worden sind und sich deren Arsen-, Blei- und Cadmium-Gehalt weitgehend in die Werteverteilungen der benachbarten Flächen der „ufernen Aue“ einordnen. Der Einflussfaktor Anzahl Dämme wurde für das RE-Modell 2 anhand von Luftbildern und dem digitalen Geländemodell an die realen Dammverläufe angepasst (vgl. Kap. 6.3) und in zwei Klassen zum Faktor Damm aggregiert („kein Damm“, „mindestens 1 Damm“).

Das Problem, dass sich der Faktor Damm und die Altarmbereiche an vielen Stellen überlagern und die Grenzen leicht voneinander abweichen, bestand in RE-Modell 2 weiterhin. Daher wurde geprüft, ob und in welchen Bereichen einer der beiden Faktoren verzichtbar ist. Der Faktor Damm ist vor allem für Cadmium erforderlich, um die Flächen der Altarmbereiche A2 (jüngste Altarmbereiche) und A3 (am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche) weiter zu unterteilen und die Stoffverteilung bestmöglich darzustellen. Für Blei und Arsen wäre dieser Faktor verzichtbar, wirkt sich aber auch nicht negativ auf das Vorhersagemodell aus, da für alle Teilflächen Messpunkte in ausreichender Anzahl vorliegen.

Raumeinheiten - Variante 3 (RE-Modell 3)

Das RE-Modell 3 und damit auch das Modell 3.3 als finales Raumeinheitenmodell wurden optimiert, indem die räumliche Komplexität der entstehenden Flächen und die Gliederung des Datenbestands in homogene Teilkollektive gegeneinander abgewogen wurden. Das Entstehen von Kleinstflächen wurde deutlich reduziert. Die RE-Modelle 3.1 und 3.2 unterscheiden sich stoffspezifisch für Arsen/Blei gegenüber Cadmium (vgl. Tabelle 8). Der Ansatz wurde dann jedoch wieder verworfen, da für die Raumeinheiten des Modells 3.1 in Teilbereichen des Testgebietes Mitte die Unsicherheiten höher waren als im RE-Modell 1. Stattdessen kann das für Cadmium entwickelte Modell 3.2 auch auf Arsen und Blei übertragen werden. Die Kombination der

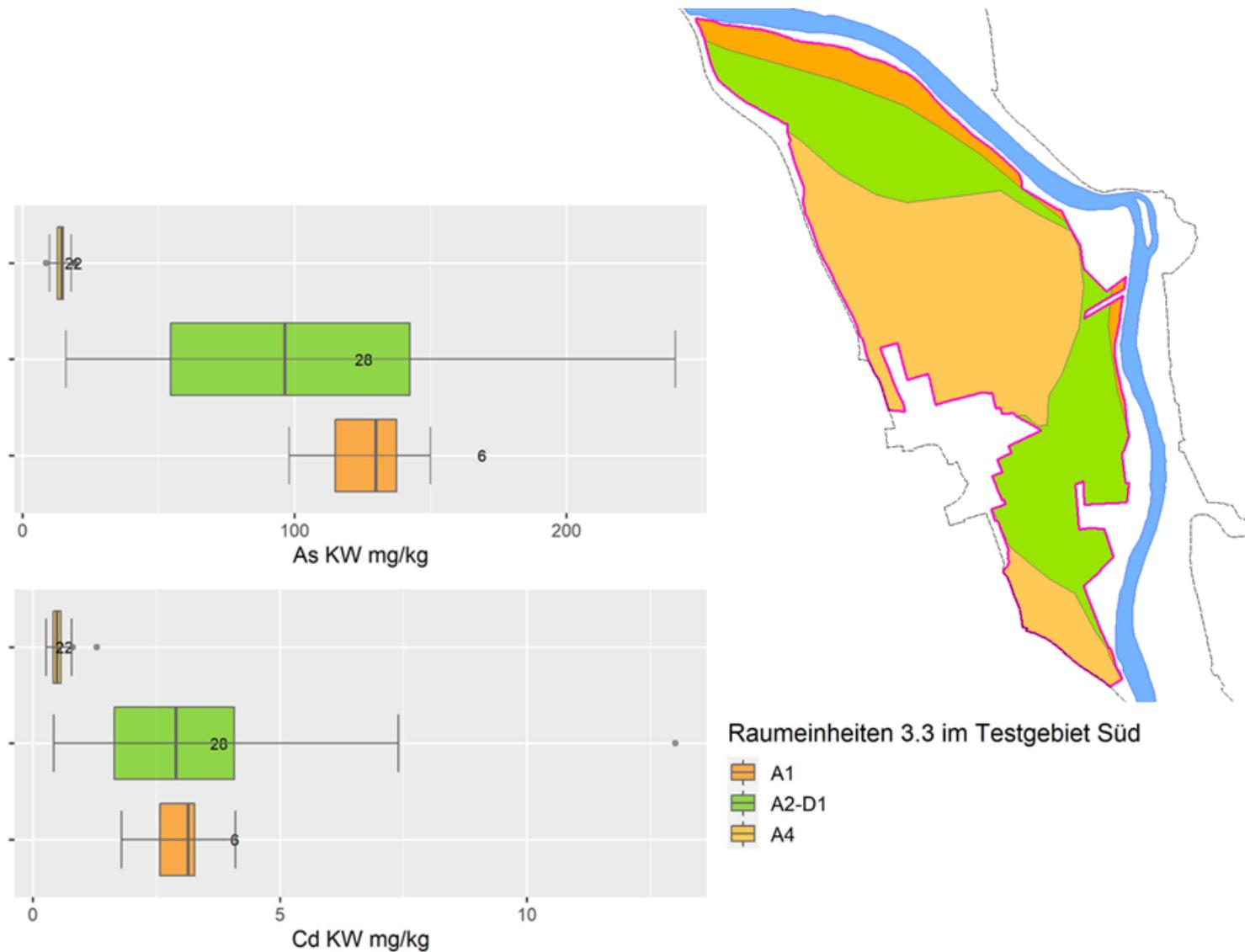
Faktoren Altarmbereiche und Damm mit gesonderter Behandlung des Flussabschnitts Q2 erwies sich als am besten geeignet, um die Schadstoffgehalte in den Testgebieten und auch im Gesamtgebiet abzubilden (siehe Abbildung 17 bis Abbildung 20).

Im Gesamtgebiet werden Flächen mit geringer Streuung der Arsen-, Blei- und Cadmiumgehalte besonders für Cadmium in den flussferneren Bereichen gut abgegrenzt („ältere Altarmbereiche“ A4 in allen Flussabschnitten oder „am weitesten vom Fluss entfernte“ Bereiche A3 im nördlichen Drittel des Untersuchungsgebietes (vgl. Abbildung 20, Boxplot Cadmium)). Im Gesamtgebiet wird besonders für Cadmium, aber auch für Arsen und Blei, der Mehrwert des Flussabschnitts Q2, der sich nördlich an den Übergang vom Lösshügelland in das Tiefland anschließt (vgl. Abbildung 13), für die Differenzierung der Stoffgehalte deutlich. In Abbildung 20 ist erkennbar, dass die „am weitesten vom Fluss entfernten“ Bereiche, die außerhalb des Flussabschnitts Q2 liegen, (Raumeinheit A3) eine geringe Variabilität aufweisen. Innerhalb des Flussabschnitts Q2 ist die Variabilität – vermutlich aufgrund der veränderten Sedimentationsbedingungen nach Aufweitung der Aue – recht hoch und kann durch die Berücksichtigung der Dämme und Bildung der Raumeinheiten A3-D1 sowie A3-D2 weiter differenziert werden. In den Testgebieten sind für große Flächenanteile die Unsicherheiten der Vorhersagequalität vergleichsweise gering, wenn 50 % des Wertebereichs als Maß verwendet wird ($IQA/2 < 50$ % des Medians), ähnlich wie bereits im RE-Modell 1. Das RE-Modell 3 eignet sich für die Anwendung auf das gesamte Untersuchungsgebiet.

Im finalen RE-Modell 3.3 werden die Flächen mit den Attributen „flussnah (Gewässerbereiche und ufernahe Aue)“ (A1) und „ältere Altarmbereiche“ (A4) aus dem Layer Altarmbereich übernommen. Das Attribut des Altarmbereichs „jüngste Altarmbereiche“ (A2) wird im Gesamtgebiet mit dem Faktor Damm (D1, D2) und das Altarmbereich-Attribut „am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche“ (A3) im zweiten Flussabschnitt (Q2: Auentyp Kies/Flach- und Hügelland vor Mündung Lossa) mit dem Faktor Damm (D1, D2) kombiniert. Mit der gesonderten Behandlung des mittleren Flussabschnitts Q2 wird eine höhere Vorhersagequalität erreicht, da auf diese Weise die stark variablen Bereiche im zweiten Flussabschnitt Q2 (Testgebiet Mitte) nicht auf andere Flussabschnitte wirken. Der Einfluss der Dämme zeigt sich in den jüngsten Altarmbereichen (A2) im Untersuchungsgebiet nicht nur in einem Abschnitt, sondern im gesamten Auenverlauf. Daher wird hier mit dem Faktor Damm nochmals untergliedert.

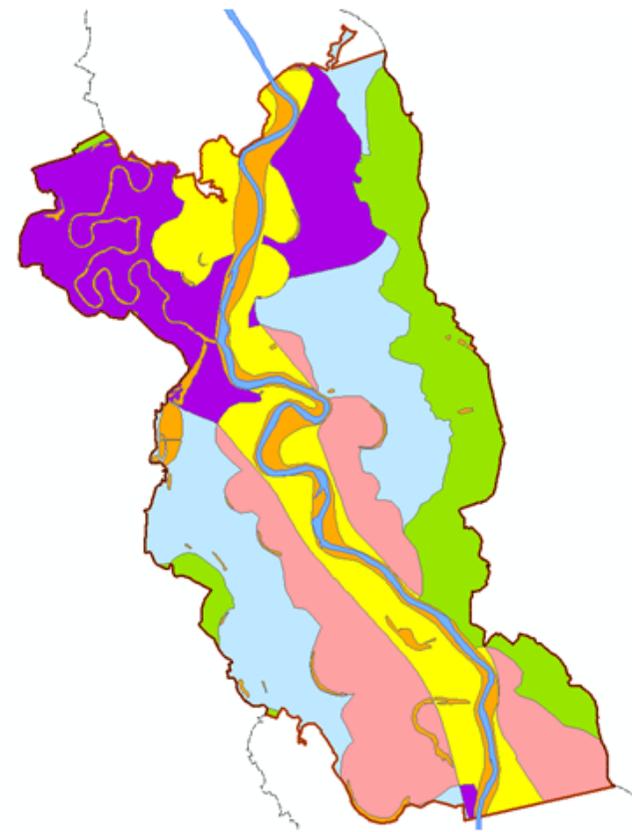
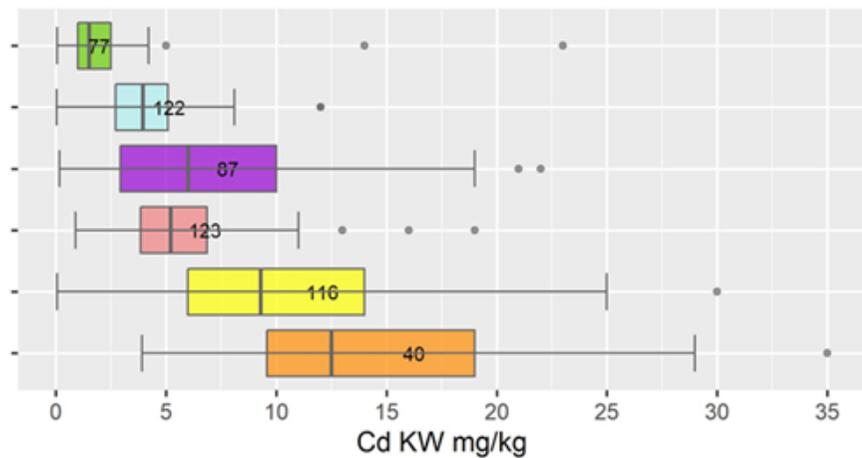
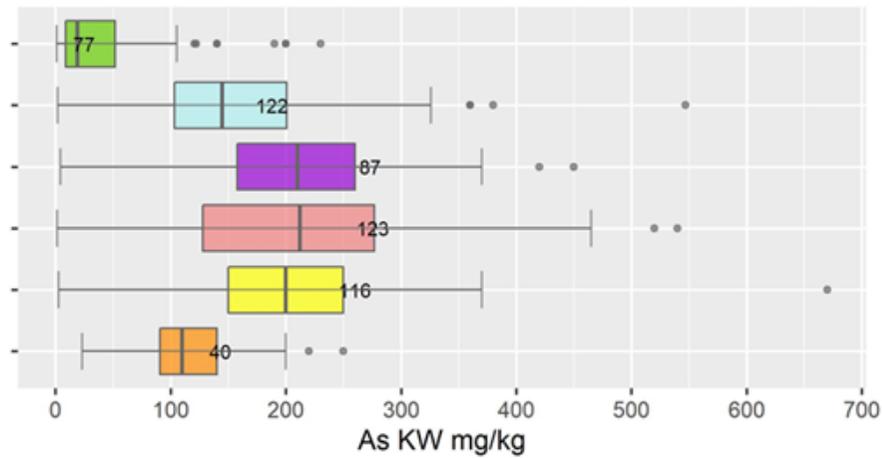
Die Karten des RE-Modells 3.3 sind in Abbildung 17 bis Abbildung 20 für die Testgebiete und das Gesamtgebiet dargestellt. Auch wenn in den Karten für die Testgebiete aus technischen Gründen für eine Zuordnung der Flächen zu den Boxplots unterschiedliche Farbsignaturen für die jeweiligen Raumeinheiten verwendet werden, handelt es sich bei allen Raumeinheiten durchgängig um Flächen gleicher Definition.

In den Werteverteilungen der drei betrachteten Stoffe im Gesamtgebiet (vgl. Abbildung 20) zeichnet sich ab, dass Arsen und Blei sich in der Fläche ähnlich verhalten und sich in ihren Werteverteilungen deutlich von Cadmium unterscheiden. So findet sich in den Raumeinheiten A2-D2 und A4 eine deutlich stärkere Streuung der Arsen- und Bleigehalte im Vergleich zu den Cadmiumgehalten. Zudem sind die mittleren Gehalte von Cadmium in der Raumeinheit A1 im Vergleich zu den angrenzenden Raumeinheiten höher, während jene von Arsen und Blei unter den mittleren Gehalten der an A1 angrenzenden Raumeinheiten liegen.



A1: flussnah; A2: jüngste Altarmbereiche; A4: ältere Altarmbereiche; D1: kein Damm zum Fluss.

Abbildung 17: RE-Modell 3.3 im Testgebiet Süd mit Werteverteilungen von Arsen und Cadmium im Oberboden

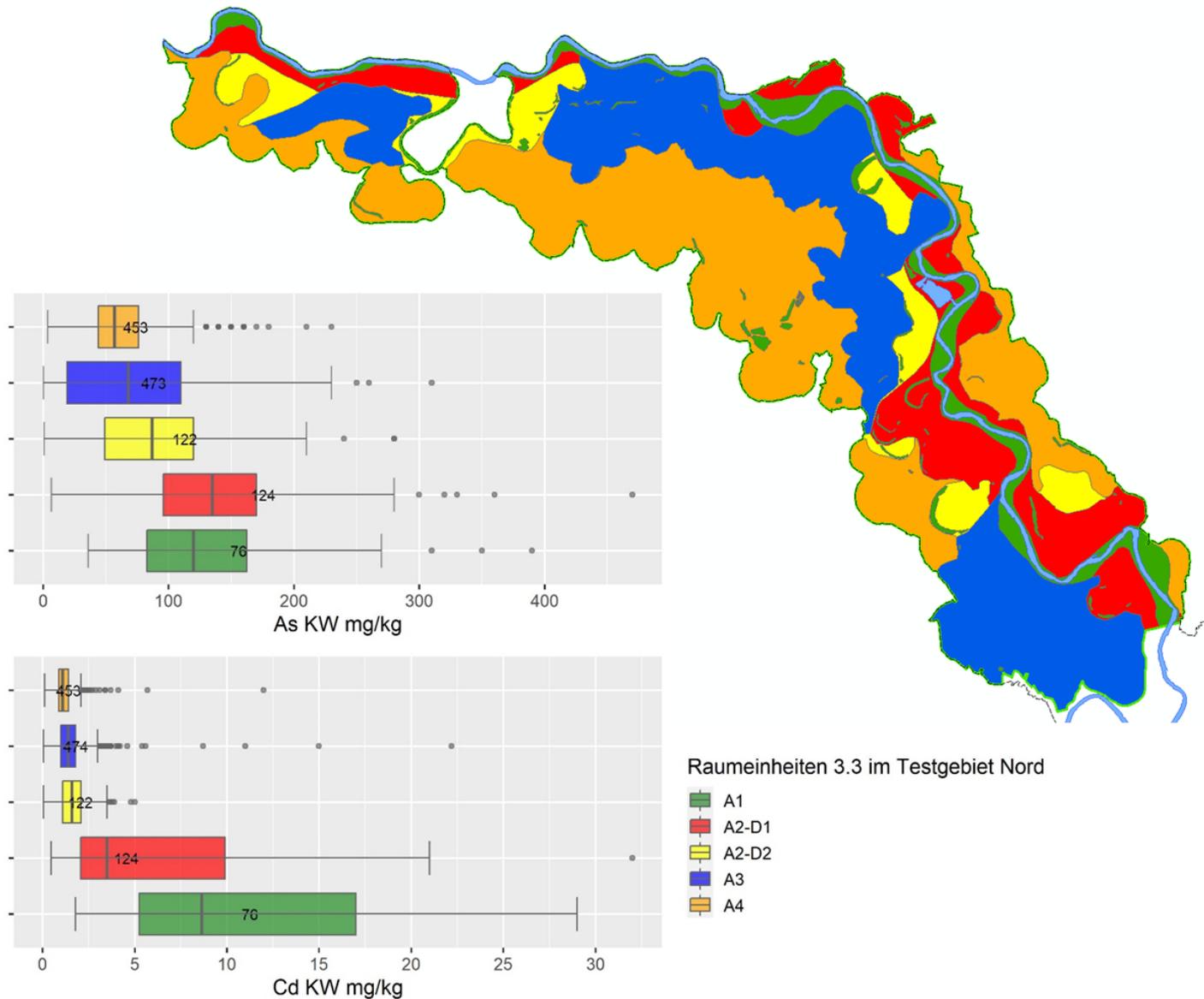


Raumeinheiten 3.3 im Testgebiet Mitte

- A1
- A2-D1
- A2-D2
- A3-D1
- A3-D2
- A4

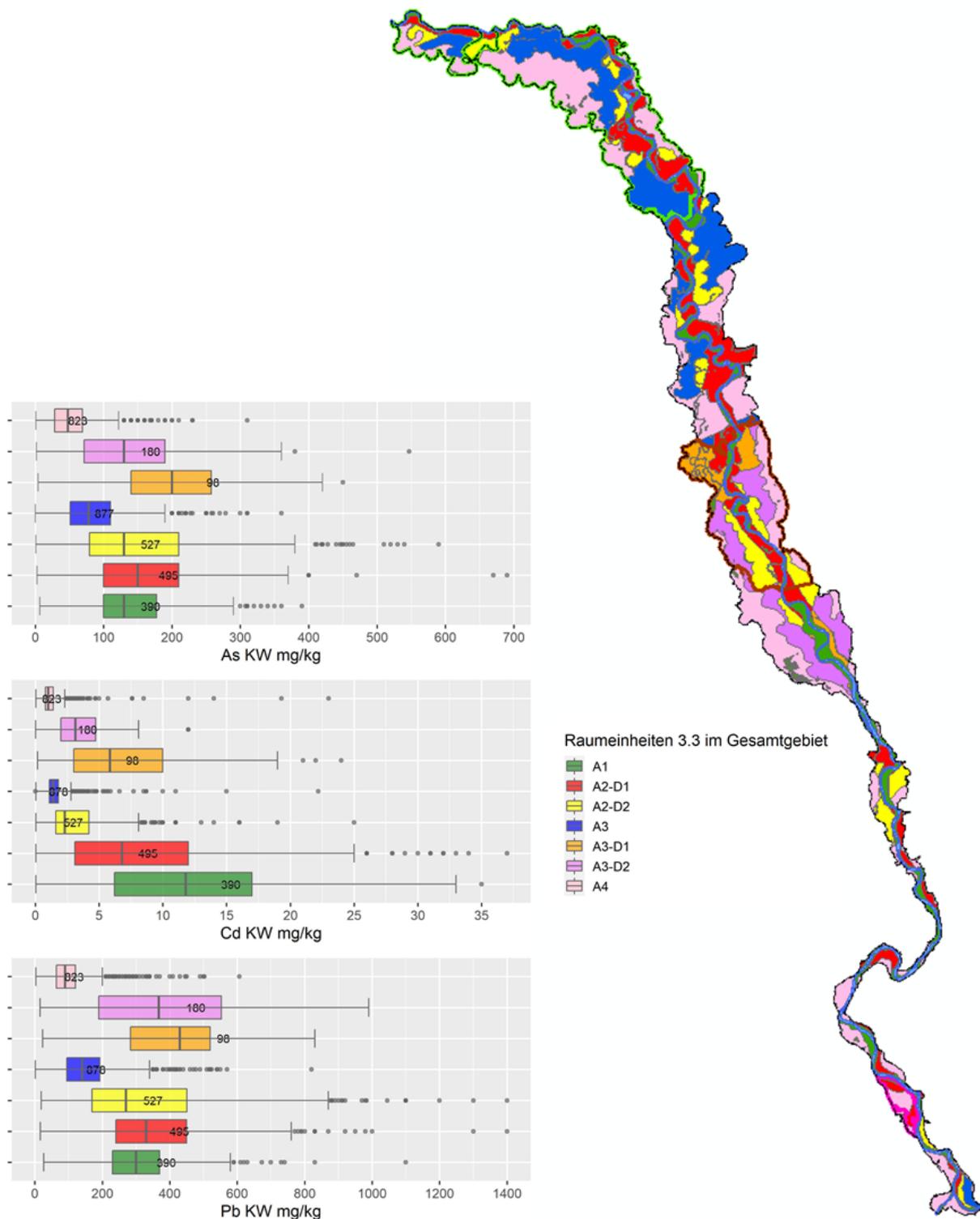
A1: flussnah; A2: jüngste Altarmbereiche; A3: am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche; A4: ältere Altarmbereiche; D1: kein Damm zum Fluss; D2: mind. ein Damm zum Fluss

Abbildung 18: RE-Modell 3.3 im Testgebiet Mitte mit Werteverteilungen von Arsen und Cadmium im Oberboden



A1: flussnah; A2: jüngste Altarmbereiche; A3: am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche; A4: ältere Altarmbereiche;
D1: kein Damm zum Fluss; D2: mind. ein Damm zum Fluss

Abbildung 19:RE-Modell 3.3 im Testgebiet Nord mit Werteverteilungen von Arsen und Cadmium im Oberboden



A1: flussnah; A2: jüngste Altarmbereiche; A3: am weitesten vom Fluss entfernte Auenbereiche; A4: ältere Altarmbereiche; D1: kein Damm zum Fluss; D2: mind. ein Damm zum Fluss

Abbildung 20: RE-Modell 3.3 im Gesamtgebiet mit Werteverteilungen von Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden

Die Flächennutzung wird aufgrund der Erkenntnisse aus dem RE-Modell 1 nicht als differenzierender Faktor berücksichtigt, da – mit Ausnahme der flussfernen Flächen (A4) – die Raumeinheiten aus Altarmbereich und Anzahl Dämme zu überwiegenden Anteilen eine einheitliche Nutzung aufweisen (siehe Tabelle 9). So wird auch eine weitere Untergliederung von Flächen vermieden und ein geeigneter – nicht zu hoher – Differenzierungsgrad von Einzelflächen gewährleistet.

Tabelle 9: Flächennutzung in den Raumeinheiten des Modells 3.3 im Gesamtgebiet

RE-Modell 3.3	Fläche [km ²]	Acker [%]	Grünland [%]	Wald [%]	Sonstige* [%]
A1	11,8	4	89	5	2
A2-D1	18,9	15	77	6	1
A2-D2	13,2	62	22	12	4
A3	19,7	70	15	9	6
A3-D1	4,2	24	64	11	1
A3-D2	10,3	57	20	11	12
A4	35,8	51	20	10	19

* Industrie- und Gewerbegrundstücke; Park- und Freizeitanlage; Wohngebiet mit Haus- und Kleingarten sowie Kinderaufenthalt

Nach den durchgeführten Auswertungen steht kein weiterer im Gesamtgebiet räumlich abgrenzbarer Faktor zur Verfügung, der die Variabilität innerhalb von Raumeinheiten weiter verringern kann und gleichzeitig zu einem vertretbaren Differenzierungsgrad führt. Das RE-Modell 3.3 eignet sich für alle drei betrachteten Stoffe und arbeitet mit der Differenzierung im zweiten Flussabschnitt die Besonderheiten der flächenhaften Verteilung von Cadmium in den Oberböden heraus.

Die einzelnen Raumeinheiten des RE-Modells 3.3 weisen im Gesamtgebiet eine Flächengröße von 4,2 bis zu 35,8 km² auf. Sie beinhalten jeweils zwischen 3 und 60 Einzelflächen (single part features), von denen meist die Hälfte oder mehr mit Probenahmestandorten belegt sind. Nicht alle Einzelflächen weisen dabei eine betrachtungsrelevante Flächengröße von mindestens 100 m² auf (Splitterpolygone). Die Anzahl von Probenahmestandorten je Raumeinheit liegt mindestens bei 98 (A3-D1) und höchstens bei 878 (A3) (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Teilflächen des Raumeinheitenmodells 3.3 im Gesamtgebiet

RE-Modell 3.3	Fläche [km ²]*	Anzahl Standorte	Anzahl Teilflächen (davon > 100 m ²)	Anzahl Teilflächen mit Probenahmestandorten	Anzahl Teilflächen ohne Probenahmestandorte
A1	11,8	385	1	1	0
A2-D1	18,9	495	50 (46)	39	11
A2-D2	13,2	527	41 (31)	21	20
A3	19,7	878	15 (12)	10	5
A3-D1	4,2	98	14 (12)	6	8
A3-D2	10,3	180	9 (8)	4	5
A4	35,8	823	60 (55)	28	32

* ohne ATKIS-Gewässerflächen

In den sich entlang des Gewässerlaufs erstreckenden Raumeinheiten deuten sich stetige Veränderungen der Stoffgehalte in den Oberböden an (vgl. Kap. 6.4). Dieser im Flussverlauf abnehmende Trend der Stoffgehalte sollte im Vorhersagemodell berücksichtigt werden. Sprunghafte Abnahmen am Ende der Abschnitte sind nicht erkennbar. Die stetigen Veränderungen im Flussverlauf sind besser mit Hilfe einer Interpolation innerhalb von Raumeinheiten in der Fläche vorherzusagen, anstatt die Raumeinheiten im Gesamtgebiet in vier Flussabschnitte zu untergliedern (vgl. Kap. 6.6).

6.6 Ergebniskarten

Um geeignete Methoden zur Vorhersage von Stoffgehalten im Oberboden der Aue der Vereinigten Mulde zu entwickeln, wurden auf der Basis des in Kapitel 6.5 beschriebenen Raumeinheitenmodells verschiedene Ansätze untersucht. Neben einer Kennzeichnung von Raumeinheiten mit statistischen Kenngrößen erfolgten Interpolationen in Raumeinheiten. Die Ansätze wurden zunächst in den drei Testgebieten erprobt und schließlich auf die gesamte Flussaue der Vereinigten Mulde übertragen.

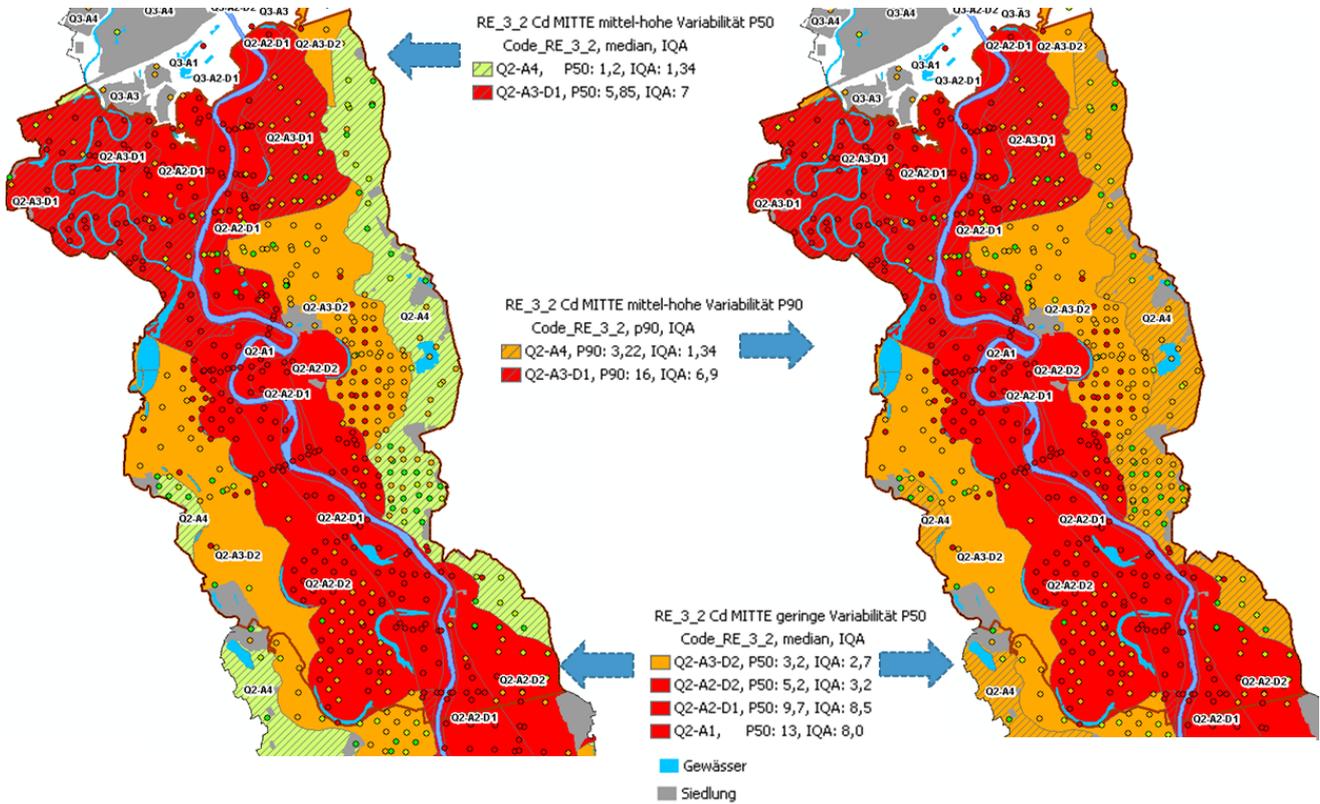
6.6.1 Kennzeichnung von Raumeinheiten mit statistischen Kenngrößen

Indem die homogenen Raumeinheiten mit dem Median der darin gemessenen Stoffgehalte gekennzeichnet werden, lässt sich die Höhe der im Mittel zu erwartenden Schadstoffgehalte für die Raumeinheitenfläche vorhersagen (50 % der Werte liegen voraussichtlich darüber, 50 % der Werte darunter). Voraussetzung ist ein ausreichender Stichprobenumfang pro Raumeinheit ($n \geq 20$). Dieser ist in allen Raumeinheiten, bezogen auf das Gesamtgebiet, gegeben ($n = 98$ bis 878 , vgl. Tabelle 10). Statistische Kenngrößen für die Gehalte von Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden sind in Tabelle 11 angegeben. Die Kenngrößen und die Karten bestätigen, dass das RE-Modell 3.3 für alle drei Stoffe geeignet ist. Es spiegelt die Unterschiedlichkeit der Stoffe im mittleren Flussabschnitt wider (vgl. Anlage A 4).

Je geringer die Variabilität der Messwerte in einer Raumeinheit ist, desto höher ist die Treffsicherheit bzw. die Vorhersagequalität in der Ergebniskarte. Als einfaches Variabilitätsmaß dient der halbe Interquartilsabstand in Prozent des Medians (IQA/2 in %). Er gibt an, um wieviel Prozent des Medians die Hälfte der in der Raumeinheit gemessenen Werte um den Median nach oben und unten abweichen ($IQA_{\text{halb}}/\text{Median} \cdot 100$). Auf die gleiche Weise lassen sich andere Kenngrößen nutzen, wie z. B. das 75. oder 90. Perzentil. Diese liefern dann Aussagen darüber, dass $\frac{3}{4}$ bzw. 90 % der Werte in der Raumeinheit unterhalb des angegebenen Wertes erwartet werden. Das 90. Perzentil ist für Raumeinheiten mit starker Streuung besser geeignet als das 75. Perzentil, um die Werteverteilung nach oben hin ausreichend wiederzugeben.

In Abbildung 21 sind Ergebniskarten für Cadmium im Testgebiet Mitte dargestellt, die zum Zweck der Methodenentwicklung beispielhaft anhand des RE-Modells 3.2 erarbeitet wurden. Wenn der halbe Interquartilsabstand 50 % des Medians überschreitet, zeigt dies eine vergleichsweise hohe Unsicherheit für die Mediandarstellung an und die Flächen sind schraffiert. In der Abbildung links wird allen Raumeinheiten der Median der darin gemessenen Stoffgehalte zugeordnet und nach der Legende in Tabelle 2.1 (Anlage A 2) (Quartile im Untersuchungsgebiet) eingestuft. In der Abbildung rechts wird das 90. Perzentil zur Vorhersage der Stoffgehalte in Raumeinheiten mit hoher Unsicherheit verwendet¹⁷. Der Vergleich der auf die gleiche Weise klassifizierten Punkte mit den dahinterliegenden Flächen zeigt nur zum Teil gute Übereinstimmungen (z. B. in den Raumeinheiten Q2-A4 westlich der Mulde oder im Q2-A3-D1 im Nordwesten). Abweichungen zwischen Punkt und Fläche sind in allen Raumeinheiten erkennbar. Die Karte, die den Median für die Raumeinheiten hoher Unsicherheit verwendet (links), spiegelt die Messpunkte wie erwartet besser wider als die Karte rechts mit den 90. Perzentilwerten; hier wird der flächenhaft angegebene Stoffgehalt in vielen Teilflächen überschätzt, so dass sich eine Ableitung von Maßnahmen im Bodenschutz-Vollzug nicht darauf stützen kann.

¹⁷ Das 75. Perzentil wurde hier nicht verwendet, weil es in einigen Raumeinheiten (z. B. Q2-A3-D1) die in großer Häufigkeit (ca. 20 Werte) im oberen Quantil der Verteilung vorliegenden Werte nicht widerspiegelt.



		Cadmium [mg/kg]
dunkelgrün	≤ P25	≤ 1,1
hellgrün	≤ P50	> 1,1 – 1,8
orange	≤ P75	> 1,8 – 4,9
rot	> P75	> 4,9 – 37,0

Abbildung 21: Varianten von Ergebniskarten mit statistischen Kenngrößen für Cadmium im Testgebiet Mitte (links: Median, rechts: 90. Perzentil bei IQA/2 > 50 % des Medians)

Tabelle 11: Statistische Kenngrößen [mg/kg] für das finale Raumeinheitenmodell 3.3 im Gesamtgebiet

	RE 3.3	n	P10	P25	Median	P75	P90	P95	IQA	IQA/2 in % des Medians	Min	Max
As	A1	390	74	100	130	178	220	260	78	30	7	390
	A2-D1	495	68	100	150	210	269	300	110	37	3	690
	A2-D2	527	43	80	130	210	284	358	131	50	1	590
	A3	877	9	51	78	110	140	172	59	38	0	360
	A3-D1	98	87	140	200	258	293	323	118	30	4	450
	A3-D2	180	17	72	130	190	250	290	119	46	2	547
	A4	823	13	29	48	69	99	120	41	43	1	310
Cd	A1	390	3,4	6,2	12	17	22	27	11	46	0,05	35,0
	A2-D1	495	1,8	3,1	6,8	12	18	21	8,9	64	0,05	37,0
	A2-D2	527	1,1	1,6	2,3	4,2	6,5	8,2	2,6	57	0,05	25,0
	A3	878	0,7	1,1	1,4	1,8	2,6	3,5	0,7	25	0	22,2
	A3-D1	98	2,1	3,0	5,9	10	16	17	7,0	59	0,17	24,0
	A3-D2	180	1,1	2,0	3,2	4,7	5,8	6,5	2,7	42	0,03	12,0
	A4	823	0,5	0,8	1,0	1,4	1,9	2,7	0,6	30	0,05	23,0
Pb	A1	390	170	230	300	370	450	516	140	23	26	1100
	A2-D1	495	150	240	330	450	590	686	210	32	17	1400
	A2-D2	527	98	170	270	451	704	813	282	52	19	1400
	A3	878	59	95	140	193	260	322	98	35	2	820
	A3-D1	98	200	283	430	520	613	650	237	28	23	830
	A3-D2	180	83	189	368	553	670	733	364	49	16	990
	A4	823	35	64	90	120	190	249	56	31	3	606

Grau: hohe Unsicherheit (IQA/2 in % des Medians > 50 %)

6.6.2 Interpolation in Raumeinheiten

Die Interpolation liefert Schätzwerte in einem Raster mit festgelegter Zellweite. Geostatistische Methoden leiten aus räumlich verteilt erhobenen Daten Erkenntnisse über deren räumliche Variationsstruktur ab und beschreiben diese mathematisch (SCHAFMEISTER 1999). In einer geostatistischen Interpolation wird die räumliche Autokorrelation genutzt, die vorliegt, wenn räumlich nah beieinander liegende Werte ähnlich sind, die Ähnlichkeit der Werte aber mit zunehmendem Abstand – gegebenenfalls richtungsabhängig – abnimmt. Abhängigkeiten der betrachteten Größe zu bestimmten Einflussfaktoren müssen vor der Interpolation berücksichtigt werden. So darf über linienhafte Strukturen, an denen Stoffgehalte sich sprunghaft verändern – z. B. Dämme – nicht ohne weiteres hinweg interpoliert werden. Diese Anforderung wird berücksichtigt, indem vor der Anwendung des Verfahrens eine Raumstrukturanalyse wie in Kapitel 6.4 und 6.5 beschrieben durchgeführt und dann innerhalb von homogenen Raumeinheiten interpoliert wird, für die jeweils ähnliche Erosions- und Sedimentationsbedingungen angenommen werden.

Eingesetzt wurde ein Kriging-Verfahren. Die Grundlage von Kriging-Verfahren bilden regionalisierte Zufallsvariablen, die neben der zu schätzenden Werteoberfläche auch Angaben zu deren lokaler Qualität, d. h. zur Schätzgüte, ergeben. Die Stoffgehalte des Bodens werden an den nicht beprobten Orten mit Hilfe von gewichteten Mittelwerten der benachbarten Messwerte geschätzt. Für den Schätzvorgang wird dabei ange-

nommen, dass die benachbarten Werte eine Information über den zu schätzenden Wert beinhalten (HINTERDING & STREIT 2001). Auf eine Untersuchung der räumlichen Autokorrelation der vorliegenden Daten wurde hier verzichtet und diese als vorliegend vorausgesetzt. BEAK (2018) haben im selben Untersuchungsgebiet die Datenkollektive von fünf homogenen Raumeinheiten für Arsen, Blei und Cadmium einer statistischen Untersuchung und Variographie unterzogen (siehe dort S. 62f.). Da ein Kriging-Verfahren (Universal Kriging, sphärisch) eingesetzt wurde, ist davon auszugehen, dass eine Autokorrelation nachgewiesen werden konnte. Bei drei Arsen-Datenkollektiven wurde dort ein globaler linearer Trend berücksichtigt.

Der hier verfolgte Ansatz hat nicht den Anspruch, ein mathematisches Interpolationsmodell zu optimieren. Vielmehr wird untersucht, ob ein einfaches, mit vergleichsweise geringem Aufwand und mit einem Minimum an Spezial-Software durchführbares Verfahren geeignete Ergebnisse liefert und wie diese im Vergleich zu einer Zuordnung von statistischen Kenngrößen zu Raumeinheiten zu beurteilen sind. Auch kann das Raumeinheitenmodell mit Hilfe der Interpolationsergebnisse validiert werden. Tests mit verschiedenen Kriging-Modellen (Ordinary sphärisch, Ordinary linear, Universal Linear) im Testgebiet Mitte anhand von Arsen zeigten sehr geringe Unterschiede im Schätzergebnis und diese stets nur innerhalb kleiner Teilflächen, wo die Punktdichte der Bodenuntersuchungen gering ist.

Zur Bewertung der Qualität der geschätzten Kriging-Ergebnisse wurden diese mit dem räumlichen Muster der Stoffgehalte an den Untersuchungspunkten verglichen. Klassifiziert wurde dabei etwas differenzierter als bisher, indem zusätzlich zu statistischen Kenngrößen auch Referenzwerte berücksichtigt sind (siehe Tabellen 2.2, 2.3 und 2.4 in Anlage A 2). So lässt sich besser beurteilen, ob eine Veränderung der Schätzergebnisse im Hinblick auf Vollzugsfolgen relevant ist. Weiterhin diente die Schätzgüte des Kriging zur Beurteilung der räumlichen Schätzung. Als Maß für die Vorhersagequalität diente das Vertrauensintervall in mg/kg, berechnet aus der Ausgabevarianz¹⁸. Umgesetzt wurde die Interpolation für Arsen und Cadmium mit dem Spatial Analyst in ArcGIS in einem 25 x 25 m-Raster. Als Testkulisse dienten das RE-Modell 3.1 (Flussabschnitte, Altarmbereich) und das RE-Modell 3.2 (Flussabschnitte, Altarmbereich, Damm), jedoch jeweils bereinigt um die Untergliederung in Flussabschnitte.

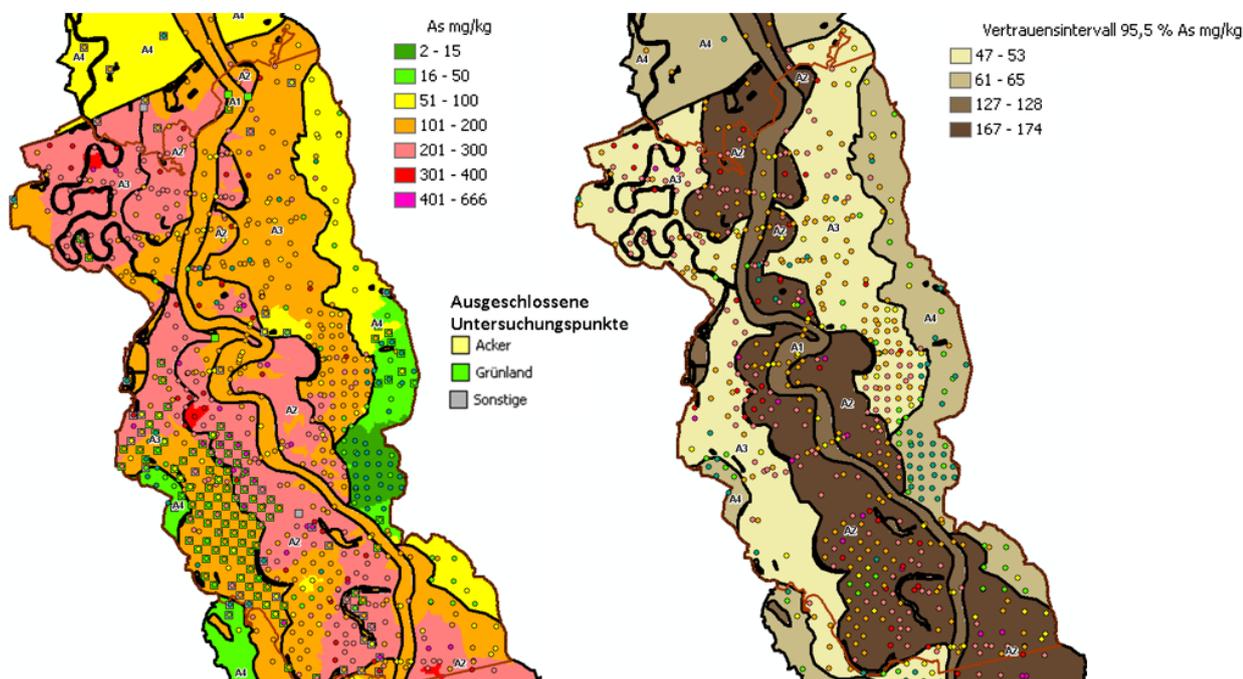
Eine Interpolation innerhalb von Raumeinheiten erfordert folgende Arbeitsschritte:

- Einladen von Untersuchungspunkten mit Stoffdaten (Punkt) und einer Raumeinheiten-Karte (Polygon) in ein GIS-Projekt
- Erstellen eines Layers der Untersuchungspunkte mit den Attributen Stoffgehalt („value_“) und „Raumeinheiten-Code“ (*Toolset Overlay, Räumliche Verbindung von Punkt und Fläche*)
- Erstellen je eines Punkt-Layers für jede Raumeinheit (*Definitionsabfrage und Export in neuen Punktlayer*)
- Erzeugen von Polygon-Layern der einzelnen Raumeinheiten mit 25 m-Puffer (*Definitionsabfrage, Buffer*)
- Interpolation in einzelnen Raumeinheiten (Spatial Analyst Toolset Interpolationen, Kriging)
- Definition der Verarbeitungsumgebung für die Interpolation: 25 m Zellgröße, Fangraster verwenden (z. B. erstes Interpolationsergebnis für alle Nachfolgenden), Raumeinheit als Maske verwenden (*Umgebung-Raster-Analyse*)
- Kriging der Messpunkte einer Raumeinheit mit Z-wert „value_“ (z. B. Ordinary, sphärisch), Suchradius Standard (12 Punkte), mit Ausgabe-Varianz

¹⁸ Sofern die Kriging-Fehler normal verteilt sind, beträgt die Wahrscheinlichkeit 95,5 %, dass der tatsächliche Z-Wert in der Zelle dem vorhergesagten Raster-Wert \pm zw. einmal die Quadratwurzel des Wertes im Varianz-Raster entspricht (ESRI 2017).

- Berechnen des 95,5 %-Vertrauensintervalls aus der Ausgabevarianz und Klassifizieren nach Quantilen (*Spatial Analyst Toolset Map Algebra: SquareRoot („Ausgabevarianz“) * 2*)
- Optional¹⁹: Zusammenfügen der Kriging-Schätzwerte und Vertrauensintervalle für alle Raumeinheiten (*Spatial Analyst Toolset Lokal, Verbinden mehrerer Raster*).

Für Arsen und Cadmium wurden beispielhaft Interpolationen in den Testgebieten durchgeführt. Entsprechend den Erkenntnissen zum unterschiedlichen Verhalten von Arsen und Cadmium wurde bei Cadmium eine Interpolation unter Berücksichtigung des Faktors Damm geprüft; bei Arsen wurde in Raumeinheiten ohne Berücksichtigung des Faktors Damm interpoliert. Dank der hohen Dichte von Bodenuntersuchungspunkten und einem geeigneten Differenzierungsgrad des Raumeinheitenmodells ist eine flächenhafte Interpolation in Raumeinheiten möglich. Die Interpolationen wurden ohne Einteilung der Aue in Flussabschnitte durchgeführt, da das Stoffmuster der Untersuchungspunkte keine sprunghaften Änderungen der Stoffgehalte an den Flussabschnittsgrenzen erkennen lässt; vielmehr deuten sich fließend verlaufende Änderungen der Stoffgehalte im Auenlängsverlauf an. Die Schätzergebnisse des Kriging in den Raumeinheiten zeigen erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung mit dem Muster der an den Untersuchungspunkten gemessenen Stoffgehalte. Einzelne, für Raumeinheiten untypische Werte zeigen sich nicht im flächenhaften Schätzergebnis (Glättung); gleichwohl werden kleinflächige Belastungen, die an mehreren, benachbarten Untersuchungspunkten gemessen wurden, im Schätzergebnis wiedergegeben (siehe z. B. Abbildung 22).



Hinweis: Im aktuellen Projekt wurde ein Teil der 2018 für die Interpolation eingesetzten Oberbodenproben aufgrund von Kriterien für eine nutzungsspezifische Probenahmetiefe ausgeschlossen (s. Kap. 6.1).

Abbildung 22: Ergebniskarte der Interpolation für Arsen in Testgebiet Mitte (RE-Modell 3.1 ohne Flussabschnitte, Faktor Altarmbereich)

¹⁹ Die einzelnen Layer können auch ohne Zusammenfügen genutzt werden.

Die Vertrauensintervalle werden für jede Raumeinheit separat berechnet. Sie liegen in den Raumeinheiten in Flussnähe mit relativ hohen absoluten Werten und Variabilität der gemessenen Stoffgehalte (A1 und A2) erwartungsgemäß deutlich höher als in den flussferneren Flächen, die zumeist in der Altaue liegen, mit geringeren absoluten Werten und Variabilität (A3 und A4) (vgl. Abbildung 22). Bezogen auf die in den Raumeinheiten gemessenen Stoffgehalte liegen die Vertrauensintervalle in einer ähnlichen Größenordnung (für Arsen z. B. bis doppelt so hoch): A1 und A2 zeigen Vertrauensintervalle zwischen 127 und 174 mg As/kg bei mittleren Gehalten an den Untersuchungspunkten zwischen 130 und 150 mg As/kg; in A3 und A4 liegen die Vertrauensintervalle im Bereich von 47 und 65 mg As/kg bei mittleren Gehalten von im Mittel 80 bis 130 mg/kg.

Die angegebenen Vertrauensintervalle sind so zu interpretieren, dass der reale Stoffgehalt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,5 % innerhalb einer Spanne vom geschätzten Wert +/- des Vertrauensintervallbetrags liegt. Für die Interpretation und die Bewertung des Handlungsbedarfs für den Vollzug sind diese Spannen sehr hoch und schwierig zu handhaben. Karten einer entsprechend berechneten Obergrenze der Bodenbelastung würden wegen der hohen Variabilität in der Fläche die realen Stoffgehalte an vielen Stellen überschätzen. Mit den Angaben lassen sich jedoch a) Teilflächen von Raumeinheiten erkennen, in denen Stützpunkte für die räumliche Vorhersage von Stoffgehalten im Boden fehlen und b) Raumeinheiten identifizieren, in denen die Variabilität sehr hoch ist und dadurch ein sehr kleinräumiger Untersuchungsbedarf zur Ableitung von Maßnahmen besteht. In diesem Fall müssen punktuelle Bodenuntersuchungen die Grundlage zur Ableitung von Maßnahmen sein.

Innerhalb der Raumeinheiten sind die Unterschiede der Vertrauensintervalle gering, z. B. variieren diese im Testgebiet Mitte zwischen 1 mg As/kg in der Raumeinheit A1 und maximal 7 mg As/kg in der Raumeinheit A2. Wenig untersuchte Teilflächen, lassen sich dennoch – bei Anwendung einer stärker klassifizierten Legende – in allen Raumeinheiten anhand von Vertrauensintervall-Werten identifizieren, die innerhalb der jeweiligen Raumeinheit nach oben abweichen (siehe z. B. Teilflächen der Raumeinheit A2 in Abbildung 23). Inwieweit sich die Aussagesicherheit durch zusätzliche Stützpunkte verbessern kann, wird in Kap. 6.7.2 geprüft.

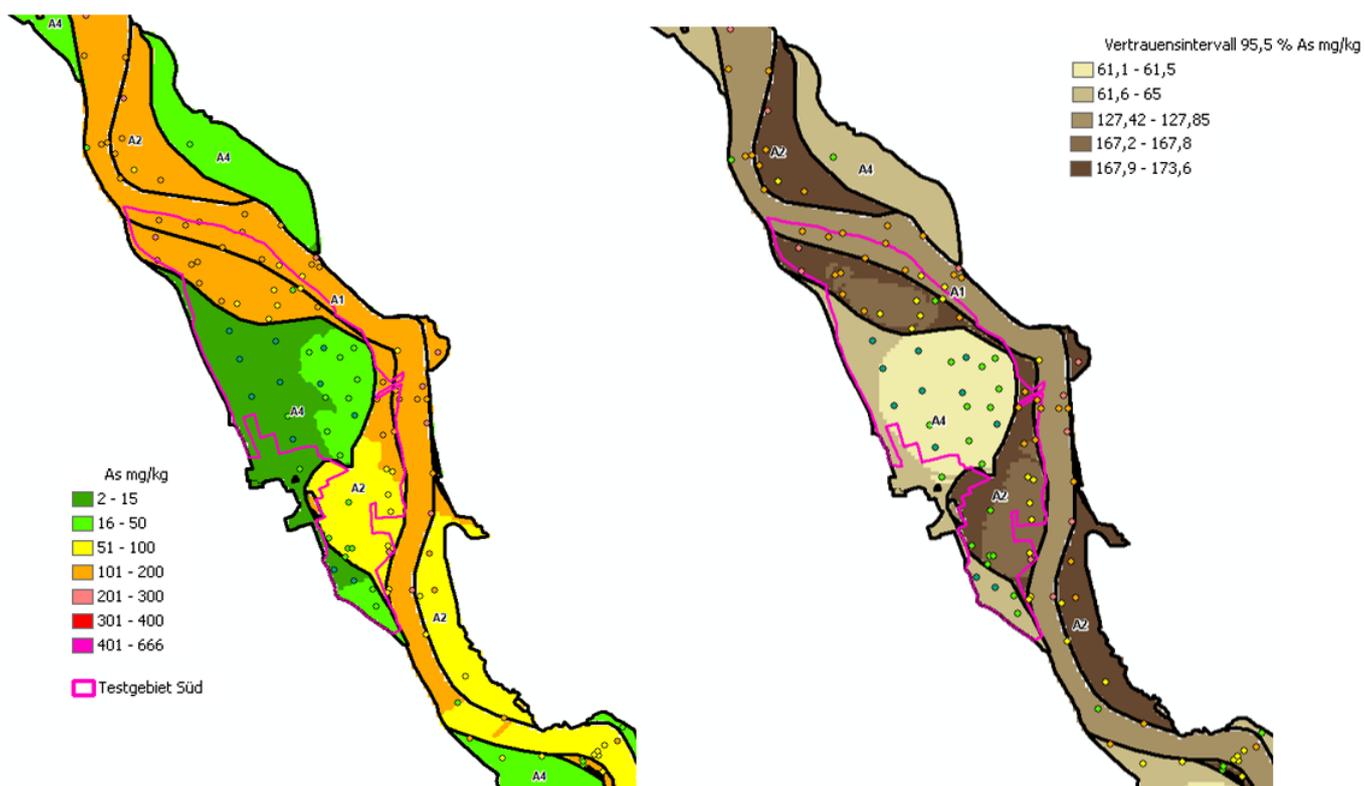
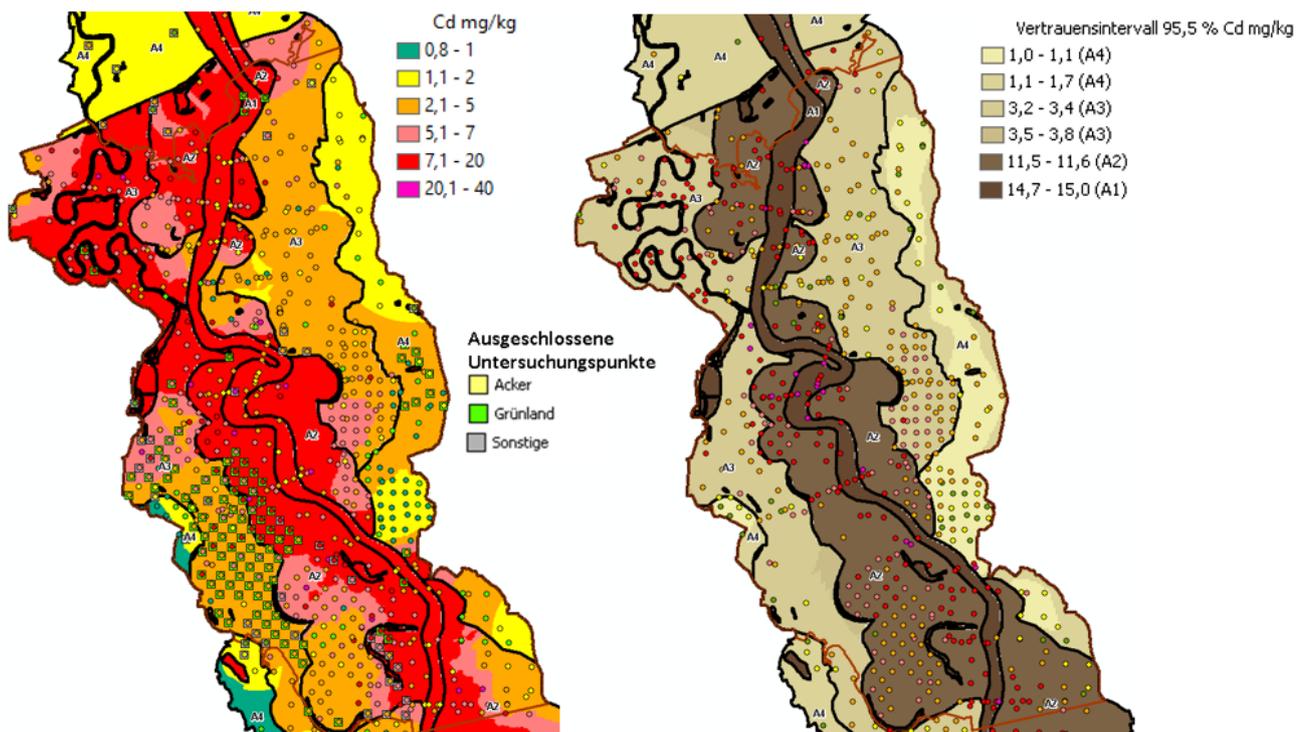


Abbildung 23: Ergebniskarte der Interpolation für Arsen in Testgebiet Süd (RE-Modell 3.1 ohne Flussabschnitte, Faktor Altarmbereich)

Im Testgebiet Mitte zeigt sich für Cadmium, wie wichtig die Berücksichtigung der entlang der Mulde verlaufenden Dämme ist. Hier konzentrieren sich die höchsten Belastungen auf das Deichvorland. Im Norden des Testgebietes ohne Eindeichung weiten sich die Belastungen auf einen größeren Bereich der Niederung um den Mühlenbach aus. Innerhalb der Raumeinheiten werden geringer und höher belastete Bereiche herausgearbeitet, was insbesondere dort zu hohen Vorhersagequalitäten führt, wo im Raster beprobt wurde. Mit dem Raumeinheitenmodell, das die Anzahl Dämme berücksichtigt, werden für Cadmium deutlich geringere Vertrauensintervalle und damit eine höhere Vorhersagequalität im Bereich hinter dem Damm erreicht, so z. B. in A2-D2 und A3-D2 (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25 im Vergleich). Das Vertrauensintervall im Deichvorland (A2-D1 und A3-D1) steigt gegenüber der Interpolation ohne Dammverlauf gegenüber den Werten für die Raumeinheiten A2 und A3 aber auch leicht an. Somit werden die Bereiche mit besonders hoher Variabilität durch die Berücksichtigung des Dammverlaufs gut abgegrenzt.



Hinweis: Im aktuellen Projekt wurde ein Teil der 2018 für die Interpolation eingesetzten Oberbodenproben aufgrund von Kriterien für eine nutzungsspezifische Probenahmetiefe ausgeschlossen (s. Kap. 6.1).

Abbildung 24: Ergebniskarte der Interpolation für Cadmium in Testgebiet Mitte (RE-Modell 3.1 ohne Flussabschnitte, Faktor Altarmbereich)

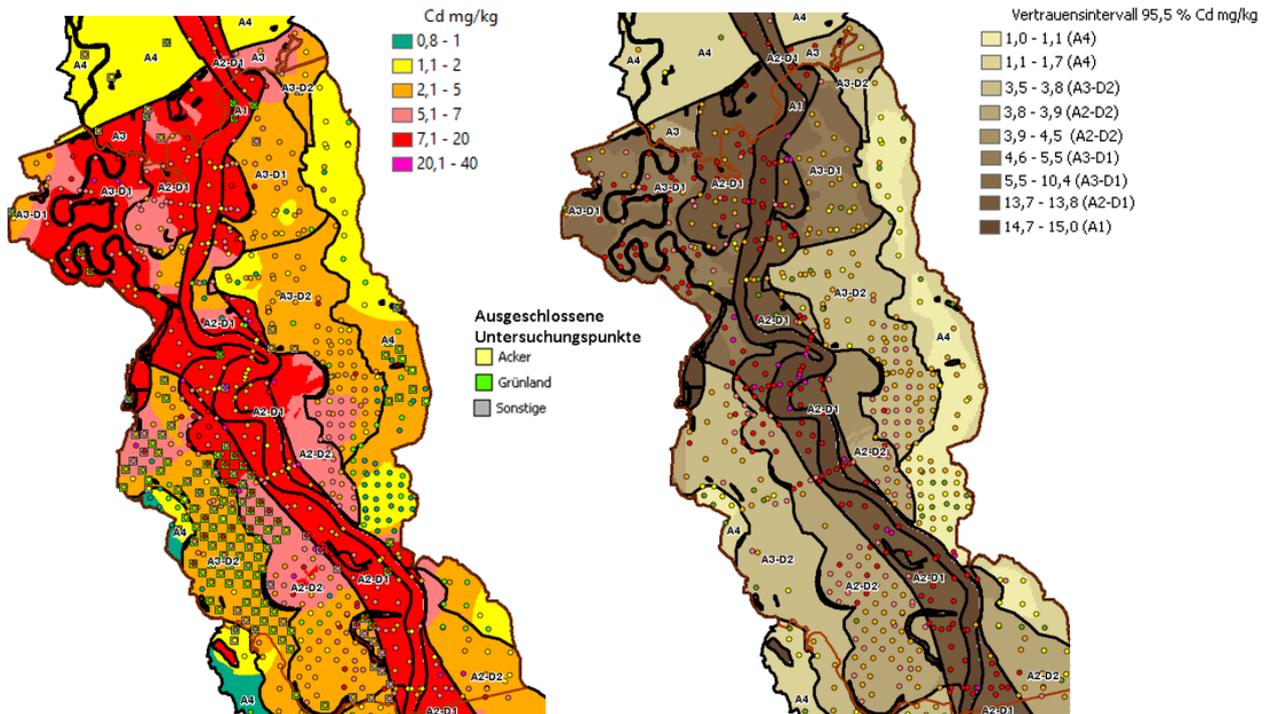


Abbildung 25: Ergebniskarte der Interpolation für Cadmium in Testgebiet Mitte (RE-Modell 3.2 ohne Flussabschnitte, Faktoren Altarmbereich/Dämme)

Im Bereich der Raumeinheit A3-D1 im nördlichen Teil des Testgebietes Mitte zeigen sich Unterschiede zwischen den Teilflächen westlich und östlich des Flusslaufs. Diese können durch die Nutzung bedingt sein. Die Grünlandflächen westlich der Mulde beidseits des Mühlgrabens weisen höhere Cadmiumgehalte im Oberboden auf als die weitgehend als Ackerland genutzten Teilflächen der Raumeinheit östlich der Mulde; somit ist die Variabilität der Raumeinheit auch vergleichsweise hoch (vgl. Abbildung 25). Das Interpolationsergebnis gibt die an den Probenahmeorten gemessenen Cadmiumgehalte jedoch gut wieder, westlich der Mulde werden für die Grünlandflächen höhere Gehalte in der Fläche geschätzt als östlich der Mulde unter Acker.

Ein Vergleich mit den Interpolationsergebnissen von BEAK (2018) am Beispiel von Cadmium im Testgebiet Mitte (siehe Abbildung 27; Beschreibung der HRE in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) zeigt eine große Übereinstimmung der in der Fläche vorhergesagten Stoffgehalte. Die hier durchgeführten Untersuchungen bestätigen die 2018 eingesetzten Einflussfaktoren und wenden diese – leicht abgewandelt – für das Raumeinheitenmodell an. Ein Unterschied besteht darin, dass die Raumeinheitsgrenzen hier nicht manuell an die Ergebnisse der punktuellen Bodenuntersuchungen angepasst wurden²⁰. Zur

²⁰ Teilflächen der HRE von BEAK (2018) wurden nach der Interpolation an markante topographische Merkmale angepasst, wenn zwei oder mehr unmittelbar benachbarte Punkte gleicher Bewertungsklasse in einer Fläche mit unterschiedlicher Klasse liegen und Anhaltspunkte für eine nachvollziehbare Abgrenzung vorliegen. Dabei wurden Klassengrenzen soweit wie möglich entlang topographischer Linien geführt (z. B. Böschung eines alten Muldelaufs, Weg oder Damm). Wenn dies nicht möglich war, erfolgte eine Anbindung zum nächsten topografischen Element als Gerade. In einem Abschnitt wurde der ufernahe Bereich am rechten Muldeufer manuell mit einer geringeren Bewertungsklasse belegt, da die durch Interpolation geschätzten Stoffgehalte vor allem durch Messungen am linken Muldeufer beeinflusst waren und nicht durch Proben bestätigt werden konnten. Lagen keine Anhaltspunkte für eine nachvollziehbare Abgrenzung im Gelände oder an topografischen Merkmalen vor und gab es keine sonstigen fachlichen Gründe für eine separate Fläche (Raumeinheit), so gilt das Ergebnis der Interpolation als Grundlage für die Abgrenzung im Zuge der manuellen Digitalisierung. Zu den Prinzipien der manuellen Anpassung der HRE bemerken BEAK (2018): „1) Die Dichte markanter Geländeobjekte reichte an vielen Stellen nicht aus, um selbst mit manuellen Mitteln zwei benachbarte Messpunkte gleicher Klasse abzugrenzen. Die Abgrenzung gelang aber zumeist mit mindestens drei benachbarten Messpunkten gleicher Klasse. 2) Bei vielen manuellen Überarbeitungen handelt es sich um plausible Vorschläge, anstelle derer auch andere Varianten begründbar gewesen wären.“

Begründung des Raumeinheitenmodells und um die Schätzergebnisse auch nach Berücksichtigung von künftigen, ergänzenden Bodenuntersuchungen reproduzierbar zu machen, orientiert sich das Raumeinheitenmodell ausschließlich an Sedimentations- und Abtragsbedingungen. Daher wurden z. B. die realen Deichverläufe wieder in die Arbeitskarte des Faktors „Anzahl Dämme“ eingearbeitet und es wurde auf eine manuelle Anpassung von Raumeinheitengrenzen oder deren Verlegung anhand der an Punkten ermittelten Stoffgehalte verzichtet.

Das Prinzip zur Herstellung des Flächenbezugs von BEAK (2018) mit homogenen Raumeinheiten wird durch die Untersuchungen bestätigt. Unterschiede im Schätzergebnis liegen im Detail vor allem dort vor, wo andere Raumeinheitengrenzen verwendet wurden oder neue Untersuchungsergebnisse vorliegen. Möglicherweise führt auch stellenweise eine abweichende Datenaufbereitung zu unterschiedlichen Punktwerten (hier gewichtete Konzentrationen für Oberbodenhorizonte an jedem Untersuchungsstandort nach dem in Kap. 6.1 beschriebenen Verfahren). Zudem liefern die unterschiedlichen Kriging-Modelle geringfügig abweichende Verläufe von Zu- und Abnahmen der Stoffgehalte. Ein quantitativer Vergleich der Schätzgüte beider Modelle könnte mit Hilfe der Kriging-Varianzen des Universal Kriging durchgeführt werden (erfolgte hier nicht). Nach jetzigem Kenntnisstand werden beide Vorhersagemodelle als gleichwertig beurteilt. Die Einbeziehung des Altarmbereichs zusätzlich zu den Dämmen bietet an einzelnen Stellen Vorteile für die Vorhersage der Arsen- und Cadmiumgehalte. Der Verzicht auf die Flächennutzung im hier eingesetzten Raumeinheitenmodell hat – ggf. im Hinblick auf die Sicherheit der Vorhersage der Stoffgehalte in Teilbereichen sowie im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten im Vollzug – Nachteile.

Es ist wahrscheinlich, dass in den Interpolationsergebnissen durch das Ausschließen von Untersuchungspunkten aufgrund der angewendeten Tiefenkriterien (vgl. Kap. 6.1) ($n=481$) – meist unter Grünland – Erkenntnisse über den Nutzungseinfluss fehlen. Davon vorrangig betroffen sind die Raumeinheiten A4 ($n=137$), A3-D2 ($n=90$) und A2-D2 ($n=82$), wobei wenige Teilflächen in den Testgebieten Nord und Mitte besonders flächenhaft vom Datenausschluss betroffen sind (vgl. Abbildung 26). Im Testgebiet Süd spielen ausgeschlossene Untersuchungspunkte keine Rolle ($n=3$). Werden die ausgeschlossenen Punkte zur Überprüfung der Interpolationsergebnisse herangezogen, zeigt sich anhand eines visuellen Abgleichs, dass die flächenhaften Schätzergebnisse oft recht gut die Gehalte an den Messstandorten wiedergeben, gleichwohl bestätigen sie insbesondere in der Raumeinheit A3-D2 eine hohe Variabilität in der Fläche und es sind stellenweise auch Abweichungen ersichtlich (vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25). Für Teilflächen, wo flächenhaft viele Untersuchungspunkte fehlen, lassen sich anhand der Cadmium- und Arsengehalte im Oberboden keine Hinweise darauf erkennen, dass die Flächennutzung als zusätzlicher Faktor eine Verbesserung des Raumeinheitenmodells erzielen würde (vgl. Abbildung 26). Vielmehr zeigen die ausgeschlossenen Grünland-Untersuchungspunkte Gehalte, die in ähnlichen Klassen liegen wie auf den angrenzenden Ackerflächen; in Raumeinheit A4 bis 2 mg Cd/kg und in Raumeinheit A3-D2 zwischen 2 und 20 mg Cd/kg bei einer hohen Variabilität.

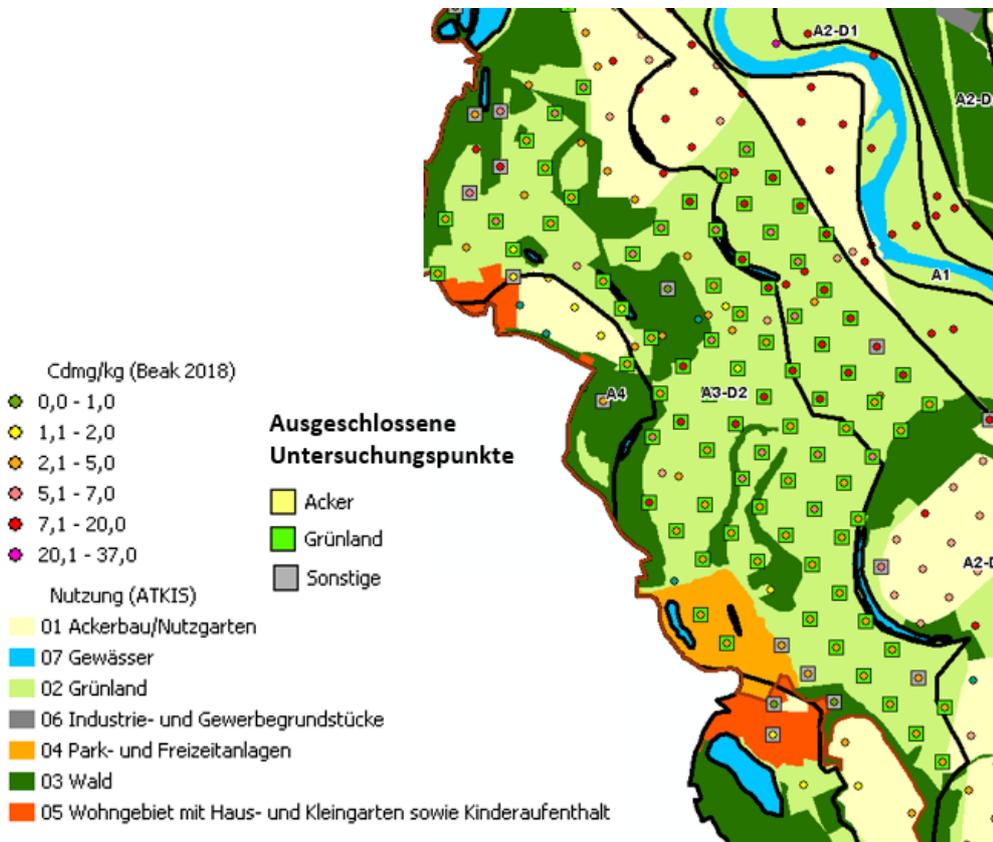
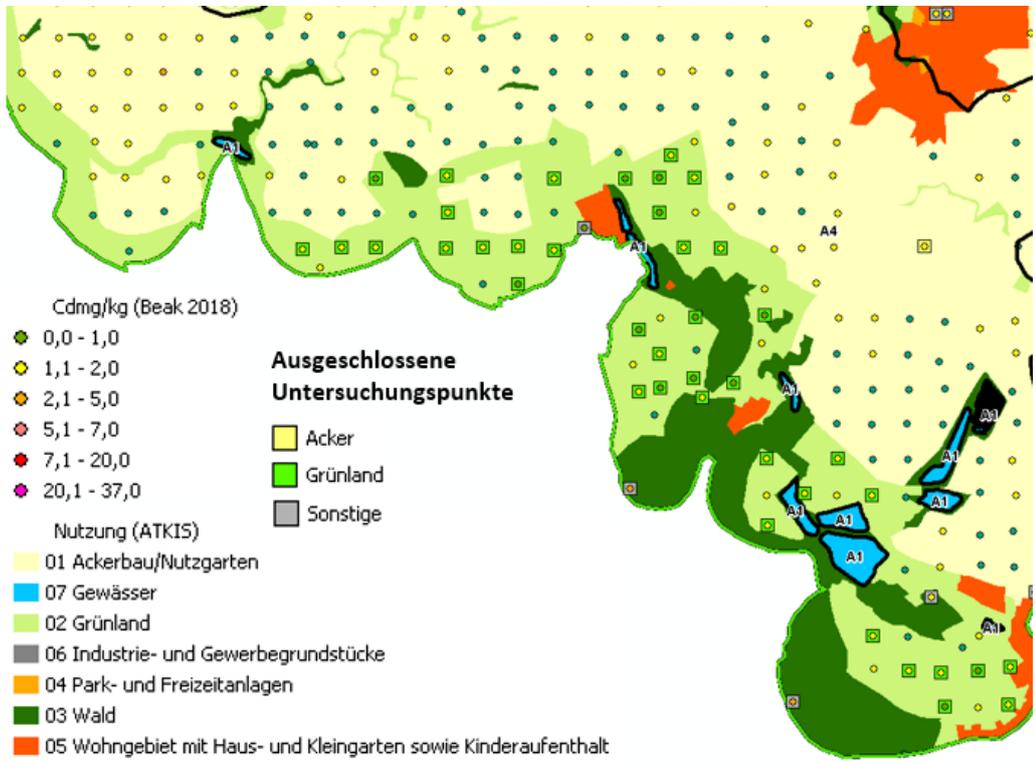
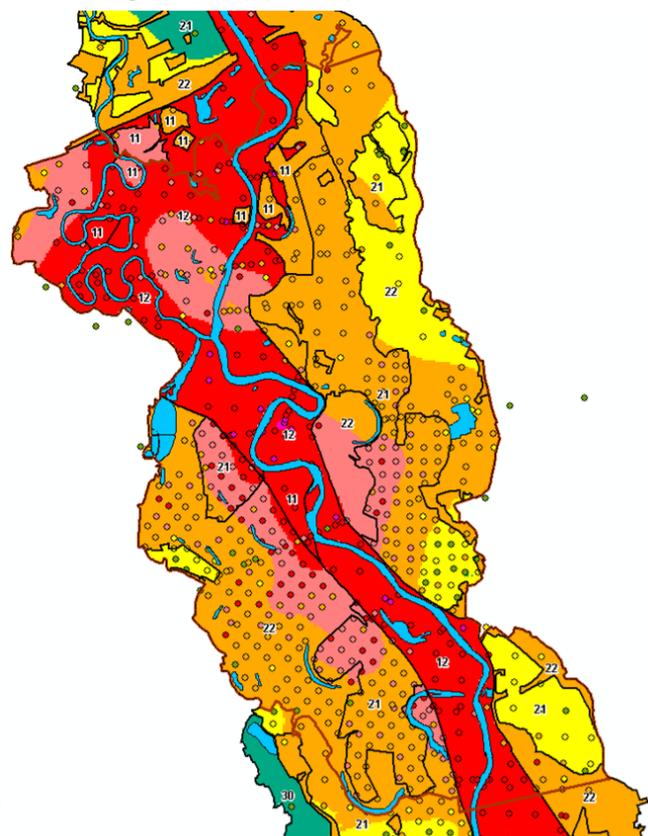
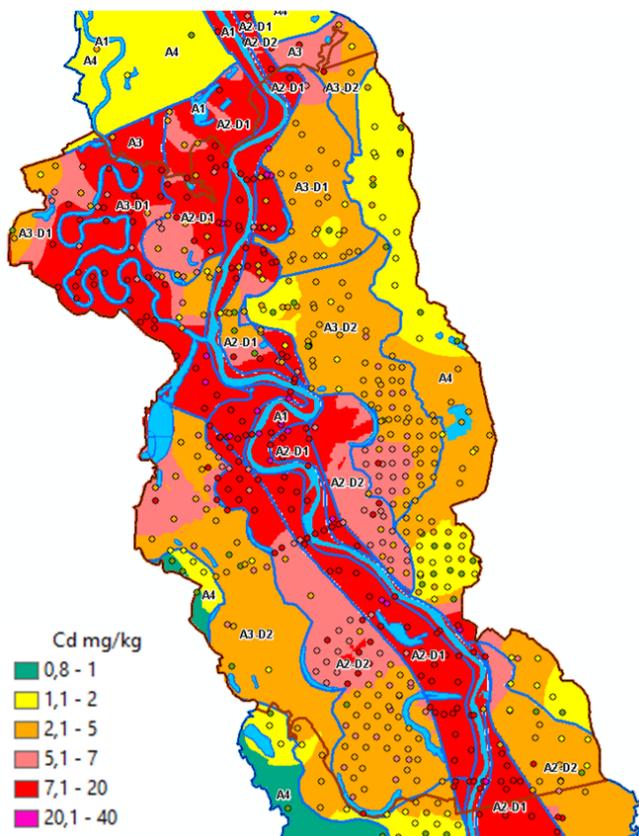


Abbildung 26: Cadmiumgehalte in Oberböden in zwei vom Datenausschluss betroffenen Flächen in Testgebiet Nord (oben) und Testgebiet Mitte (unten)

Für die gebietsweite Anwendung eines auf Interpolation basierenden Vorhersagemodells für Schadstoffgehalte in Oberböden ist eine Überprüfung der Interpolationsergebnisse bezogen auf das hier eingesetzte Raumeinheitenmodell auch in den anderen Testgebieten und mindestens für Arsen und Cadmium sinnvoll, um die Vorteile eines Raumeinheitenmodells aus den Faktoren Altarmbereich/Damm, das den zweiten Flussabschnitt gesondert behandelt, zu belegen.

Ordinary Kriging, sphärisch, 25x25m
Altarmbereich, Anzahl Dämme in A2/A3

Universal Kriging, sphärisch, 20x20m
5 HRE Lage in der Aue (Dämme)



Hinweis: Im aktuellen Projekt wurde ein Teil der 2018 für die Interpolation eingesetzten Oberbodenproben aufgrund von Kriterien für eine nutzungsspezifische Probenahmetiefe ausgeschlossen (s. Kap. 6.1).

Abbildung 27: Ergebniskarte der Interpolation für Cadmium in Testgebiet Mitte (in Raumeinheiten 3.2 ohne Flussabschnitte, Faktoren Altarmbereich/Dämme) (links) und Ergebniskarte Bodenbelastung in HRE nach BEAK (2018) (rechts)

Tabelle 12: Homogene Raumeinheiten (HRE) (BEAK 2018, S. 60)

Be- rech- nung	HRE	Lage in der Aue (Dämme)	Flächennutzung
11	1	Fläche zwischen Mulde und dem ersten (nächsten) Damm bzw. dem Auenrand	Wohngebiet mit und ohne Haus- und/oder Kleingarten sowie Kinderaufenthalt; Ackerbau/Nutzgarten; Kleingartenanlagen mit Nahrungspflanzenanbau und Kinderaufenthalt
12	2	Fläche zwischen Mulde und dem ersten (nächsten) Damm bzw. dem Auenrand	Grünland, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewergrundstücke
21	3	Fläche zwischen dem ersten und zweiten Damm bzw. dem Auenrand	Wohngebiet mit und ohne Haus- und/oder Kleingarten sowie Kinderaufenthalt; Ackerbau/Nutzgarten; Kleingartenanlagen mit Nahrungspflanzenanbau und Kinderaufenthalt
22	4	Fläche zwischen dem ersten und zweiten Damm bzw. dem Auenrand	Grünland, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewergrundstücke
30	5	Fläche zwischen dem zweiten und dritten Damm bzw. dem Auenrand bzw. Fläche zwischen dem dritten Damm und dem Auenrand	alle Flächennutzungen

6.6.3 Diskussion der Varianten „Kenngrößen“ und „Interpolation“

Welche Methode für eine belastbare Vorhersage der Arsen-, Cadmium- und Bleigehalte am besten geeignet ist, hängt in erster Linie von der Vorhersagequalität des Modells ab. Diese ist in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden Datenlage im Gesamtgebiet unterschiedlich: im Süden der Aue (Q1) geringer als im Norden der Aue (Q2 bis Q4).

Die für die Ergebniskarten mit statistischen Kenngrößen festgestellten Unsicherheiten sind für ein valides Vorhersagemodell nicht vertretbar. Dieses Verfahren bietet sich nur für eine flächenscharfe Vorhersage an, wenn die Werteverteilungen in den gebildeten Raumeinheiten eine geringe Variabilität und Spannweite aufweisen. Dies trifft auf das kleinräumig heterogene Schadstoffmuster in den untersuchten Auenböden nicht zu. Das Raumeinheitenmodell müsste weiter differenziert werden, um kleinflächigere Strukturen als eigene Raumeinheiten darzustellen. Dazu wurde anhand der im Untersuchungsgebiet verfügbaren Geodaten kein geeigneter Ansatz gefunden. Die Bodenschätzung, die einen Teil des Untersuchungsgebietes abdeckt, hat sich nicht als geeignet erwiesen, um Flächen ähnlicher Stoffgehalte auszuweisen (vgl. Kap. 6.4.2).

Die Vorhersage der Stoffgehalte mittels Interpolation in Raumeinheiten ist deutlich lagegenauer als die Kennzeichnung von Raumeinheiten mit statistischen Kenngrößen und für die räumliche Schadstoffverteilung in diesem Untersuchungsgebiet gut geeignet. Aus der Krigingvarianz können Aussagen zur Qualität der Schätzung an jedem Rasterpunkt berechnet werden. Anhand der Ausgabevarianz können Bereiche und Teilflächen von Raumeinheiten identifiziert werden, wo Untersuchungsbedarf besteht und wo die Variabilität der Stoffgehalte sehr hoch ist, so dass eine Ableitung von Maßnahmen auf Basis einer flächenhaften Schätzung nicht zu empfehlen ist.

Durch gezielt platzierte Nachuntersuchungen in Teilflächen ohne Messstandorte (vgl. Tabelle 10) ließe sich die Vorhersagequalität des Modells insbesondere auch im Flussabschnitt Q1 weiter verbessern. Auf Teilflächen mit hoher Variabilität sind weitere Bodenuntersuchungen notwendig, wenn Maßnahmen abgeleitet werden sollen und dafür bisher Stützpunkte mit Analyseergebnissen für Schadstoffgehalte fehlen. Für Flächen mit vergleichsweise geringen Vertrauensintervallen – z. B. Raumeinheit A4 – sind deutlich weniger Punkte erforderlich als in den Flächen mit sehr hoher Variabilität (Deichvorland: A1, A2-D1 sowie A3-D1). Rasterzellen mit unzureichender Schätzgenauigkeit lassen sich kennzeichnen, z. B. wenn die obere Grenze des Vertrauensintervalls die Schätzwerte um mehr als 50 % der Höhe des Schätzwertes überschreitet, der Wert für einen konservativen Ansatz wäre 30 %. Dies kann GIS-gestützt durch eine Verrechnung der Rasterdatensätze der Kriging-Schätzung und der Vertrauensintervalle für jede Raumeinheit erfolgen. Der angewendete Prozentwert muss sich dabei auch am Flächenanteil der gefundenen Rasterzellen orientieren. Wenn dieser bei 30 % beispielsweise sehr hoch ist, bietet sich ein höherer Prozentwert an.

Der Aufwand einer Interpolation innerhalb von Raumeinheiten ist deutlich höher als die Zuweisung statistischer Kenngrößen zu Raumeinheiten und nimmt mit der Anzahl zu bearbeitender Raumeinheiten und Stoffe zu. Dennoch wird dies als sinnvollste Methode zur Vorhersage der Stoffgehalte in der Aue der Vereinigten Mulde angesehen. Zur Optimierung des Kriging-Modells kann eine separate Bearbeitung des Südteils der Aue (Q1) mit deutlich geringerer Auenbreite und Untersuchungsichte sinnvoll sein.

6.6.4 Ergänzende Hinweise zu Tiefenprofil und Flächennutzung

Erhöhte Schadstoffgehalte im Tiefenprofil

Die Tiefenprofile der Schürfe (vgl. PS_4_2019, PS_5_2019 und PS_6_2019 in Anlage A 1) und ein Vergleich von Messwerten für Arsen, Cadmium und Blei aus Oberbodenhorizonten mit Messwerten aus den jeweils darunterliegenden Bodenhorizonten²¹ hat gezeigt, dass im Untersuchungsgebiet häufig Horizonte in der Tiefe höher belastet sind als der an der Oberfläche anstehende Horizont. Dies ist nicht überraschend vor dem Hintergrund der historischen Entwicklung der Schadstofffrachten im Einzugsgebiet der Vereinigten Mulde und den für Flussauen typischen Tiefenprofilen mit in der Tiefe wechselnden Schadstoffgehalten aufgrund der über die Zeit wechselnden Sedimentationsbedingungen. Profile mit in der Tiefe höheren Belastungen liegen auch aus Beprobungen vor den großen Hochwasserereignissen 2002 und 2013 vor. Der Bergbau im Erzgebirge endete (außer Uran) um 1950 und hatte seine Blütezeit Jahrhunderte vorher, so dass die Ablagerung der größten Schadstofffrachten lange zurückliegt. Möglicherweise überlagern sich hier zwei Prozesse: eine extreme historische Belastung, die weitgehend unbeeinflusst von Dämmen und anderen Hindernissen weitgehend im Zuge natürlich geprägter Sedimentation in der gesamten Flussaue erfolgte. Hinzu kommt in neuerer Zeit ein Sedimenteintrag mit inzwischen deutlich geringer belasteten Sedimenten, der jedoch nicht mehr die gesamte Aue betrifft, sondern nur noch das Deichvorland. Eine nähere Betrachtung der Historie der Eindeichung, z. B. anhand historischer Karten, wäre interessant, um dieser Frage nachzugehen.

Die Verteilung von Untersuchungsstandorten mit höheren Stoffbelastungen in der Tiefe im Vergleich zum obersten Horizont sowie die Lage von Raumeinheiten, in denen mehr als ein Viertel der Untersuchungsstandorte diese Tiefengradienten zeigt, ist in Abbildung 28 dargestellt. Für diese Darstellung sind alle Teilflächen der jeweiligen Raumeinheit gemeinsam berücksichtigt worden. Daher kann es dazu kommen, dass einzelne Teilflächen, in denen nur einzelne betroffene Standorte liegen, eine Flächensignatur erhalten haben, die die Raumeinheit als betroffen kennzeichnet (z. B. Q2-A3-D2 für Arsen in Abbildung 28 links).

In der Tiefe höher mit Arsen, Cadmium und/oder Blei belastete Standorte kommen besonders häufig flussnah im Deichvorland vor (A1). Höhere Arsen- und Bleigehalte in tieferen Horizonten sind besonders häufig in den jüngsten Altarmbereichen, die nicht durch einen Deich geschützt sind (A2-D1) (siehe z. B. Abbildung 28). Besonders häufig – bei bis zu einem Drittel, im mittleren Auenabschnitt (Q2) sogar bis zur Hälfte der Untersuchungspunkte – finden sich in der Tiefe höher mit Arsen belastete Standorte. Das könnte auf reduzierte Einträge insbesondere von Arsen in jüngerer Zeit, d. h. nur in rezenten Überflutungsbereichen hindeuten. Auch treten erhöhte Arsengehalte in der Tiefe zusätzlich recht häufig in flussfernen Raumeinheiten auf. Bei Blei ist dies – wenn auch weniger häufig – auch der Fall, während in der Tiefe höher mit Cadmium belastete Standorte außer flussnah (A1) nur selten ($\leq 10\%$) vorkommen (vgl. Tabelle 13). Inwiefern eine Verlagerung von Cadmium aus dem Oberboden in tieferliegende Horizonte eine Rolle spielt, konnte hier nicht geklärt werden.

²¹ Datengrundlage sind nicht die gewichteten Konzentrationen der Oberbodenhorizonte (nach LABO 2017 bis 30 bzw. bis 10 cm Tiefe), die zur Entwicklung des Vorhersagemodells für Stoffgehalten herangezogen wurden, sondern die Analyseergebnisse des jeweils obersten beprobten Horizonts (Hauptsymbol A, H, R oder M; keine organischen Auflagen). Messstandorte wurden als „in der Tiefe höher belastet“ klassifiziert, wenn in einem tieferliegenden Horizont ein 50 % höherer Stoffgehalt vorliegt als im obersten Horizont. An 2.039 Untersuchungspunkten im gesamten Untersuchungsgebiet liegen Daten für mehrere Horizonte in der Tiefe vor. Für diese Auswertung sind keine Untersuchungspunkte aufgrund von Tiefenkriterien ausgeschlossen worden.

Bei Arsen, aber auch bei Cadmium außerhalb von A1 lässt sich feststellen, dass die Lage der Standorte mit höheren Belastungen in der Tiefe nicht unbedingt mit der Lage der Raumeinheiten im Zusammenhang steht. Eher finden sich bestimmte Teilflächen innerhalb von Raumeinheiten, für die jedoch kein anderer Geofaktor als Ursache bestimmt werden konnte. Es lassen sich jedoch Raumeinheiten identifizieren, die besonders häufig eine entsprechende Tiefenverteilung von Arsen, Blei oder Cadmium aufweisen.

Differenzierter lassen sich die in der Tiefe erhöhten Stoffgehalte entlang des Flussverlaufs herausarbeiten, indem die Raumeinheiten in Flussabschnitte gegliedert betrachtet werden (vgl. Tabelle 14). Auffällig sind die hohen Arsen-Belastungen in A3-D2, also flussfern und hinter einem Deich; hier könnte die Verlegung des Deichverlaufs eine Rolle gespielt haben. Diese Raumeinheit ist auf den zweiten Flussabschnitt begrenzt und im Testgebiet Mitte und südlich davon verortet (vgl. Karte in Abbildung 20). Dort sind 25 % der Messstandorte in der Tiefe höher mit Arsen belastet; die obersten Horizonte weisen dabei keine überdurchschnittlich hohen Arsengehalte auf (vgl. Boxplot in Abbildung 20). Bei Blei ist unterhalb der Einmündung der Lossa (Abschnittsgrenze Q2/Q3) der Einfluss der Deiche deutlich erkennbar.

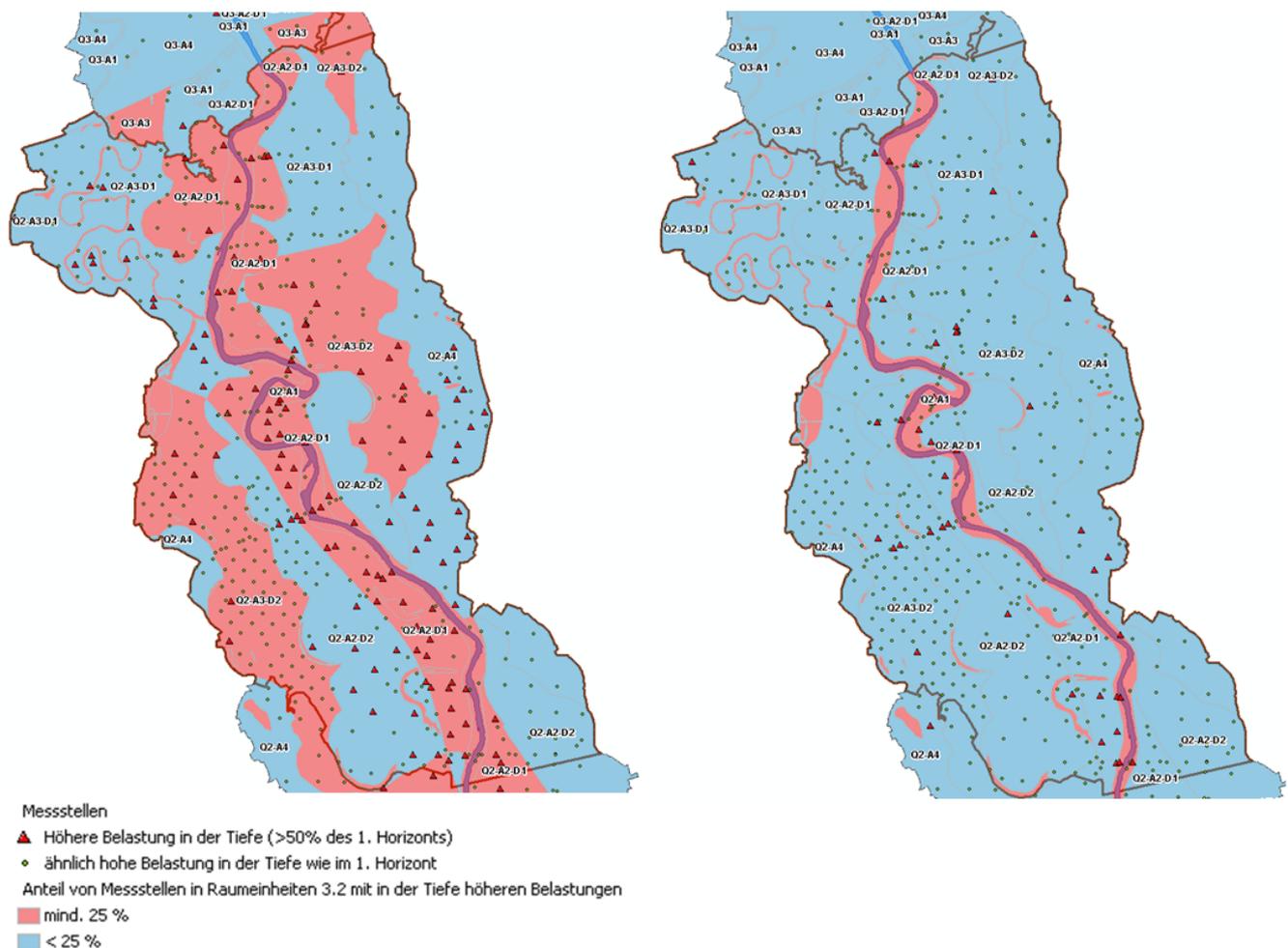


Abbildung 28: Raumeinheiten des RE-Modells 3.2 (Faktoren Flussabschnitt/Altarmbereich/Dämme) mit in der Tiefe höher belasteten Untersuchungsstandorten (links: Arsen, rechts: Cadmium)

In den Altarmbereichen, die durch einen Damm vom Flusslauf abgetrennt sind (A2, A3), sind die tiefen Horizonte hinter dem Damm geringer belastet als vor dem Damm; dies könnte bei einem historischen Sedimenteintrag vor dem Dammbau auf die geringere Überflutungshäufigkeit in diesen Bereichen zurückgeführt werden. Im nördlichsten Flussabschnitt (Q4) kommen Untersuchungsstandorte, die in der Tiefe höher belastet sind, bei allen

Stoffen seltener vor. Von Interesse ist hier z. B. auch, inwiefern sich flussferne Gleye in ihrem Tiefenprofil der Stoffgehalte im Vergleich zu weiterhin periodisch überfluteten Vegen verhalten. Die Tiefenprofile der durchgeführten Schürfe liefern Anhaltspunkte dafür, dass die flussfernen Gleye i. d. R. keine in der Tiefe erhöhten Gehalte von Arsen, Blei und Cadmium aufweisen, während sich diese bei den rezent überfluteten Vegen gehäuft zeigen (siehe Anlage A 1). Eine systematische Prüfung über alle Untersuchungspunkte erfolgte hierzu nicht, da nur für einen kleinen Teil der Standorte eine Ansprache des Bodentyps vorliegt.

Es ist zu vermuten, dass ein Großteil der Schadstofffracht im Flussabschnitt Q2 nach der Aufweitung der Aue absedimentiert ist, wenn sich die Fließgeschwindigkeiten bei der Überflutung größerer Flächen verringern. In den Flussabschnitten Q3 und Q4 scheint dieser Effekt nicht mehr ausgeprägt zu sein, so dass hier – in Bezug zum Oberboden – auch in der Tiefe bereits vergleichbare Schadstoffgehalte vorhanden sind. So werden auch im Flussabschnitt Q2 häufig höhere Bodenbelastungen in der Tiefe gefunden, da die Sedimentation in jüngerer Zeit weniger schadstoffbefrachtet ist und diese sich in diesem Abschnitt und in Ufernähe absetzt.

Tabelle 13: Anteil von in der Tiefe höher belasteten Untersuchungsstandorten je Raumeinheit des RE-Modells 3.2 ohne Flussabschnitte (Faktoren Altarmbereich/Dämme)

RE-Modell 3.3	As [%]	Pb [%]	Cd [%]	Anzahl Untersuchungsstandorte
A1	31	17	15	383
A2-D1	28	19	7	473
A2-D2	22	12	9	217
A3	18	11	6	323
A3-D1	19	14	5	88
A3-D2	25	5	10	111
A4	12	6	6	444
Gesamt	22	12	8	2.039

Die Verteilung von Untersuchungsstandorten mit höheren Stoffbelastungen in der Tiefe im Vergleich zum obersten Horizont in Abbildung 28 lässt darauf schließen, dass die aktuell durch Überflutungen eingetragenen Sedimente geringer mit Arsen, Blei und Cadmium belastet sind, als das in der Vergangenheit der Fall war. So zeigt die Raumeinheit A1 über das gesamte Untersuchungsgebiet eine Häufung von Bodenprofilen, die oberflächennah geringer belastet sind als in der Tiefe. Während sich diese Häufung bei Cadmium auf den flussnahen Bereich beschränkt, kommt sie bei Arsen und Blei auch in größerer Entfernung vom Flusslauf vor (s. o.). Die Cadmiumgehalte in den Oberböden sind flussnah (A1) am höchsten und nehmen mit zunehmender Entfernung vom Fluss ab, während Arsen und Blei hingegen im flussnahen Bereich geringere Oberbodengehalte zeigen als nach außen hin anschließend (vgl. Abbildung 20). Dies könnte auf eine stoffspezifische Bindung an verschiedene Korngrößen oder ein anderes Mobilitätsverhalten zurückzuführen sein (vgl. Kap. 6.4.1), sofern die Mengenverhältnisse von Arsen, Cadmium und Blei über die Zeit in den abgelagerten Sedimenten ähnlich gewesen sind. Weiterhin wäre denkbar, dass sich im Laufe der Zeit das Stoffspektrum in den Sedimenten bzw. im Fließgewässer verschoben hat, d. h. der Anteil von Arsen und ggf. auch Blei deutlich abgenommen hat, während der Anteil von Cadmium eher konstant geblieben ist bzw. nur unwesentlich abgenommen hat. Gegebenenfalls überlagern sich auch beide Prozesse.

Tabelle 14: Anteil von in der Tiefe höher belasteten Untersuchungsstandorten je Raumeinheit des RE-Modells 3.2 mit Flussabschnitten (Faktoren Flussabschnitt/Altarmbereich/Dämme)

RE-Modell 3.2	As [%]	Pb [%]	Cd [%]	Anzahl Untersuchungsstandorte
Q1-A1	31	18	11	154
Q1-A2-D1	26	19	5	113
Q1-A2-D2	22	9	9	45
Q1-A3	14	0	0	14
Q1-A4	10	9	7	86
Q2-A1	37	20	27	93
Q2-A2-D1	47	33	11	120
Q2-A2-D2	22	8	8	64
Q2-A3-D1	19	14	5	88
Q2-A3-D2	25	5	10	111
Q2-A4	24	9	9	75
Q3-A1	27	18	8	108
Q3-A2-D1	21	14	7	209
Q3-A2-D2	26	18	10	72
Q3-A3	25	20	9	174
Q3-A4	11	8	7	131
Q4-A1	29	7	18	28
Q4-A2-D1	19	0	0	31
Q4-A2-D2	14	14	11	36
Q4-A3	10	2	3	135
Q4-A4	8	2	3	152

Wenig untersuchte Nutzungen

Flächen unter Wald sowie mit siedlungstypischen Nutzungen (Wohnen, Gewerbe, Industrie, Park) sollten in den Ergebniskarten gekennzeichnet oder ausgespart werden, da für diese Flächen nicht in ausreichendem Umfang Bodenuntersuchungen vorliegen. Die wenigen vorhandenen Messstandorte mit siedlungstypischen Nutzungen und unter Wald wurden zwar sowohl bei der Raumeinheiten-Entwicklung als auch bei den Tests für Interpolationen mit berücksichtigt (vgl. Kap. 6.2), die Stichprobenumfänge mit z. B. n=46 für Gartennutzung und n=15 für Parks und n=7 für Kinderspielnutzung (vgl. Tabelle 5) reichen jedoch nicht aus, um für alle Teilflächen der entsprechenden Nutzungen belastbar Stoffgehalte vorherzusagen.

6.7 Bewertung der verdichtenden Bodenuntersuchungen

Bereits im Vorfeld des Projekts lag im Gebiet eine Vielzahl von Bodenuntersuchungen in einem sehr dichten Messnetz vor. Ob und inwieweit die neu durchgeführten Untersuchungen die Ergebnisse verbessert haben, wird im Folgenden anhand der Arsengehalte in Oberböden in den Testgebieten Nord, Mitte und Süd beschrieben und bewertet. Dies erfolgt zum einen anhand der Charakterisierung der Raumeinheiten des finalen RE-Modells 3.3 mit statistischen Kenngrößen sowie zum anderen anhand einer beispielhaften Interpolation für Cadmium im Testgebiet Mitte. Die aufgrund der angewendeten Tiefenkriterien ausgeschlossenen Grünlandproben wurden bereits in Kap. 6.6.2 den Ergebniskarten der Interpolation gegenübergestellt.

6.7.1 Auswirkungen auf die Charakterisierung der Raumeinheiten

Testgebiet Nord

Im Testgebiet sind zusätzlich zu den 1.189 bereits untersuchten Standorten 19 Acker- und 41 Grünlandstandorte neu beprobt worden (vgl. Abbildung 29). Sie verteilen sich vor allem auf die Raumeinheiten A1 und A2-D1, da in der rezenten Aue eine Verdichtung des Messnetzes erreicht werden sollte. Die zuvor vorliegenden Bodenuntersuchungen stammen zu 80 % aus den Rasterbeprobungen des Jahres 2003 und zu 13 % aus den Transektbeprobungen des Jahres 2000, der Rest verteilt sich auf andere Zeitschnitte.

Beim Vergleich der statistischen Kenngrößen vor und nach den neuen Bodenuntersuchungen wird deutlich, dass sich die Mediane als Größe für die mittlere Belastung innerhalb der Raumeinheiten gar nicht oder nicht maßgeblich unterscheiden. Auch wird keine deutliche Verringerung des Unsicherheitsmaßes IQA/2 in % in Bezug auf den Median erreicht; zum Teil ergibt sich mit den neuen Untersuchungen sogar eine höhere Variabilität bzw. Unsicherheit, diese liegt jedoch prinzipiell in der gleichen Größenordnung. Daraus ergibt sich, dass die Raumeinheiten im Testgebiet Nord – so wie im Modell 3.3 optimiert – bereits vor 2018 für eine Beschreibung mit statistischen Kenngrößen hinreichend mit Untersuchungsstandorten belegt waren und sich die zusätzlichen Untersuchungen auf den Flächen hinter dem ersten Damm (A2-D2, A3 und A4) vollständig in die zuvor gefundene Werteverteilung einordnen. Nur im Dammvorland bis zum Fluss (A1), d. h. in der rezenten Aue, zeigen sich Veränderungen nach den zusätzlichen Bodenuntersuchungen, hier erhöht sich das 95. Perzentil in nennenswertem Maße (vgl. Tabelle 15). Mit den neuen Untersuchungsstandorten wurden neben verschiedenen Nutzungen (Acker, Grünland) auch Kuppen und Senken sowie Bereiche verschiedenen Überflutungseinflusses berücksichtigt. Die Hypothese einer erhöhten Variabilität vor dem ersten Damm bestätigen sich somit durch die neuen Untersuchungsergebnisse.

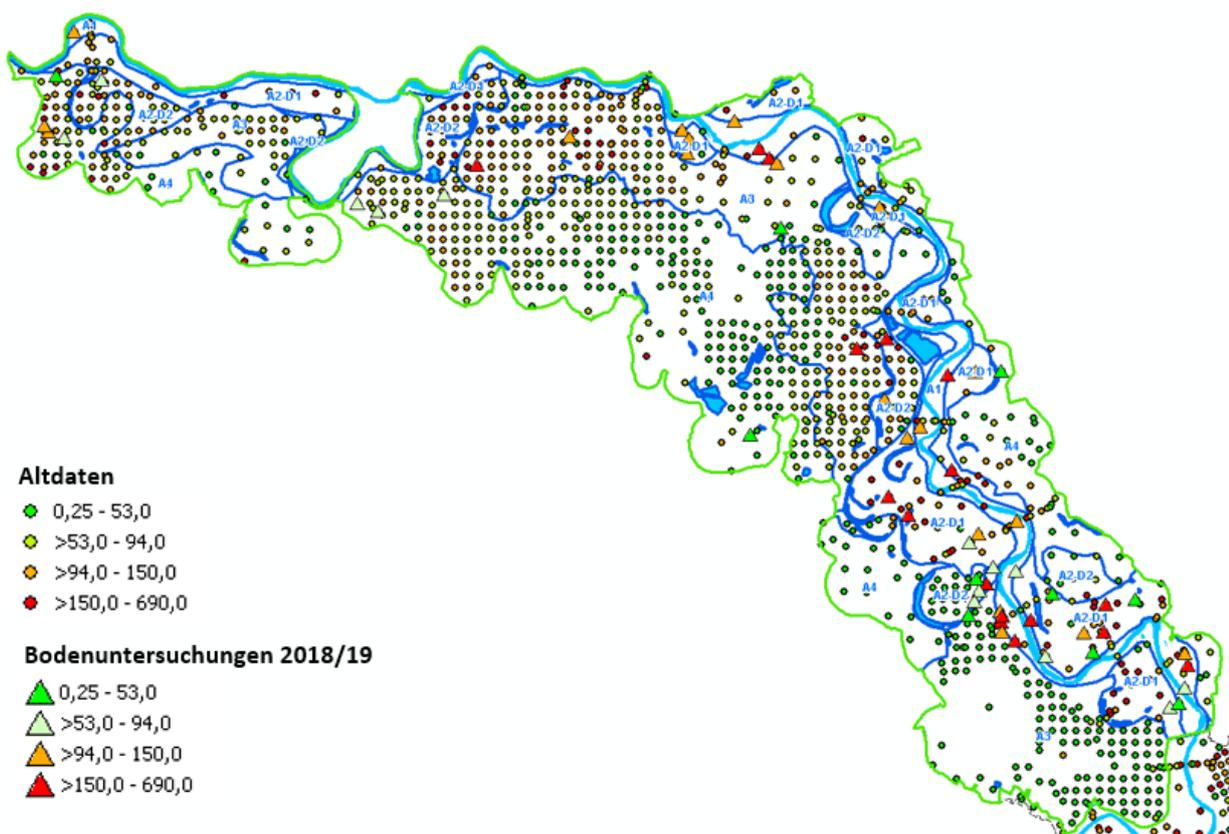


Abbildung 29: Einordnung der Bodenuntersuchungen 2018/19 ins bestehende Messnetz anhand der Arsengehalte in Oberböden des Testgebietes Nord

Tabelle 15: Statistische Kenngrößen für Arsen in Raumeinheiten des Testgebietes Nord vor und nach den Probenahme 2018/19

RE-Modell 3.3	Datensatz	n	Median	P90	P95	IQA	IQA/2 in % des Medians
A1	Altdaten	58	110	200	216	59	27
	Alt+2018/19 (+18)	76	120	200	255	80	33
A2-D1	Altdaten	104	135	220	277	70	26
	Alt+2018/19 (+20)	124	135	220	260	74	28
A2-D2	Altdaten	116	87	160	190	71	41
	Alt+2018/19 (+6)	122	87	160	190	71	41
A3	Altdaten	466	68	140	150	92	68
	Alt+2018/19 (+7)	473	68	140	150	91	67
A4	Altdaten	444	57	110	120	31	27
	Alt+2018/19 (+9)	453	57	110	120	32	28

Testgebiet Mitte

Im Testgebiet sind zusätzlich zu den 511 bereits untersuchten Standorten 12 Acker- und 40 Grünlandstandorte neu beprobt worden (vgl. Abbildung 30). Sie verteilen sich hier vor allem auf die Raumeinheiten A2-D1, A2-D2 und A3-D1. Hier sollten in erster Linie eine Verdichtung des Messnetzes in der rezenten Aue erreicht und die Belastungsverteilung hinter dem ersten Damm überprüft werden. Die zuvor vorliegenden Bodenuntersuchungen stammen zu 53 % aus den Rasterbeprobungen des Jahres 2003 und zu 20 % aus den Transektbeprobungen des Jahres 2000.

Während die beiden im flussnahen Bereich zusätzlich untersuchten Standorte die dort erwarteten Arsengehalte bestätigen, zeigt sich mit 25 zusätzlichen Untersuchungsstandorten in der rezenten Aue in Raumeinheit A2-D1 eine Verringerung des Unsicherheitsmaßes IQA/2 in Bezug auf den Median. Die Arsenbelastung im Oberboden liegt jedoch weiterhin im Hinblick auf die Vollzugsfolgen in einer ähnlichen Größenordnung (P50 = 200, P95 > 300 mg/kg), so dass der Erkenntnisgewinn für die Charakterisierung der gesamten Raumeinheit hier begrenzt ist. Vor dem Hintergrund des Prüfwertes für Acker (200 mg As/kg) interessant ist die Veränderung des Medians in der Raumeinheit A2-D2, also hinter dem ersten Damm, von 198 auf 212 mg/kg durch die Neubeprobung von 10 Standorten. In den anderen flussferneren Raumeinheiten ergeben sich hingegen keine vollzugsrelevanten Änderungen der statistischen Kenngrößen. Die Hypothese einer deutlich homogeneren Schadstoffverteilung hinter dem Damm wird bestätigt, genauso wie die mittleren und die mit dem P95 repräsentierten höchsten Gehalte. Das Unsicherheitsmaß verringert sich in zwei Raumeinheiten (A2-D1 und A2-D2) in nennenswertem Maße, indem die neuen Untersuchungspunkte anhand der Kriterien Nutzung, Kuppen und Senken sowie Bereiche verschiedener Überflutungshäufigkeit (HQ25/50) hinzugefügt wurden.

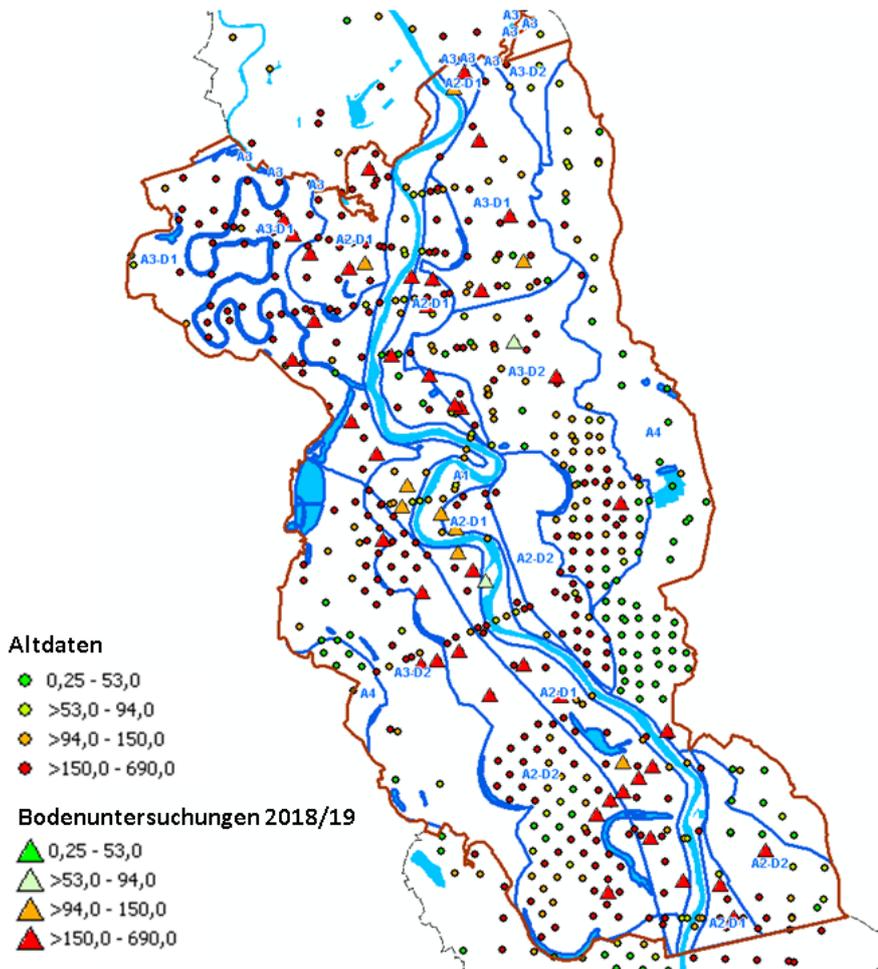


Abbildung 30: Einordnung der Bodenuntersuchungen 2018/19 ins bestehende Messnetz anhand der Arsengehalte in Oberböden des Testgebietes Mitte

Tabelle 16: Statistische Kenngrößen für Arsen in Raumeinheiten des Testgebietes Mitte vor und nach den Probenahme 2018/19

RE-Modell 3.3	Datensatz	n	Median	P90	P95	IQA	IQA/2 in % des Medians
A1	Altdaten	38	110	168	203	47	21
	Alt+2018/19 (+2)	40	110	163	201	49	22
A2-D1	Altdaten	91	200	300	315	125	31
	Alt+2018/19 (+25)	116	200	290	310	100	25
A2-D2	Altdaten	113	198	366	432	156	39
	Alt+2018/19 (+10)	123	212	366	438	149	35
A3-D1	Altdaten	77	210	304	340	110	26
	Alt+2018/19 (+10)	87	210	300	334	102	24
A3-D2	Altdaten	116	140	264	300	98	35
	Alt+2018/19 (+6)	122	145	267	319	98	34
A4	Altdaten	76	18	103	140	40	111
	Alt+2018/19 (+1)	77	19	111	150	43	113

Testgebiet Süd

Über die 19 zuvor vorhandenen Untersuchungspunkte hinaus sind 2018/19 im Testgebiet Süd insgesamt 37 Ackerstandorte in einem Raster neu beprobt worden (vgl. Abbildung 31). Anders als in den anderen beiden Testgebieten war hier das Ziel, eine Ackerfläche hinsichtlich des räumlichen Schadstoffmusters zu untersuchen. Die neuen Untersuchungspunkte liegen vorrangig in der rezenten Aue (A1 und A2-D1) sowie auf Flächen der älteren Altarmbereiche (A4); die Raumeinheit A3 kommt in diesem Testgebiet nicht vor.

Anhand der Darstellung in Abbildung 31 ist erkennbar, dass die Schadstoffverteilung in der Raumeinheit A4 sehr homogen ist; somit werden mit den 18 zusätzlichen Untersuchungsstandorten sehr ähnliche Mediane im Bereich des LAGA Z0-Wertes für Lehm/Schluff für Arsen mit nur sehr geringer Streuung ermittelt, die nunmehr mit einer größeren Belastbarkeit (7 % Abweichung nach oben und unten vom Median) angegeben werden können. Auch P90 und P95 haben sich nicht geändert (vgl. Tabelle 17). Die Hypothese einer erhöhten Variabilität in der rezenten Aue wird auch hier durch die neuen Untersuchungen bestätigt, wobei dadurch sogar noch eine höhere Variabilität gezeigt wird als zuvor. Der Stichprobenumfang in der Raumeinheit A1 ist hier zu gering, um Aussagen aus den neuen Ergebnissen ableiten zu können.

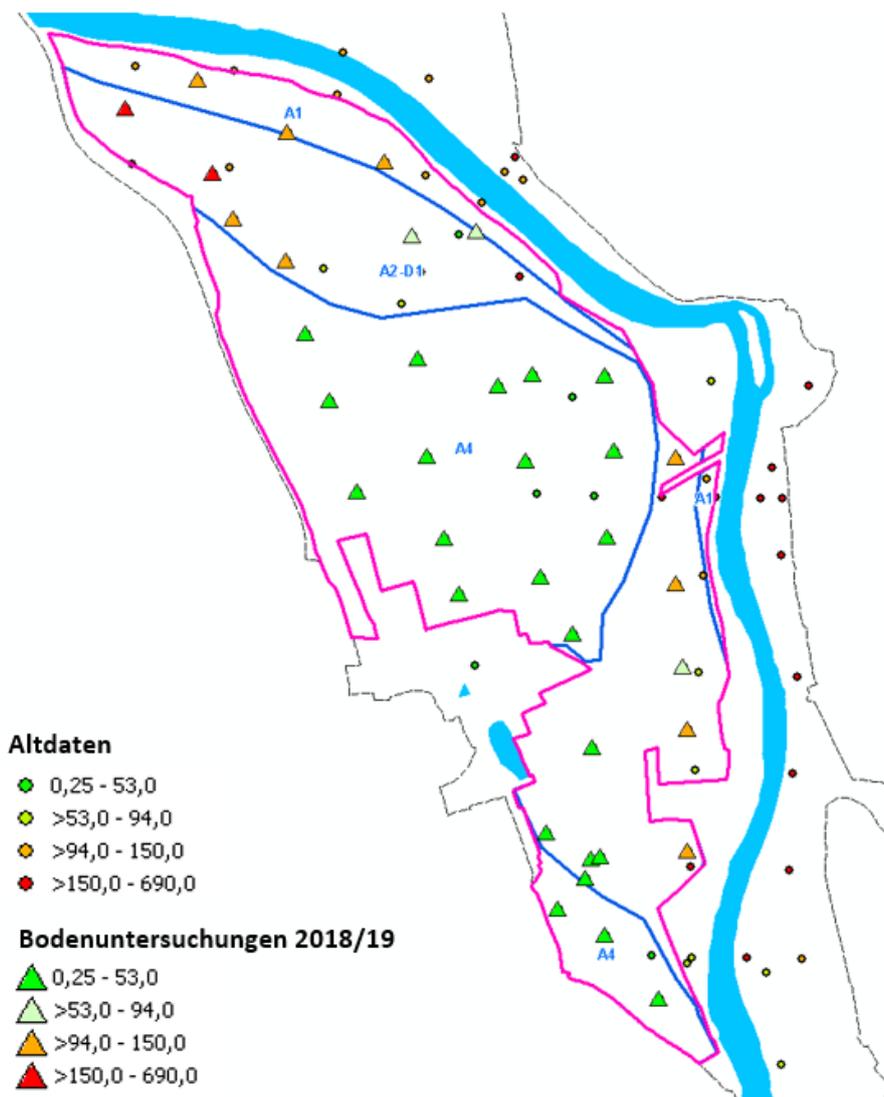


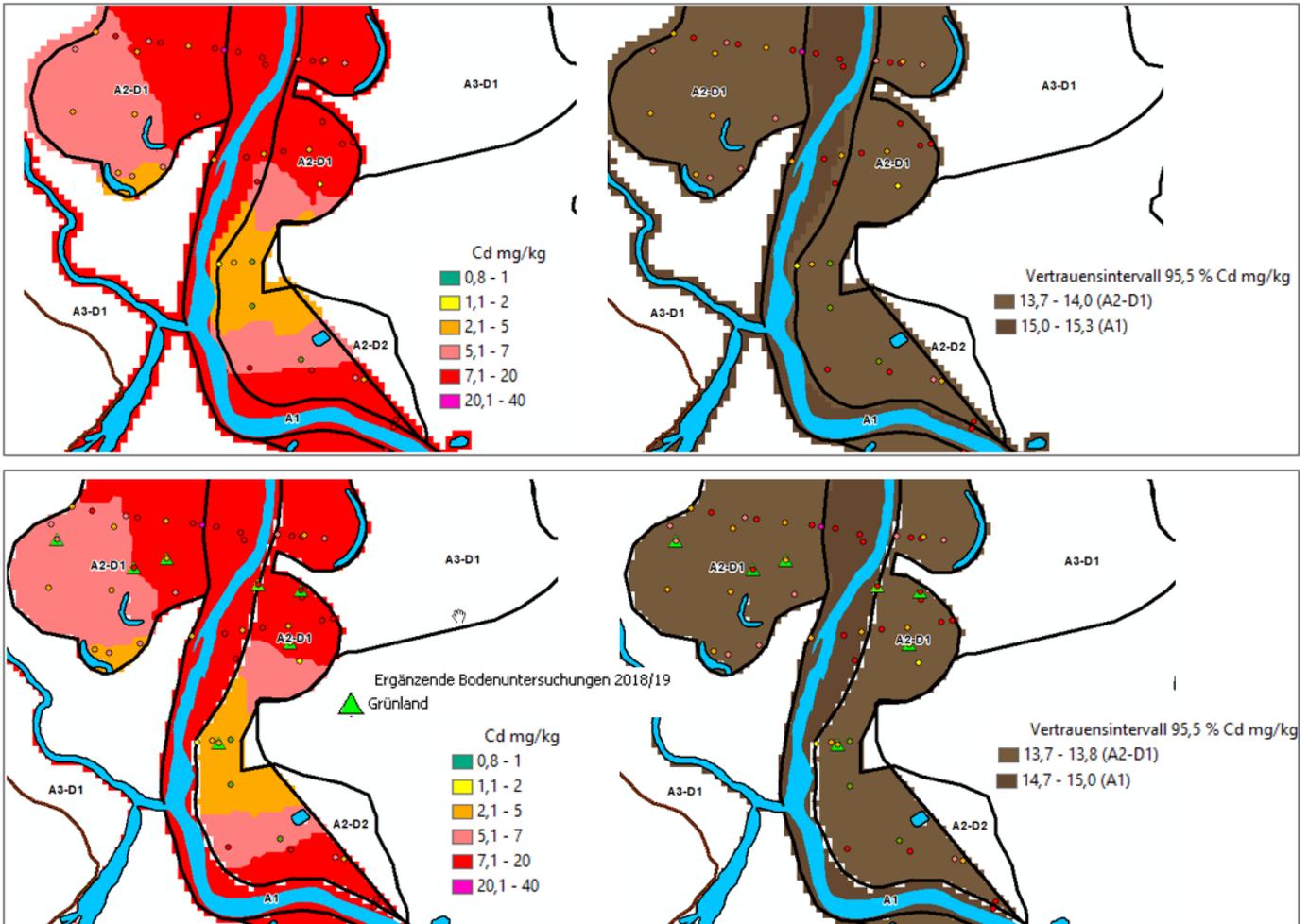
Abbildung 31: Einordnung der Bodenuntersuchungen 2018/19 ins bestehende Messnetz anhand der Arsengehalte in Oberböden des Testgebietes Süd

Tabelle 17: Statistische Kenngrößen für Arsen in Raumeinheiten des Testgebietes Süd vor und nach den Probenahme 2018/19

RE-Modell 3.3	Datensatz	n	Median	P90	P95	IQA	IQA/2 in % des Medians
A1	Altdaten	3	110	126	128	16	7
	Alt+2018/19 (+3)	6	130	145	148	23	9
A2-D1	Altdaten	12	107	197	214	85	40
	Alt+2018/19 (+16)	28	97	193	220	88	46
A4	Altdaten	4	17	19	19	3	10
	Alt+2018/19 (+18)	22	15	19	19	2	7

6.7.2 Auswirkungen auf die Ergebniskarten der Interpolation

In den Raumeinheiten A1 und A2-D1 des Testgebietes Mitte erfolgte beispielhaft eine Interpolation der gemessenen Cadmiumgehalte ohne die 2018/19 neu erhobenen Bodendaten, um die Auswirkungen zusätzlicher Stützpunkte zu untersuchen. Der exemplarische Vergleich in Abbildung 32 – oben ohne und unten mit den neuen Bodenuntersuchungen - zeigt, dass sich die flächenhafte Vorhersage der Schadstoffgehalte im Oberboden erwartungsgemäß nur dort verändert, wo sich abweichende Stoffgehalte an neuen Messpunkten auf die räumliche Schätzoberfläche auswirken. Im Beispielausschnitt im Testgebiet Mitte ist das z. B. in der Raumeinheit A2-D1 der Fall, wenn auch nur mit sehr geringen Auswirkungen, da die neuen Messpunkte das bereits bekannte Belastungsniveau in der Raumeinheit bestätigen. Im südlichen Beispielausschnitt passen die ergänzenden Bodenuntersuchungen ins Wertenniveau der umliegenden Standorte, so dass das klassifizierte Schätzergebnis gleich ist. Die aus der Kriging-Varianz berechneten Vertrauensintervalle reduzieren sich durch Einbeziehung der neuen Bodenuntersuchungen nur in geringem Maße (vgl. Abbildung 32). Die Verdichtung des Messnetzes wirkt sich in Bereichen, die bereits vorher ein dichtes Messpunktnetz aufwiesen, nur in geringem Maße aus. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass die Gebiete, die mit den vorhandenen Rastern mit Messpunktabständen von 100-150 m hinreichend untersucht sind, um das Vorhersagemodell so belastbar wie möglich zu machen.



Hinweis: Die Überlagerungen der Rasterzellen über Raumeinheitengrenzen hinweg sind dadurch bedingt, dass in einem 25 m-Puffer gerechnet wurde und hier auf ein Zuschneiden verzichtet wurde.

Abbildung 32: Ergebniskarten der Interpolation für zwei Raumeinheiten im Testgebiet Mitte ohne (oben) und mit (unten) ergänzenden Bodenuntersuchungen

7 Übertragung auf die Gesamtaue

Die vorangehend beschriebenen Methoden sind prinzipiell auf die gesamte Aue der Vereinigten Mulde anwendbar. Die Belastbarkeit der Aussagen des Vorhersagemodells ist mit den beschriebenen Methoden quantifizierbar. Auentypisch sind die Gehalte der untersuchten Stoffe Arsen, Blei und Cadmium in der Fläche sehr variabel. Mit Hilfe des Raumeinheitenansatzes und der darauf bezogenen Interpolation ist es möglich, diese Variabilität sowohl mit bekannten linienhaft verlaufenden Grenzen als auch mit fließenden Veränderungen der Stoffgehalte im Raum abzubilden. Die Obergrenzen der Vertrauensintervalle (95,5 %) der Schätzwerte liegen im interpolierten Testgebiet in einer Größenordnung von etwa 30 % in flussfernen bis 110 % in flussnahen Raumeinheiten über den auf Basis der Messungen geschätzten Gehalten von Cadmium und Arsen (vgl. Kap. 6.6.2).

Die Untersuchungen zeigten, dass ein Raumeinheitenmodell, das die Faktoren „Altarmbereich“ und „Anzahl Dämme“ abschnittsspezifisch berücksichtigt, den besten Differenzierungsgrad für das Gesamtgebiet liefert (7 Raumeinheiten mit rund 160 Teilflächen $\geq 100 \text{ m}^2$ ohne Gewässerflächen). Die flussferne Einheit A4 sollte für die Anwendung im Bodenschutz-Vollzug nach Nutzung untergliedert werden, da hier nicht eindeutig die ackerbauliche oder die Grünlandnutzung vorherrscht.

Für die Vorhersage flächenhafter Stoffgehalte ist die Interpolation innerhalb von Raumeinheiten besser geeignet als die Kennzeichnung von Raumeinheiten mit statistischen Kenngrößen. Für die Interpolation innerhalb von Raumeinheiten sollte – über die Gliederung in Nord- und Süd-Teil hinaus – auf eine weitergehende Untergliederung des Raumeinheitenmodells in Flussabschnitte verzichtet werden, da der Aufwand für eine Bearbeitung dann erheblich zunimmt (z. B. entstehen bei einer Untergliederung an zwei Zuflüssen und 4 Wehren ca. 30 Raumeinheiten). Dem könnte dadurch begegnet werden, dass eine Interpolation mit Korrekturfaktoren nach LUA NRW (2000) erfolgt. Dabei muss nicht separat in einzelnen Raumeinheiten interpoliert werden. Vor der Interpolation werden die Messwerte an den Untersuchungspunkten um systematische Abweichungen von den mittleren Gehalten der jeweiligen Raumeinheit korrigiert; nach der Interpolation werden diese Abweichungen den Schätzwerten dieser Raumeinheit wieder zugeschlagen. Aufgrund der hohen Variabilität der Stoffgehalte im Untersuchungsgebiet innerhalb aller Raumeinheiten (vgl. Kap. 6.4.2) ist bei einer Interpolation mit Korrekturfaktoren jedoch zu erwarten, dass die Korrekturfaktoren nicht mit einer ausreichenden Belastbarkeit berechnet werden können. Durch die Korrektur entstehen so an allen geschätzten Rasterzellen Unsicherheiten im Schätzergebnis. Daher wird ein Interpolationsansatz innerhalb von Raumeinheiten als besser geeignet für die Vorhersagequalität des Modells angesehen als ein raumeinheitenübergreifender mit Anwendung von Korrekturfaktoren. Zur mathematischen Begründung ist eine Variogramm-Analyse und nach Möglichkeit auch eine Kreuzvalidierung zu empfehlen. Aber auch mit einem vereinfachten Ansatz ohne diese vertiefenden Analysen sind Ergebnisse erreichbar, die das flächenhafte Stoffmuster der Untersuchungspunkte zufriedenstellend abbilden.

Wenn zusätzlich zu Bodenbelastungskarten flächenhafte Angaben zur Schätzgüte vorliegen, sind Bereiche mit belastbaren Aussagen zum Schadstoffgehalt abgrenzbar. Gleichzeitig können Flächen mit unsicheren Aussagen ergänzend zum Verfahren über die Anzahl von Messstandorten je Teilfläche innerhalb von Raumeinheiten identifiziert werden. Flächen, die vergleichsweise homogene Gehalte von Arsen, Blei und Cadmium aufweisen, wurden mit dem entwickelten Raumeinheitenmodell herausgearbeitet (A4, Teilbereiche von A3). Das aus der Kriging-Varianzberechnete Vertrauensintervall kann als Maß für eine gute Belastbarkeit genutzt werden. Dann können die Aussagen für Flächen, bei denen die obere Grenze des Vertrauensintervalls die Schätzwerte z. B. um weniger als 50 % oder sogar um weniger als 30 % überschreitet, als belastbar gekennzeichnet werden.

Im Hinblick auf den Erkenntnisgewinn durch die ergänzenden Bodenuntersuchungen 2018/19 lässt sich feststellen: In den meisten Raumeinheiten haben die ergänzenden Bodenuntersuchungen die bereits zuvor mit den Altdaten beschriebene Arsenbelastung des Oberbodens – so, wie sie anhand statistischer Kenngrößen charakterisiert ist – bestätigt. Durch ergänzende Bodenuntersuchungen wurde die Aussagequalität von statistischen Kenngrößen in einzelnen Raumeinheiten verbessert (Verringerung des Unsicherheitsmaßes in A2-D1, A2-D2 im Testgebiet Mitte und A4 im Testgebiet Süd). Relevante – weil mit Folgen für den Bodenschutz-Vollzug verbundene – Veränderungen ergeben sich anhand der statistischen Kenngrößen nur in einer Raumeinheit (A2-D2 im Testgebiet Mitte) (vgl. Kap. 6.7.1).

Auf ein interpolationsgestütztes Vorhersagemodell wirkt sich die Verdichtung des Messnetzes in Bereichen, die bereits vorher ein dichtes Messpunktnetz aufwiesen, erwartungsgemäß nur in geringem Maße aus. Das bedeutet, dass Gebiete mit den vorhandenen Rasteruntersuchungen und Transekten mit Messpunktabständen von 100-150 m hinreichend untersucht sind, um das Vorhersagemodell so belastbar wie möglich zu machen. Zumindest wurde in dieser Untersuchung kein weiterer Einflussfaktor gefunden, der auf Basis vorliegender Geodaten eine sinnvolle weitergehende Untergliederung ermöglicht.

Das Vorhersagemodell kann nach den gewonnenen Erkenntnissen durch zusätzliche Bodenuntersuchungen nur dort noch verbessert werden:

- wo größere Teilflächen (> 2.500 m²) in Raumeinheiten gar nicht untersucht sind (das trifft im Flussabschnitt Q1 nur auf wenige Teilflächen verschiedener Nutzung und in den Flussabschnitten Q2 bis Q4 für eine Ackerfläche bei Nischwitz zu) und
- wo in Raumeinheiten mit sehr hoher Variabilität (A1, A2, A2-D1, A3-D1) Lücken von mehreren 100 m zwischen Messpunkten vorliegen.

Die zuletzt genannten Bereiche lassen sich durch die Überlagerung der vorliegenden Messpunkte mit der Raumeinheitenkarte identifizieren, wobei die Variabilität von allen untersuchten Stoffen berücksichtigt werden sollte (stoffspezifische Unterschiede s. Abbildung 20).

Die Interpolation lieferte auch im südlichen Abschnitt der Aue, wo aufgrund des kleineren Auenquerschnitts flächenhafte Rasterbeprobungen fehlen, Ergebnisse, die das an den Untersuchungspunkten ermittelte Schadstoffmuster recht gut wiedergeben. Hier liegen allerdings mehr Teilflächen von Raumeinheiten mit einem geringen Stichprobenumfang vor, so dass die Unsicherheiten hier höher sind als im Nordteil der Aue. Durch zielgerichtete ergänzende Bodenuntersuchungen in den Raumeinheiten mit hoher Variabilität (A1, A2-D1) – dort wo Lücken von mehreren 100 m vorhanden sind – sowie auf einzelnen Teilflächen von Raumeinheiten ohne oder mit zu wenigen Messpunkten können hier Verbesserungen erzielt werden. In Raumeinheiten mit einem vergleichsweise homogenen Belastungsmuster (A3, A3-D2, A4) sind Lücken im Messnetz von mehreren 100 m akzeptabel und müssen nicht systematisch aufgefüllt werden; hier könnten die Stoffgehalte stichprobenhaft überprüft werden, um Handlungsbedarf für Einzelflächen ableiten zu können. Eine separate Bearbeitung von Nord- und Südteil mit der Grenze bei Wurzen bietet sich an, um das Interpolationsmodell jeweils an die unterschiedliche Flächenausprägung und Datenlage anzupassen.

Die Mindestprobenzahl sollte sich an der Variabilität des räumlichen Schadstoffmusters der jeweiligen Raumeinheit orientieren. In Raumeinheiten mit sehr hoher Variabilität der Stoffgehalte in der Fläche (z. B. wenn die obere Grenze des Vertrauensintervalls die Schätzwerte um mehr als 100 % überschreitet) werden Messpunktabstände von 150 m als gut geeignet angesehen (ca. 40 Proben pro km²) – wie bisher im Gebiet angewendet. Wenn Untersuchungsstandorte – wie ebenfalls im Gebiet angewendet – in Transekten über den gesamten Auenquerschnitt platziert werden – und zusätzlich noch das Kleinrelief repräsentativ (Senken

und Erhebungen gleichermaßen) beprobt wird, lässt sich das Messnetz optimieren. In Raumeinheiten mit geringer Variabilität (z. B. wenn die obere Grenze des Vertrauensintervalls die Schätzwerte um weniger als 50 % überschreitet) sind nach unserer Einschätzung Messpunktabstände von 500 m (ca. 9 Proben pro km²) ausreichend.

Für eine Übertragung der in den Testgebieten erarbeiteten Methoden auf die Gesamtaue sind folgende Schritte sinnvoll:

- Datenauswahl für Oberböden unter Grünland anhand eines angepassten Tiefenkriteriums (Einbeziehen aller Proben mit einer Horizontuntergrenze von ≤ 15 cm statt ≤ 10 cm) (vgl. Ausführungen zum Datenausschluss in Kap. 6.1)
- Betrachtung der Historie der Eindeichung, z. B. anhand historischer Karten, um die Sedimentationsgeschichte besser erklären zu können (Zeitraum natürlich geprägter Sedimentation in der gesamten Flussaue)
- Anpassen der Raumeinheitenkarte (Ergänzen des Faktors Nutzung in Raumeinheit A4)
- Beseitigung von Splitterpolygonen (< 100 m²)
- Berechnen der Vorhersagekarten für Oberböden mittels Kriging-Interpolation für Arsen, Blei und Cadmium sowie für weitere Stoffe (z. B. Kupfer) in dem wie oben angepassten Raumeinheitenmodell 3.3 (A1 bis A4, D1-D2 in A2 sowie in Q2: D1-D2 in A3; A4 gegliedert nach Nutzung) mit Ausgabevarianz und Berechnung von Vertrauensintervallen
- Validierung der Ergebnisse außerhalb der Testgebiete
- Kennzeichnen von Flächen mit Untersuchungsbedarf (s. o.).

Die Darstellung der Ergebniskarten der Interpolation in Raumeinheiten kann – wie in den Testgebieten entwickelt – klassifiziert nach statistischen Kenngrößen, ergänzt durch Beurteilungswerte des Bodenschutz-, Lebensmittel- und Futtermittelrechts erfolgen (vgl. z. B. Anlage A 2). Raumeinheiten, die häufig höhere Belastungen in der Tiefe zeigen, können gekennzeichnet werden (vgl. Kap. 6.6.4) oder es werden nach dem beschriebenen Vorgehen Vorhersagekarten für Unterböden berechnet (wie auch von BEAK 2018 durchgeführt). Flächen mit Nutzungen, die mit einer geringen Anzahl von Bodenproben untersucht wurden, sind in den Ergebniskarten zu kennzeichnen oder auszusparen (Wald, Siedlung).

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass mit den hier beschriebenen Ergebniskarten kein direkter Handlungsbedarf für den Vollzug des Bodenschutzrechts verbunden ist. Maßnahmen lassen sich erst aus den Ergebniskarten ableiten, indem ein Bezug zu Referenzwerten hergestellt wird und die Ergebnisse auf Schlaggrenzen heruntergebrochen werden (z. B. bei einem festgesetzten Flächenanteil mit Referenzwertüberschreitung).

8 Fazit und Handlungsempfehlungen

Die Untersuchungen in den drei Testgebieten bestätigen die 2018 für die Erstellung von Bodenbelastungskarten eingesetzten Einflussfaktoren und Methoden zur Herstellung des Flächenbezugs. Die hier entwickelten Ansätze bauen auf den dort verwendeten Arbeitskarten (BEAK 2018) auf und beruhen auf ähnlichen statistischen und geostatistischen Methoden. Die Methode zur Bildung homogener Raumeinheiten weicht geringfügig ab. Das hier verwendete Raumeinheitenmodell lehnt sich eng an die durch Einflussfaktoren beschriebenen Sedimentations- und Abtragsbedingungen in der Aue an und berücksichtigt dabei indirekt auch das Verhalten der Schadstoffe hinsichtlich ihrer Bindungseigenschaften und Mobilität in der Bodenlösung. Auf eine Anpassung von Raumeinheitengrenzen bzw. eine Unterteilung aufgrund von Teilflächen mit abweichenden Stoffgehalten an einzelnen oder mehreren Untersuchungsstandorten wird verzichtet.

Aufbauend auf den für die Aue der Vereinigten Mulde vorliegenden Daten und Berichten wurden folgende Ergänzungen vorgenommen:

- Anpassung des Verlaufs der Dämme im Untersuchungsgebiet anhand von Luftbildern und DGM für die Arbeitskarte zum Faktor Damm
- Überprüfung und weitergehende Anpassung des Raumeinheitenmodells an die Werteverteilungen von Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden durch Auswahl geeigneter Geofaktoren und Aggregation ihrer Ausprägungen bei ähnlichen Werteverteilungen, u. a. unter Verwendung multivariater statistischer Methoden
- Untersuchung, Beschreibung und Erklärungsansätze für das unterschiedliche Verhalten von Arsen und Blei gegenüber Cadmium und Entwicklung eines Ansatzes für die Berücksichtigung in der Fläche (stoffspezifische Unterschiede im mittleren Flussabschnitt)
- Erprobung und Bewertung von Ergebniskarten auf Basis statistischer Kenngrößen (nicht für ein belastbares Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte der Böden geeignet)
- Untersuchung und Bewertung des Einflusses des Kleinreliefs auf die Stoffgehalte von Arsen im Oberboden (für die Durchführung von Bodenuntersuchungen relevant, aber für die Berücksichtigung im Vorhersagemodell für Schadstoffgehalte der Böden nicht geeignet)
- Untersuchung und Bewertung der Eignung von Daten in Abhängigkeit des Zeitpunkts der Probenahme und des Einflusses verschiedener Messnetzkonzepte (Transekte, Raster) (Bestätigung der alten Untersuchungsergebnisse durch ergänzende Bodenuntersuchungen)
- Untersuchung der stoffspezifischen Tiefenverteilung von Arsen, Blei und Cadmium und deren Verbreitung in der Fläche (Lage von Untersuchungsstandorten mit höheren Belastungen in der Tiefe im Vergleich zum obersten Horizont sowie Raumeinheiten, in denen dies häufig auftritt)
- Prüfung und Bewertung des Nutzens von verdichtenden Bodenuntersuchungen für flächenhafte Vorhersagen im Gebiet vor dem Hintergrund des bereits vorhandenen Messnetzes
- Vorschläge zur Berücksichtigung der Aussagesicherheit in Ergebniskarten auf Basis der Vertrauensintervalle, berechnet aus der Kriging-Varianz.

Für die künftige Weiterbearbeitung der Fragestellung einer flächenhaften Vorhersage stofflicher Bodenbelastungen in der Aue der Vereinigten Mulde werden folgende Möglichkeiten gesehen: Die Anwendbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Vorhersage von flächenhaften Schadstoffbelastungen kann durch die Anpassung und Anwendung des Raumeinheitenmodells – wie vorangehend beschrieben – verbessert werden. Dazu empfohlen wird eine Untergliederung der flussfernen Raumeinheit A4 nach der Nutzung. Im Hinblick auf die Bodenbelastungskarten von BEAK (2018) ist ein Vergleich der Schätzergebnisse in den Testgebieten Süd und Nord sowie im restlichen Auengebiet und für mindestens Arsen und Cadmium sinnvoll, um die Vorteile des Raumeinheitenmodells 3.3 (Faktoren Altarmbereich/Damm), das den zweiten Flussabschnitt gesondert behandelt, zu überprüfen. Ein quantitativer Vergleich der Schätzgüte beider Modelle könnte weitere Erkenntnisse zur Optimierung des Raumeinheitenmodells und der geostatistischen Methode liefern.

Gut untersuchte Flächen können nach festgelegten Kriterien als belastbar gekennzeichnet und mit Schätzwerten der Stoffgehalte in den Oberböden dargestellt werden, um den Handlungsbedarf im Vollzug abzuleiten. Als Kriterien kommen hier der Stichprobenumfang pro Teilfläche einzelner Raumeinheiten bzw. die in den Teilflächen bestehenden Lücken im Messnetz (Entfernung zwischen Untersuchungsstandorten) und das darin ermittelte Vertrauensintervall der Schätzung in Frage. Durch eine gezielte Nachverdichtung des Messnetzes an ausgewählten Stellen – insbesondere im Flussabschnitt Q1 südlich Wurzen – können die Flächen mit geringer Vorhersagequalität weiter verkleinert und die Qualität innerhalb von Raumeinheiten verbessert werden. Aufgrund der kleinräumigen Variabilität, die sich auch bei den Bodenuntersuchungen im Projekt bestätigt hat, ist es unwahrscheinlich, dass die quantitative Aussagegenauigkeit von Interpolationsergebnissen allein durch eine Modellanpassung und -optimierung wesentlich verringert werden kann, dazu wären weitere Bodenuntersuchungen erforderlich. Es hat sich allerdings gezeigt, dass weitere Bodenuntersuchungen, die dort ansetzen, wo das Messnetz bereits sehr dicht ist, keine bessere Charakterisierung der Schadstoffbelastung innerhalb der Raumeinheiten erlauben. Auch lieferten neue Bodenuntersuchungen in Bereichen mit geringen Stoffgehalten keine abweichenden Ergebnisse (vgl. Ackerfläche im Testgebiet Süd in Kap. 6.7.1). Daher sollten sich weitere Bodenuntersuchungen darauf beschränken, einerseits die aus den Ergebniskarten und deren Vorhersagequalität ableitbaren Untersuchungsbedarfe zu berücksichtigen (vgl. Kap. 7) und daneben auch aus Vollzugssicht Flächen für Nachuntersuchungen zu priorisieren (z. B. Ackerflächen mit Hinweisen auf erhöhte Stoffgehalte).

Bei der Anwendung von Ergebnissen des Vorhersagemodells für Schadstoffgehalte ist zur Ableitung von Vollzugsfolgen der Bezug zu rechtlichen Regelungen des Bodenschutz-, Abfall-, Futtermittel- und Lebensmittelrechts (Prüf- und Maßnahmenwerte, Z-Werte u. a. Referenzwerte) herzustellen. Anhand dieser Einstufung (siehe z. B. Anlage A 2) lässt sich feststellen, ob ein geschätzter Stoffgehalt und dessen Unsicherheit relevant ist oder ob sich auch bei einer zu erwartenden Veränderung keine anderen Rechtsfolgen ergeben. Auf Flächen mit einer hohen Variabilität der Schadstoffverteilung (Kriterien s. Kap. 7) sollte immer ein Abgleich der Schätzfläche mit den dort gemessenen Punktdaten stattfinden. Die hohe Variabilität ist charakteristisch für die in der vorliegenden Untersuchung herausgearbeiteten Teilbereiche der Aue der Vereinigten Mulde. Die damit verbundenen Unsicherheiten sind im Vollzug in geeigneter Weise zu berücksichtigen, z. B. mit nach Wahrscheinlichkeitsniveaus für eine Überschreitung von Beurteilungswerten gestaffelten Maßnahmenkonzepten (wie im Bodenplanungsgebiet Freiberg in Anwendung) und durch die Möglichkeit, einen mit Unsicherheiten behafteten Belastungsverdacht mittels Bodenuntersuchung zu widerlegen.

Aufbauend auf den methodischen Untersuchungen können Siedlungsgebiete bearbeitet werden, wenn die bisher vorliegenden Anhaltspunkte für die Schadstoffbelastung innerhalb der Aue weiter mit Messdaten unterlegt werden sollen. Ergänzende Bodenuntersuchungen in Siedlungsgebieten sollten Belastungen berücksichtigen, die nicht nur aufgrund von Sedimentation und Ablagerung aus dem Fluss hervorgerufen werden, sondern auch durch menschliche Eingriffe wie Umlagerung, Aufschüttung, industrielle und gewerbliche Einträge. Bei den Bodenuntersuchungen ist darauf zu achten, dass technogene Substrate fachgerecht charakterisiert werden, um deren Einfluss auf die Stoffgehalte belegen und in einem Vorhersagemodell berücksichtigen zu können.

9 Quellen

- ACKERMANN, J.; VETTERLEIN, D. & KUEHN, T. & KAISER, K. & JAHN, R. (2010): Minerals controlling arsenic distribution in floodplain soils. *European Journal of Soil Science*. 61. 588-598. 10.1111/j.1365-2389.2010.01260.x.
- BEAK – Beak Consultants GmbH/Arcadis Consult GmbH (2018): Digitales Kartenwerk für die Festlegung eines Bodenplanungsgebietes gemäß § 9 SächsABG im Überschwemmungsgebiet der Vereinigten Mulde. Bericht im Auftrag der Landesdirektion Sachsen, Freiberg (unveröffentlicht).
- BMU & BfN/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit & Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2009): Auenzustandsbericht. Flussauen in Deutschland. Berlin, 35 S., <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/wasser/Dokumente/Auenzustandsbericht.pdf> zuletzt aufgerufen am 25.11.2020.
- BRIEM, E. (2003): Gewässerlandschaften der Bundesrepublik Deutschland. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abfall e.V., Rheinbach.
- JAHN, R. & KASTLER, M. (2006): Stellungnahme zur Nutzbarmachung einer Bodenprognosekarte zur Erstellung einer SM-Belastungskarte. Landesamt für Umwelt Sachsen-Anhalt, Halle (S.) (unveröffentlicht).
- ESRI (2017): ArcGIS-Hilfebibliothek ArcGIS 10.5.
- FINANZAMT GIEßEN, Hessen (2011): Bodenschätzung. Modul MK 51 U Standortbewertung für Landwirtschaft und Naturschutz. Präsentation (unveröffentlicht).
- HINTERDING, A. & STREIT, U. (2000): Grundsätzliche Ansätze zur Auswertung punktbezogener Daten und der Ermittlung des Flächenbezugs. Umweltbundesamt (Hrsg.). Flächenhafte Darstellung punktbezogener Daten über Stoffgehalte in Böden (UBATexte 00/49), S. 40-49.
- KASTLER, M.; KAUFMANN-BOLL, C.; LAZAR, S.; MARX, M., SCHILLI, C.; RINKLEBE, J. & LISCHIED, G. (2015): Schadstoffbelastung von Überschwemmungsböden. Abschlussbericht zum gleichnamigen UFOPLAN-Vorhaben. FKZ 3711 71 214. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau (unveröffentlicht).
- KASTLER, M.; KAUFMANN-BOLL, C.; RINKLEBE, J. & LISCHIED, G. (2017): Bundesweite Kennzeichnung des stofflichen Zustands von Auenböden. 2. Zwischenbericht zum gleichnamigen UFOPLAN-Vorhaben, FKZ 3715712000, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau (unveröffentlicht).
- KOENZEN, U. (2005): Fluss- und Stromauen in Deutschland – Typologie und Leitbilder. Ergebnisse des F+E Vorhabens „Typologie und Leitbildentwicklung für Flussauen in der Bundesrepublik Deutschland“, Bundesamt für Naturschutz. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 65. Bonn-Bad Godesberg.
- LABO – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, LABO (2017): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Fassung_HGW_Bericht_02_2017.pdf
- LANUV NRW – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2011): Leitfaden zur Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten. Teil III: Erfassung von und Umgang mit überschwemmungsbedingten Belastungsbereichen, LANUV-Arbeitsblatt 17.
- LFUG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2006): Landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzung auf schadstoffbelasteten Flächen im Freistaat Sachsen – Pilotprojekt Auenböden Vereinigte Mulde. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14089>.
- LFUG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2008): Auenmessprogramm des Freistaates Sachsen - Untersuchung der Auenböden der Elbe und des Muldesystems auf Arsen und Schwermetalle. <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/14360.htm>
- LFULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015): Sonderuntersuchungen Hochflutsedimente Juni-Hochwasser 2013. <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/30797.htm>.
- LFULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2017): Fachinformationssystem Boden Datenfelder und Schlüsselreferenzen. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage.

- LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2000): Leitfaden zur Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten, Teil I: Außenbereiche. Merkblätter des LUA, Nr. 24, Essen.
- LISCHEID, G.; BITTERSÖHL, J. (2008): Tracing biogeochemical processes in stream water and ground-water using non-linear statistics. In: Journal of Hydrology 357, 11-28.
- POTTGIESSER, T. & SOMMERHÄUSER, M. (2004): Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen – Steckbriefe und Anhang, Essen.
- R CORE TEAM (2019): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- SCHAFMEISTER, M.-TH. (1999): Geostatistik für die hydrogeologische Praxis. Springer, Berlin.
- SCHILLI, C. (2017): Nonlinear multivariate statistical analysis of long-term soil monitoring datasets of different scales. Dissertation an der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Bergischen Universität Wuppertal.
- SCHILLI, C.; LISCHEID, G. & RINKLEBE, J. (2010): Which processes prevail? Analyzing long-term soil solution monitoring data using nonlinear statistics. Geoderma 158, S. 412-420.
- SCHILLI, C.; RINKLEBE, J.; LISCHEID, G. & KAUFMANN-BOLL, C. (2011): Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze Teil B: Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings. UBA Texte 90/2011. FKZ 3707 71 203 Umweltbundesamt Dessau-Roßlau.
- SPALTMANN, C. (2017): Entwicklung einer Untersuchungs- und Handlungsstrategie zur Bodenuntersuchung in der Lippeaue unter Berücksichtigung der auenspezifischen Einflussfaktoren und räumlichen Verteilung der Bodenbelastung, Masterarbeit Hochschule Osnabrück (unveröffentlicht).
- TENENBAUM, J.B.; DE SILVA, V. & LANGFORD, J.C. (2000): A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction, Science 290, S. 2319-2322.

Datengrundlagen

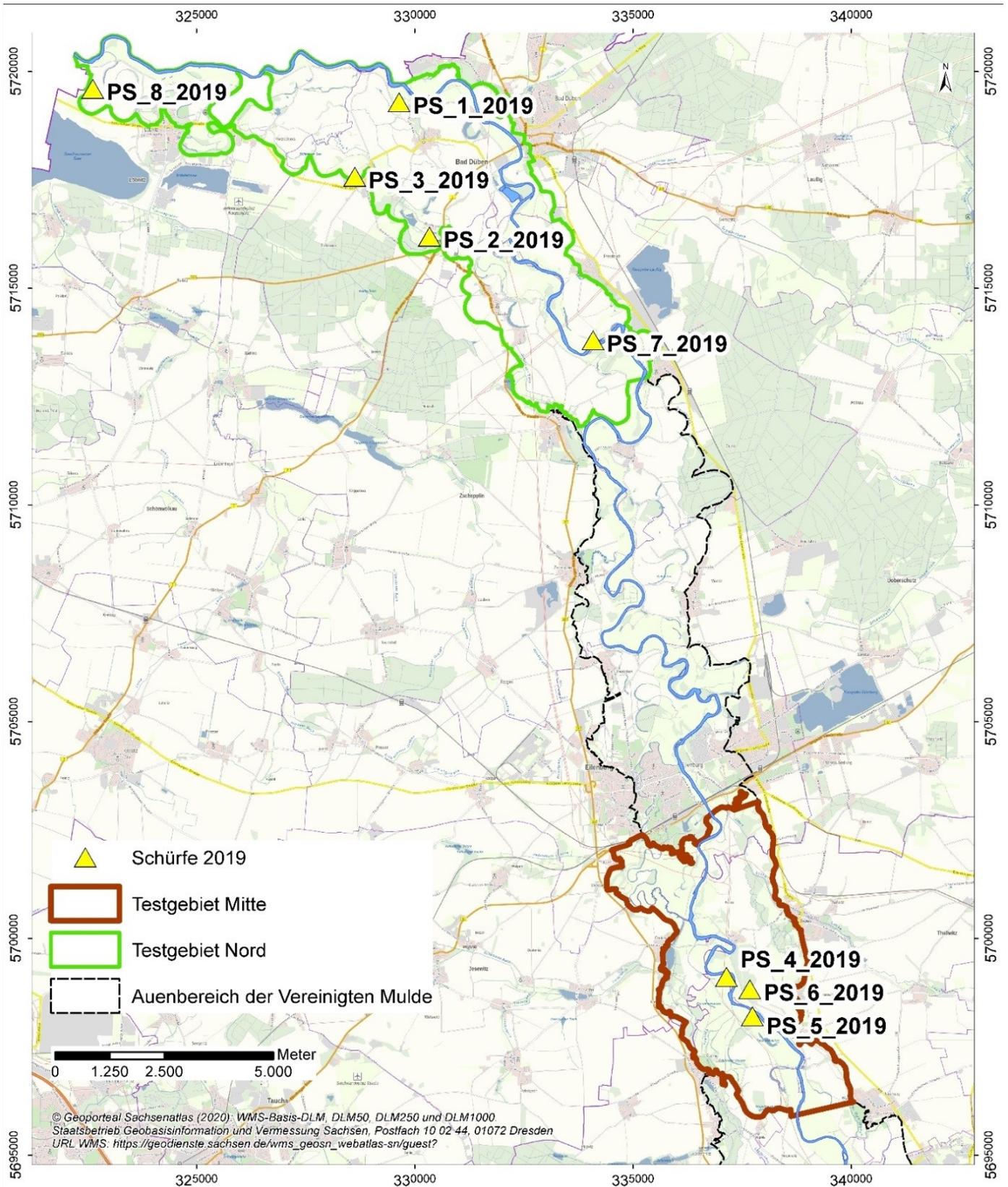
- Altablagerung/Deponien, Kläranlagen/Abwasserkanäle u. a. (Altlasten) 2016/2018 (BEAK 2018)
- Auenzustandsbericht Abgrenzung Auen, Segmente, rezente und Altaue 1:25.000 (Aue_BFN_Segmente) (BFN 2011)
- Auenzustandsbericht Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BUEK_AZB_Union_utm32) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Einzugsgebiet Vereinigte Mulde mit Freiburger und Zwickauer Mulde (EZG_DLM1000W) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Gewässergroßlandschaften (Koenzen_Gewaessergrosslandschaften) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Hydrologie Vereinigte Mulde (BfN_AZB_Segmente_dslv_HAD_Durchfluss) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Lithologie (HAD_litho_poly) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Raumeinheiten und Auentyp (Auentyp_AZB) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Substrat (Koenzen_Auentyp_Basissubstrat) (BMU & BFN 2009)
- Auenzustandsbericht Wasserdargebot (Koenzen_Hydrologische_Informationen) (BMU & BFN 2009)
- BK50 Bodenart Bodenplanungsgebiet Vereinigte Mulde (bk50_BPG_bodenart_oben) (BEAK 2018)
- BK50 Bodentypen Bodenplanungsgebiet Vereinigte Mulde (bk50_BPG_bodentypen) (BEAK 2018)
- Bodenartklasse BK50 Bodenplanungsgebiet Vereinigte Mulde (BEAK 2018)
- Bodenschätzung Flächen-Daten (Bodenschätzung_Schaetzflaechen_Mulde) (LfULG 2020)
- Bodenschätzung Grablöcher (Punktdaten) (Bodenschätzung_GL_Mulde) (LfULG 2020)
- Deiche und Bauwerke (Deiche_EMUWE, Bauwerke, DEICHE_VM, Hochwassermaue_EMUWE, Station_EMUWE) (LTV Sachsen 2011)

Deiche und Dämme ATKIS (DEICHE_ATKIS_VM) (GeoSN 2018)
Digitales Höhenmodell Rastergröße 10 m (dgm_10) (GeoSN)
Digitales Höhenmodell Rastergröße 2 m (dgm_2) (GeoSN)
Digitales Höhenmodell Rastergröße 5 m (dgm_5) (GeoSN)
Einflussfaktor Altarmbereiche (Einflussfaktor_01_Gelaende_Typ) (BEAK 2018)
Einflussfaktor Auenböden (Einflussfaktor_04_Sedimentation_Boden) (BEAK 2018)
Einflussfaktor Flächennutzung auf Basis ATKIS (Einflussfaktor_07_Flaechennutzung) (BEAK 2018)
Einflussfaktor Flussabschnitte mit unterschiedlichem Gefälle
(Einflussfaktor_06_Gefaelle_Fluss) (BEAK 2018)
Einflussfaktor Höhe über dem Fluss (Einflussfaktor_02_Morphologie) (BEAK 2018)
Einflussfaktor Lage der Flächen in Bezug zu Dämmen in der Aue für As, Cd und Pb
(Einflussfaktor_05_Damm) (BEAK 2018)
Einflussfaktor Wasserstand bei Überschwemmung HQ500
(Einflussfaktor_03_Intensitaet_Wasserstand_HQ500) (BEAK 2018)
Einzugsgebiet Vereinigte Mulde mit Freiburger und Zwickauer Mulde (EZG_VM) (LfULG)
Einzugsgebiete der Fließgewässer (BPG_Gewaesser) (LfULG)
Flächennutzung ATKIS (Flaechennutzung_20170224) (BEAK 2018)
Fließgewässer I. und II. Ordnung ATKIS Sachsen (EZG_VL) (LfULG)
Fließgewässerlandschaften in Sachsen 1:200.000 (FLG_LANDSCH_VM) (LfULG 2004)
Geologische Karte 1:50.000 Bodenplanungsgebiet Vereinigte Mulde (gk50_BPG) (BEAK 2018)
Gewässerstrukturkartierung 1:5.000 Vereinigte Mulde (GEW_STRUKTUR_VM) (LfULG 2008)
Historische topografische Karten 1:25.000 1930er und -40er Jahre (messtischblatt_vor_1945) (GeoSN)
Homogene Raumeinheiten innerhalb des Bodenplanungsgebietes Vereinigte Mulde (HRE_Damm_ FN_20170310_Elimina11) (Beak 2018)
Militärische Altlasten (altlastenflaeche_punkt) (Untere Bodenschutzbehörde)
Überflutungsfläche Hochwasser 2013 Elbe und Mulde 1:10.000 bzw. 1:25.000 (UEFL_HW2013_Mulde) (LfULG u. a.)
Überflutungsfläche Hochwasser August 2002 1:10.000 bzw. 1:25.000 (UEFL_HW2002_Mulde) (LfULG u. a. 2007)
Überflutungsfläche HQ100 (HQ100_VM, UEG_HQ100_VM) (LTV Sachsen)
Überflutungsfläche HQ20 (hq_20) (GeoSN)
Überflutungsfläche HQ25 Vereinigte Mulde: Gefahren- und Intensitätskarten der Hochwasserschutzkonzepte Sachsen (hq25_gfk_ETRS, hq25_ik_ETRS) (LTV Sachsen 2004)
Überflutungsfläche HQ50 Vereinigte Mulde: Gefahren- und Intensitätskarten der Hochwasserschutzkonzepte Sachsen (hq50_gfk_ETRS, hq50_ik_ETRS) (LTV Sachsen 2004)
Überflutungsfläche HQ500 (intensitaet_hq500_zst2a_utm) (LTV Sachsen)

Anlagen

A 1 Bodenprofile

A 1.1 Lage der Schürfe



A 1.2 Bodenprofil PS_1_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	329643
Hochwert (UTM)	5719296
Bodentyp	Reliktische Acker-Normvega
Substrat	Skelett führender Lehm über Skelett führendem Sand
Nutzung	Grünland
Bewuchs	Gras
Datum	17.05.2019
Vernässungsgrad	nicht vernässt
mittlerer Grundwasserstand	extrem tiefe Grundwasserstufe
Bemerkungen	AUK-Maßnahmen-Fläche; trocken rolliges Substrat, zurzeit kein weiteres Graben möglich



A 1.2.1 Profilbeschreibung PS_1_2019:

Grenze [cm]		Hori-zont	Farbe	Humus-gehalt	Redox-merkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungs-dichte	Genese	Fein-bodenart	Grob-boden [Vol-%]	We eff [dm]
0	12	aAh	10YR4/2	h3	-	feu2	kro-bro	Ld2	auenabgelagert	Slu	Reinkies	4
12	30	arAp	10YR4/3	h2	-	feu2	pla	Ld3	auenabgelagert	Slu	Reinkies	4
30	36	aM	10YR5/4;10YR6/6	h1	-	feu2	pla-sub	Ld2	auenabgelagert	Slu	Reinkies	4
36	62	aM	10YR4/2;10YR5/4	h1	-	feu2	ein	Ld1	auenabgelagert	mS	Reinkies	15
62	80	aM	10YR5/3	h1	-	feu2	ein	Ld1	auenabgelagert	mSgs	Reinkies	40
80	230	ailCv	10YR5/4	h0	-	feu1	ein	Ld1	auenabgelagert	gS	Reinkies	20

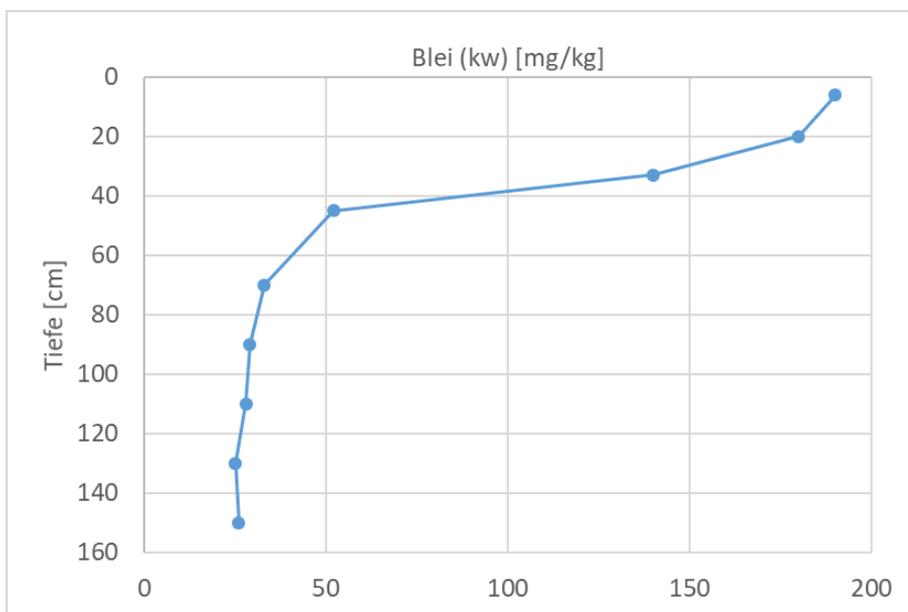
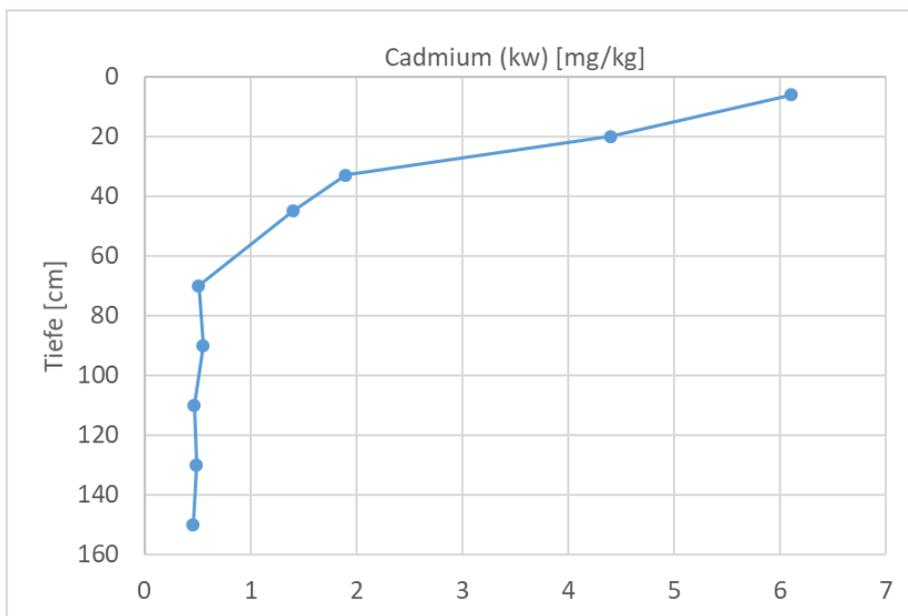
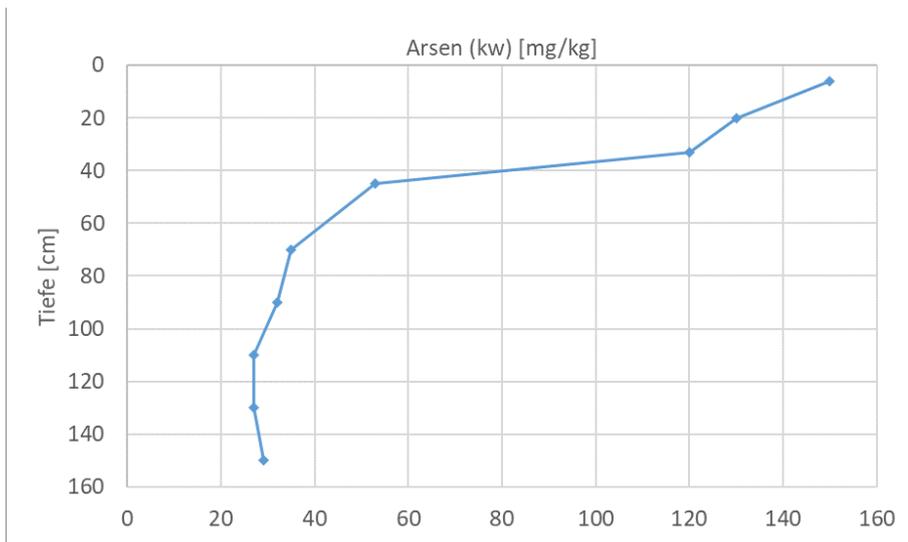
mittel
(3 bis < 7)

A 1.2.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_1_2019								
Tiefe	cm	0-12	15-25	30-36	40-50	65-75	80-100	100-120	120-140	140-160
Hauptbodenart		Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	96	96	96	85	60	80	80	80	80
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	4	4	4	15	40	20	20	20	20
C _{org}	%	3,38	2,41	0,9	1,35	0,25	0,13	<0,10	<0,10	0,19
CaCO ₃	%		<0,10	<0,10						
N _{gesamt}	%	0,29	0,15	0,05	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
pH-Wert	-	5,5	6,1	6,5	5,8	5,6	5,7	5,7	6	5,5
Arsen (Königswasser)	mg/kg	150	130	120	53	35	32	27	27	29
Arsen (mobil)	µg/kg	32	<25							

Bezeichnung	Einheit	PS_1_2019								
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	6,1	4,4	1,9	1,4	0,51	0,55	0,47	0,49	0,46
Cadmium (mobil)	µg/kg	200	63							
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	11	9,6	8,6	40	3,8	3,5	3,3	3,2	3,2
Cobalt (mobil)	µg/kg	<15	<15							
Chrom (Königswasser)	mg/kg	34	28	18	79	4,3	3,4	3,5	2,9	4,2
Chrom (mobil)	µg/kg	<25	<25							
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	52	44	26	16	6,7	5,1	8,3	9,3	5,2
Kupfer (mobil)	µg/kg	<25	<25							
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	0,36	0,31	0,29	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,07
Mangan (mobil)	µg/kg	7400	1600							
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	1	0,87	0,62	0,6	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Molybdän (mobil)	µg/kg	<15	<15							
Nickel (Königswasser)	mg/kg	25	21	16	9,9	4,9	4,4	4,2	3,9	4,3
Nickel (mobil)	µg/kg	160	40							
Blei (Königswasser)	mg/kg	190	180	140	52	33	29	28	25	26
Blei (mobil)	µg/kg	79	16							
Antimon (Königswasser)	mg/kg	3,9	3,7	2,7	1	<1	<1	<1	<1	<1
Antimon (mobil)	µg/kg	<25	<25							
Selen (Königswasser)	mg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,35	0,28	0,21	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Thallium (mobil)	µg/kg	11	12							
Uran (Königswasser)	mg/kg	8,2	6,3	2,9	2	1	<1	<1	<1	1
Uran (mobil)	µg/kg	<25	<25							
Zink (Königswasser)	mg/kg	360	280	190	100	53	43	36	34	30
Zink (mobil)	µg/kg	6.400	820							

A 1.2.3 Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:



A 1.3 Bodenprofil PS_2_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	330340
Hochwert (UTM)	5716197
Bodentyp	Reliktischer Acker-Auengley-Pseudogley
Substrat	Schluff über tiefem Lehm über tiefem, Skelett führendem Sand
Nutzung	Weide
Bewuchs	Gras
Datum	17.05.2019
Vernässungsgrad	sehr stark vernässt
mittlerer Grundwasserstand	sehr tiefe Grundwasserstufe zwei
Bemerkungen	eventuell Terrasse (pky/Lol)



A 1.3.1 Profilbeschreibung PS_2_2019:

Grenze [cm]		Horizont	Farbe	Humusgehalt	Redoxmerkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungsdichte	Genese	Feinbodenart	Grobboden [Vol-%]	We eff [dm]
0	8	aAh	10YR4/3	h2	-	feu2	sub	Ld3	auenabgelagert	Ut4	Reinkies	2
8	20	arAp	10YR4/4	h2	-	feu2	pol	Ld3	auenabgelagert	Ut4	Reinkies	2
20	30	arAp-Sdw	10YR4/4;7.5YR5/8	h2	e,roe,g3,f5	feu2	pol	Ld2	auenabgelagert	Ut4	Reinkies	2
30	60	aGo-Swd	kein Erkenntnisstand	h0	e,mr,g5,f9,	feu2	pol	Ld3	auenabgelagert	Ut4	Reinkies	1
60	80	aGo-Sd	kein Erkenntnisstand	h0	e,mr,g4,f9	feu2	pol-koh	Ld3	auenabgelagert	Ut4	Reinkies	1
80	110	aSdw-Go	10YR6/8	h0	e,fl,g4,f9	feu4	koh	Ld2	auenabgelagert	Ls2	Reinkies	1
110	130	aGor	kein Erkenntnisstand	h0	e,fl,g4,f4,r,dif,g4,f8	feu6	koh	Ld2	auenabgelagert	mS	Reinkies	5
130	160	aGr	kein Erkenntnisstand	h0	r,dif,g4,f4	feu6	koh	Ld2	auenabgelagert	mS	Reinkies	5

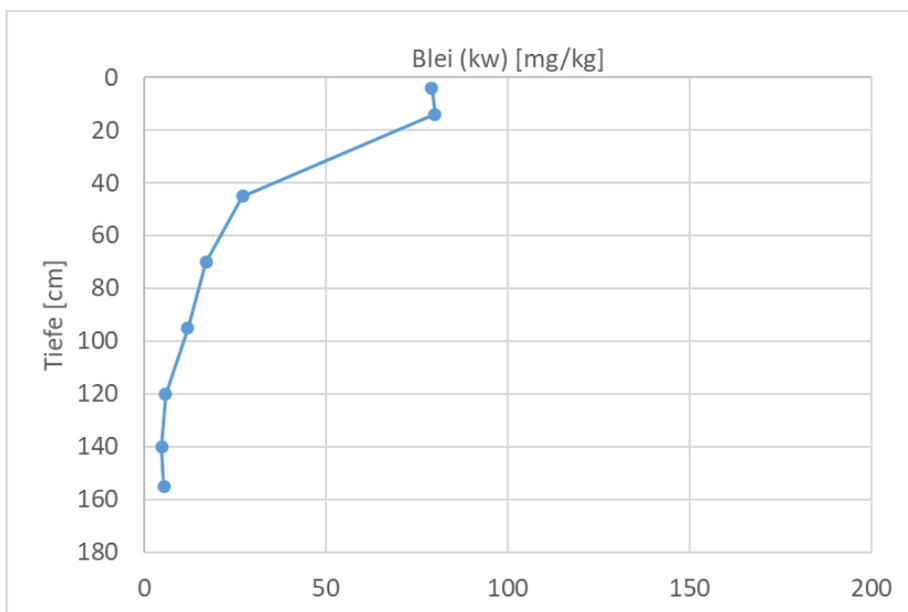
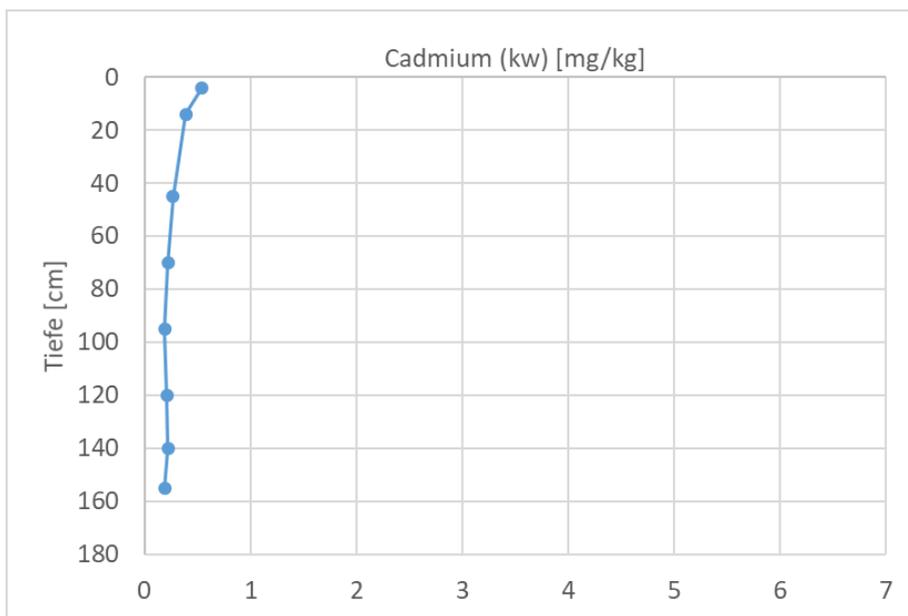
mittel
(3 bis < 7)

A 1.3.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_2_2019							
		0-8	8-20	40-50	65-75	90-100	115-125	130-150	150-160
Tiefe	cm	0-8	8-20	40-50	65-75	90-100	115-125	130-150	150-160
Hauptbodenart		Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Lehm	Sand	Sand	Sand
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	98	98	99	99	99	95	95	95
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	2	2	1	1	1	5	5	5
C _{org}	%	2,82	1,93	0,7	0,31	0,27	0,2	0,18	0,25
CaCO ₃	%								
N _{gesamt}	%	0,3	0,19	0,08	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02
pH-Wert	-	4,7	4,4	4,3	4,2	4,2	4,5	4,4	4,7
Arsen (Königswasser)	mg/kg	53	54	18	13	4,8	3	2,4	2,5
Arsen (mobil)	µg/kg	<25	34						

Bezeichnung	Einheit	PS_2_2019							
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	0,54	0,39	0,27	0,22	0,19	0,21	0,22	0,19
Cadmium (mobil)	µg/kg	100	120						
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	8,6	8,7	8	5,4	4	<2	2,1	2,2
Cobalt (mobil)	µg/kg	180	200						
Chrom (Königswasser)	mg/kg	46	47	45	30	24	11	7,9	8,4
Chrom (mobil)	µg/kg	<25	<25						
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	22	25	15	8,9	11	7,7	4,3	12
Kupfer (mobil)	µg/kg	<25	<25						
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	0,065	0,12	0,095	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Mangan (mobil)	µg/kg	17.000	14.000						
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	0,56	0,56	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Molybdän (mobil)	µg/kg	<15	<15						
Nickel (Königswasser)	mg/kg	22	22	20	15	9,9	4,7	4,8	5,6
Nickel (mobil)	µg/kg	480	910						
Blei (Königswasser)	mg/kg	79	80	27	17	12	5,9	4,8	5,4
Blei (mobil)	µg/kg	350	1500						
Antimon (Königswasser)	mg/kg	1,6	1,5	1,1	<1	<1	<1	<1	<1
Antimon (mobil)	µg/kg	<25	<25						
Selen (Königswasser)	mg/kg	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,56	0,6	0,51	0,26	0,19	<0,10	<0,10	<0,10
Thallium (mobil)	µg/kg	23	26						
Uran (Königswasser)	mg/kg	5,4	5,5	5,3	4	3,1	2,1	1,5	1,5
Uran (mobil)	µg/kg	<25	<25						
Zink (Königswasser)	mg/kg	120	110	87	58	42	20	15	19
Zink (mobil)	µg/kg	1.900	2.200						

A 1.3.3 Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:



A 1.4 Bodenprofil PS_3_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	328626
Hochwert (UTM)	5717576
Bodentyp	Reliktischer Acker-Auenpseudogley - Gley
Substrat	Anthropogener, Skelett führender Ton aus Auenton über tonigem Sand
Nutzung	Grünland
Bewuchs	Gras
Datum	11.07.2019
Vernässungsgrad	stark vernässt
mittlerer Grundwasserstand	sehr tiefe Grundwasserstufe zwei
Bemerkungen	Beprobung erfolgt; Woelbacker-Höhenbereich; T II a2 -59



A 1.4.1 Profilbeschreibung PS_3_2019:

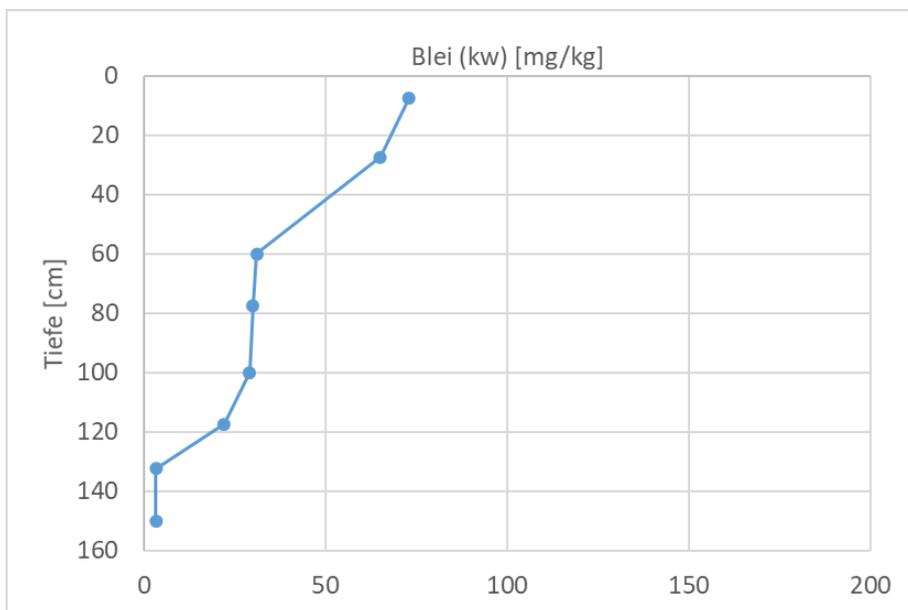
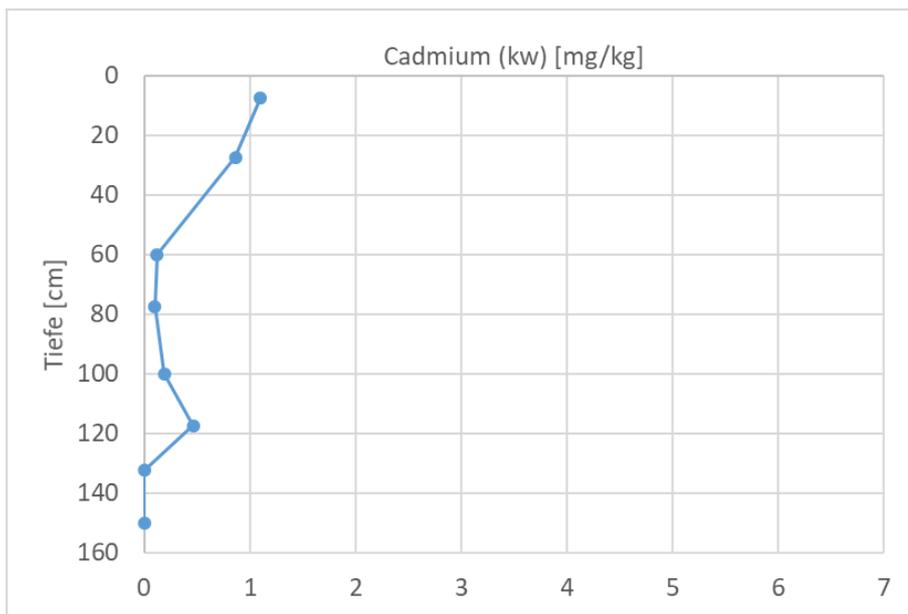
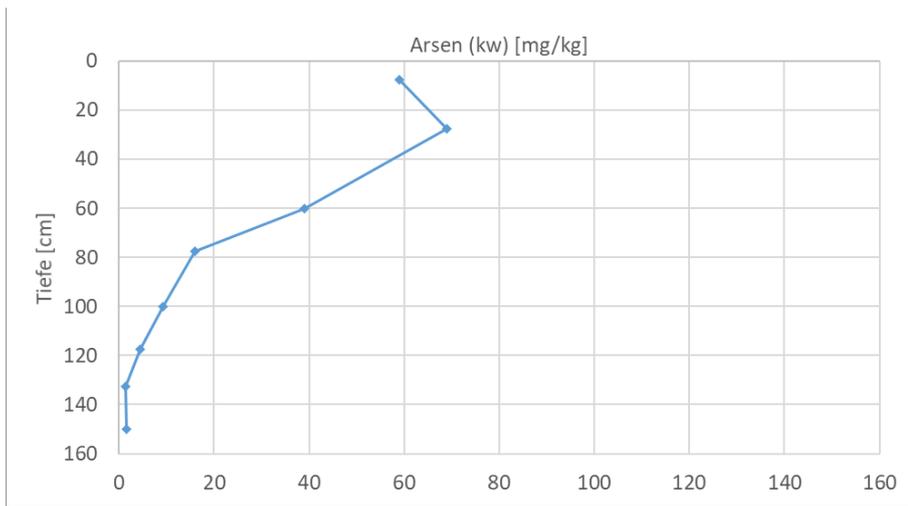
Grenze [cm]		Horizont	Farbe	Humusgehalt	Redoxmerkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungsdichte	Genese	Feinbodenart	Grobboden [Vol-%]		We eff [dm]
0	15	aAh	10YR4/2	h3	-	feu1	pol-sub	Ld2	gemischt, auenabgelagert	Tu4	Reinkies	5	mittel (3 bis < 7)
15	35	aSw-rAp	10YR4/3;10YR4/6	h2	ed,fl,g2,f3,	feu1	pol-sub	Ld2	gemischt, auenabgelagert	Tu4	Reinkies	5	
35	85	aSwd-Go	7.5YR5/8;5YR5/8; 10 YR7/1	h0	e,fl,+,dif,g4,f8	feu2	pol	Ld3	auenabgelagert	Tu3	-	-	
85	125	aSd-Gr	2.5Y7/1	h0	r,dif,g4,f9	feu4	koh	Ld4	auenabgelagert	Tu2	-	-	
125	200	aGr	kein Erkenntnisstand	h0	r,dif,g4,f9	feu6	koh	Ld2	auenabgelagert	mSgs	Reinkies	1	

A 1.4.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_3_2019							
Tiefe	cm	0-15	20-35	50-70	70-85	90-110	110-125	125-140	140-160
Hauptbodenart		Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Sand	Sand
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	95	95	100	100	100	100	99	99
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	5	5	0	0	0	0	1	1
C _{org}	%	3,79	1,43	0,57	0,59	0,75	0,76	0,21	0,15
CaCO ₃	%								
N _{gesamt}	%	0,38	0,14	0,08	0,09	0,07	0,05	0,02	0,02
pH-Wert	-	5,5	6	5,8	5,2	5,4	5,8	5,8	6
Arsen (Königswasser)	mg/kg	59	69	39	16	9,3	4,4	1,3	1,5
Arsen (mobil)	µg/kg	< 25	< 25						
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	1,1	0,86	0,12	0,1	0,19	0,46	< 0,10	< 0,10
Cadmium (mobil)	µg/kg	37	15						

Bezeichnung	Einheit	PS_3_2019							
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	12	14	10	7,2	6,3	5,3	< 2	< 2
Cobalt (mobil)	µg/kg	< 15	< 15						
Chrom (Königswasser)	mg/kg	54	40	57	61	57	45	4	7,2
Chrom (mobil)	µg/kg	< 25	< 25						
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	21	16	13	15	28	13	< 2	< 2
Kupfer (mobil)	µg/kg	< 25	< 25						
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	0,14	0,12	0,07	0,064	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Mangan (mobil)	µg/kg	18.000	8.600						
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	0,78	0,75	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Molybdän (mobil)	µg/kg	< 15	< 15						
Nickel (Königswasser)	mg/kg	24	25	26	24	23	21	2,7	4,5
Nickel (mobil)	µg/kg	100	46						
Blei (Königswasser)	mg/kg	73	65	31	30	29	22	3,3	3,2
Blei (mobil)	µg/kg	< 15	< 15						
Antimon (Königswasser)	mg/kg	1,5	1,4	1,1	1	1,2	1	< 1	< 1
Antimon (mobil)	µg/kg	< 25	< 25						
Selen (Königswasser)	mg/kg	0,52	0,51	0,56	0,61	0,51	0,39	< 0,10	< 0,10
Thallium (Königswasser)	mg/kg	11	10						
Thallium (mobil)	µg/kg	5,9	6	11	11	11	7,3	< 1	< 1
Uran (Königswasser)	mg/kg	< 25	< 25						
Uran (mobil)	µg/kg	160	140	100	89	79	62	8,1	8,8
Zink (Königswasser)	mg/kg	690	< 100						
Zink (mobil)	µg/kg	3,79	1,43	0,57	0,59	0,75	0,76	0,21	0,15

A 1.4.3 Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:



A 1.5 Bodenprofil PS_4_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	337143
Hochwert (UTM)	5699112
Bodentyp	stark vergleyte Vega
Substrat	Schluff
Nutzung	Grünland
Bewuchs	Gras
Datum	11.07.2019
Vernässungsgrad	sehr schwach vernässt
mittlerer Grundwasserstand	Grundwasserstand nicht erreicht
Bemerkungen	Beprobung erfolgt, L 2 AI - 85 oder L I a1 -85, g4AB



A 1.5.1 Profilbeschreibung PS_4_2019:

Grenze [cm]		Horizont	Farbe	Humusgehalt	Redoxmerkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungsdichte	Genese	Feinbodenart	Grobboden [Vol-%]	We eff [dm]
0	15	aAh	10YR4/2;10YR5/2	h3	-	feu1	kru-sub	Ld2	auenabgelagert	Uls	-	-
15	25	aM	10YR4/2;10YR5/2	h3	-	feu1	kru-sub	Ld2	auenabgelagert	Uls	-	-
25	70	aM	10YR4/1;10YR5/1; 10YR8/2	h4	-	feu2	kru-sub	Ld2	auenabgelagert	Us	-	-
70	105	aM	10YR4/1;10YR5/1; 10YR6/1	h2	-	feu3	shi	Ld2	auenabgelagert	Uls	-	-
105	152	aM	7.5YR4/6;7.5YR5/4	h1	-	feu3	koh	Ld2	auenabgelagert	Ut3	-	-
152	165	aGo-aM	7.5YR5/4;7.5YR5/6; 10YR5/6	h1	e,fl,g2,f3,	feu3	koh	Ld2	auenabgelagert	Su2	-	-
165	250	aM-Go	7.5YR7/2;7.5YR5/6; 7.5YR5/8	h1	e,fl,+,dif,g4,f8,- es,fl,+,dif,g4,f8,	feu4	shi	Ld2	auenabgelagert	Ut3	-	-
250	280	Go	7.5YR7/1;7.5YR6/4	h0	e,dif,g4,f8	feu4	koh	Ld2	auenabgelagert	mS	-	-
280	300	Gor	2.5Y7/1;7.5YR5/8	h0	r,dif,g3,f8,- e,fl,g2,f4	feu5	koh	Ld2	auenabgelagert	Sl2	-	-

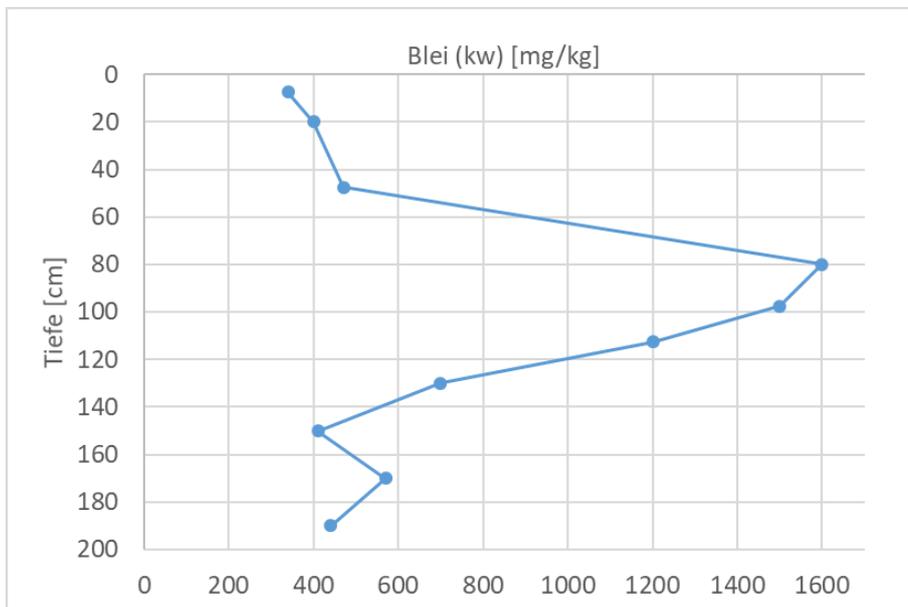
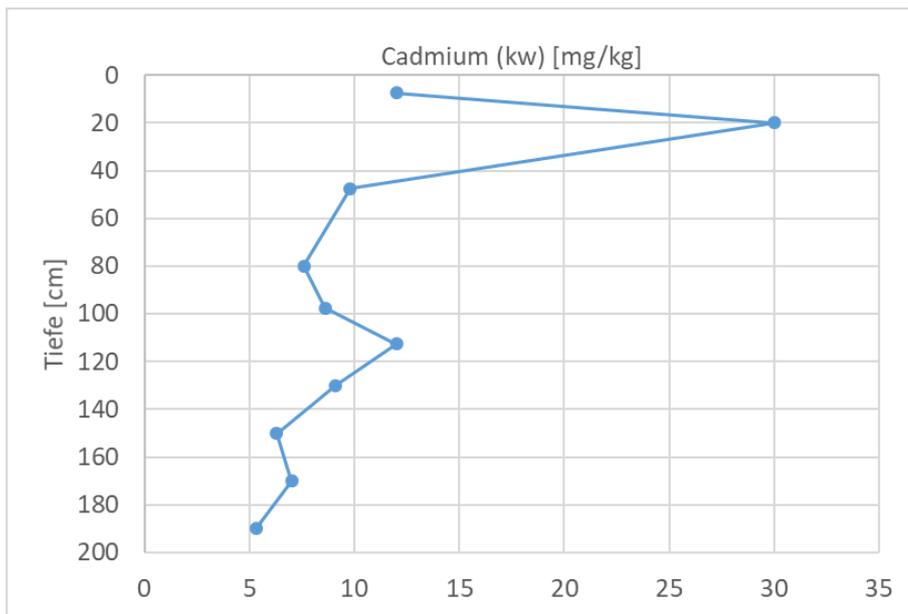
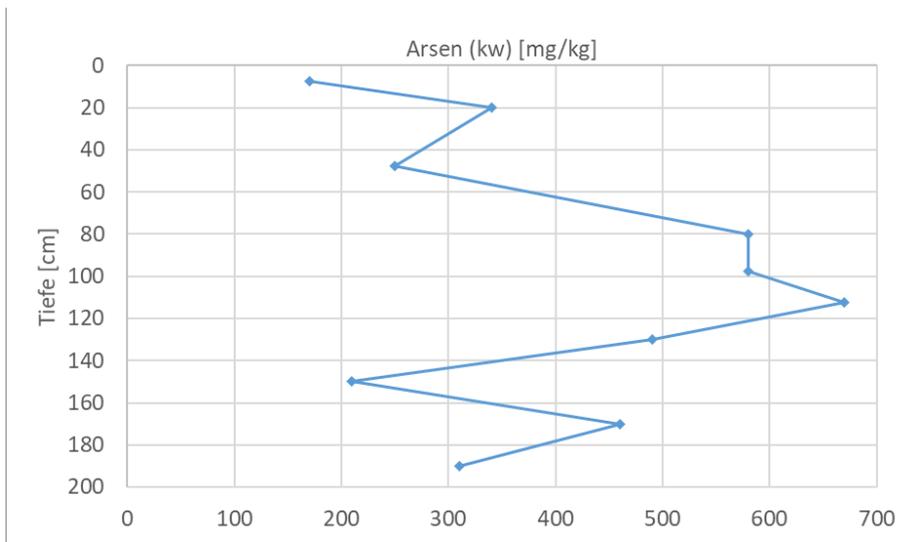
sehr tief
(12 bis < 20)

A 1.5.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_4_2019										
		0-15	15-25	40-70	70-90	90-105	105-120	120-140	152-160	165-180	180-200	
Tiefe	cm											
Hauptbodenart		Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Sand	Schluff	Schluff
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C _{org}	%	4,92	6,23	4,52	2,69	2,45	1,47	1,04	0,67	0,82	0,76	
CaCO ₃	%											
N _{gesamt}	%	0,45	0,36	0,26	0,17	0,13	0,12	0,11	0,06	0,07	0,06	
pH-Wert	-	5,1	5,7	6	5,6	5,5	5,4	5,3	5,2	5,2	5,2	
Arsen (Königswasser)	mg/kg	170	340	250	580	580	670	490	210	460	310	

Bezeichnung	Einheit	PS_4_2019									
Arsen (mobil)	µg/kg	59	92								
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	12	30	9,8	7,6	8,6	12	9,1	6,3	7	5,3
Cadmium (mobil)	µg/kg	1300	1400								
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	18	23	23	20	56	29	23	17	25	19
Cobalt (mobil)	µg/kg	100	21								
Chrom (Königswasser)	mg/kg	66	100	100	120	110	46	37	27	32	30
Chrom (mobil)	µg/kg	< 25	< 25								
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	120	240	300	240	160	130	110	59	94	69
Kupfer (mobil)	µg/kg	< 25	64								
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	0,53	1	1,2	1,4	1,3	2,9	2,7	0,71	2,7	1,3
Mangan (mobil)	µg/kg	29.000	4.400								
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	1,9	3	1,8	2,6	2,1	2,4	1,8	1,1	1,5	1,2
Molybdän (mobil)	µg/kg	< 15	< 15								
Nickel (Königswasser)	mg/kg	51	84	57	36	34	42	35	25	34	31
Nickel (mobil)	µg/kg	1900	1400								
Blei (Königswasser)	mg/kg	340	400	470	1.600	1.500	1.200	700	410	570	440
Blei (mobil)	µg/kg	330	98								
Antimon (Königswasser)	mg/kg	7,4	11	15	17	12	18	15	5,9	13	8,3
Antimon (mobil)	µg/kg	< 25	31								
Selen (Königswasser)	mg/kg	< 2	2,9	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,66	1,3	0,75	0,8	0,88	0,86	0,68	0,61	0,59	0,53
Thallium (mobil)	µg/kg	43	140								
Uran (Königswasser)	mg/kg	8,2	6,3	2,9	2	1	< 1	< 1	< 1	1	
Uran (mobil)	µg/kg	< 25	< 25								
Zink (Königswasser)	mg/kg	360	280	190	100	53	43	36	34	30	
Zink (mobil)	µg/kg	6.400	820								

A 1.5.3 Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:



A 1.6 Bodenprofil PS_5_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	337741
Hochwert (UTM)	5698206
Bodentyp	Normvega
Substrat	Schluff über Skelettsand
Nutzung	Weide
Bewuchs	Gras
Datum	17.09.2019
Vernässungsgrad	nicht vernässt
mittlerer Grundwasserstand	Grundwasserstand nicht erreicht
Bemerkungen	sL/S 3 Al; tiefer Graben/Bohrung nicht möglich, sandiger Kies rutscht zusammen



A 1.6.1 Profilbeschreibung PS_5_2019:

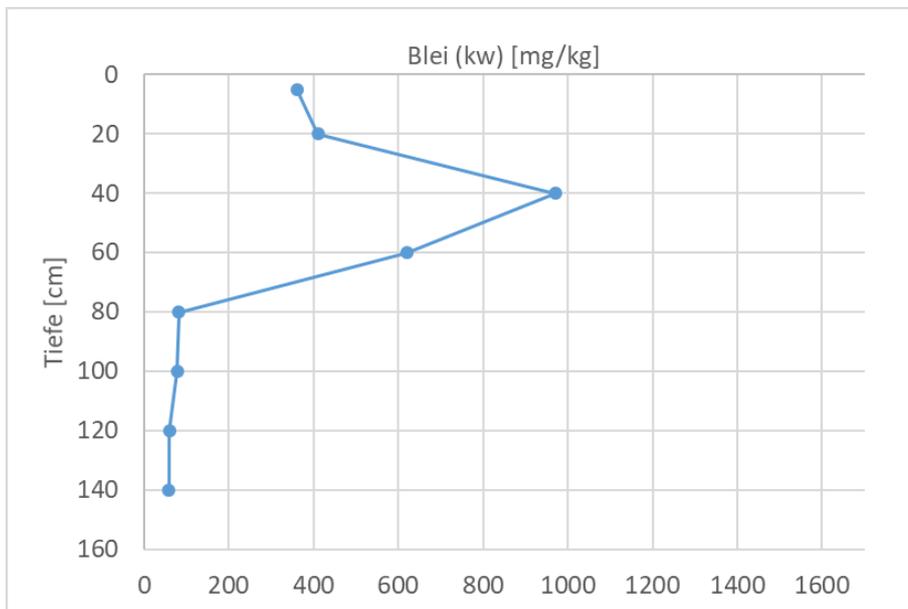
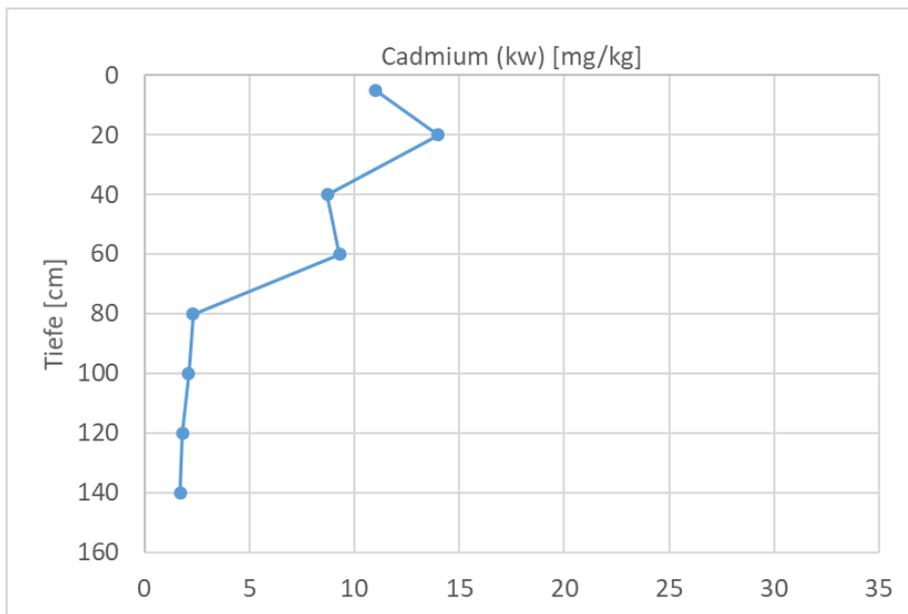
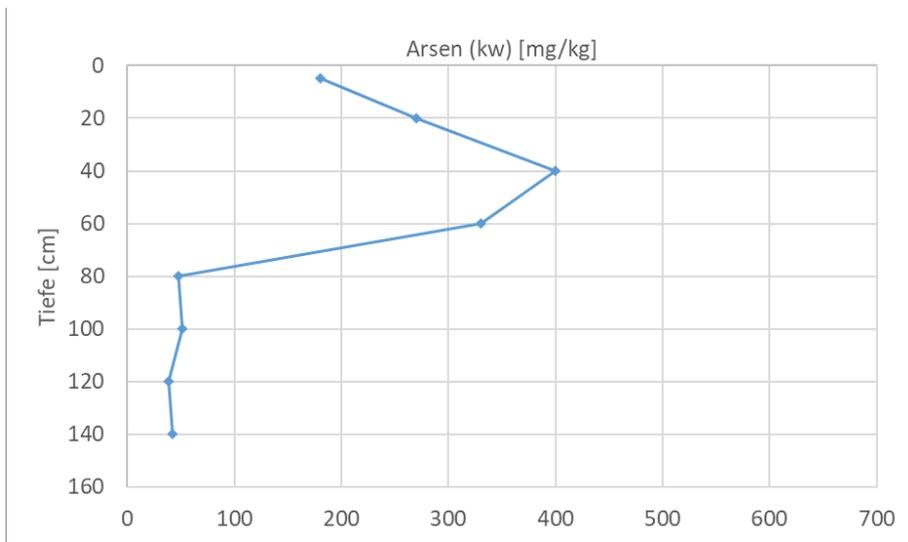
Grenze [cm]		Horizont	Farbe	Humusgehalt	Redoxmerkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungsdichte	Genese	Feinbodenart	Grobboden [Vol-%]		We eff [dm]
0	10	aAh	10YR4/2; 10YR4/3	h3	0	feu2	kein Erkenntnisstand	Ld2	auenabgelagert	Ut3	-	-	tief (7 bis < 12)
10	50	aM	10YR4/2; 10YR5/3; 10YR7/2	h2	0	feu1	kein Erkenntnisstand	Ld2	auenabgelagert	Ut3	-	-	
50	72	aM	10YR5/4; 10YR6/3; 10YR7/3	h2	0	feu1	kein Erkenntnisstand	Ld2	auenabgelagert	Us	Reinkies	1	
72	150	ailCv	10YR6/2	h0	0	feu2	kein Erkenntnisstand	Ld2	auenabgelagert	gS	Reinkies	70	

A 1.6.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_5_2019							
Tiefe	cm	0-10	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150
Hauptbodenart		Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Sand	Sand	Sand	Sand
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	100	100	100	99	30	30	30	30
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	0	0	0	1	70	70	70	70
C _{org}	%	5,14	4,84	3,32	1,08	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
CaCO ₃	%								
N _{gesamt}	%	0,41	0,3	0,21	0,08	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH-Wert	-	5,4	5,8	6,3	5,9	5,8	5,7	5,8	5,9
Arsen (Königswasser)	mg/kg	180	270	400	330	48	51	39	42
Arsen (mobil)	µg/kg	43	37						
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	11	14	8,7	9,3	2,3	2,1	1,8	1,7
Cadmium (mobil)	µg/kg	750	560						

Bezeichnung	Einheit	PS_5_2019							
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	19	25	30	20	6,1	6	5,3	5,8
Cobalt (mobil)	µg/kg	32	< 15						
Chrom (Königswasser)	mg/kg	80	93	160	32	10	9,3	7,2	9
Chrom (mobil)	µg/kg	< 25	< 25						
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	150	250	300	91	15	14	16	15
Kupfer (mobil)	µg/kg	< 25	130						
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	0,72	1,1	1,6	2	0,27	0,17	0,09	0,066
Mangan (mobil)	µg/kg	7700	2700						
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	2,2	2,5	2,4	1,3	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Molybdän (mobil)	µg/kg	< 15	< 15						
Nickel (Königswasser)	mg/kg	49	63	46	30	9,9	9,4	8,2	9,3
Nickel (mobil)	µg/kg	750	520						
Blei (Königswasser)	mg/kg	360	410	970	620	82	78	59	58
Blei (mobil)	µg/kg	260	110						
Antimon (Königswasser)	mg/kg	8,5	13	16	10	1,3	1,4	< 1	< 1
Antimon (mobil)	µg/kg	< 25	27						
Selen (Königswasser)	mg/kg	< 2	2,8	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,85	0,98	0,9	0,77	0,33	0,34	0,29	0,29
Thallium (mobil)	µg/kg	53	76						
Uran (Königswasser)	mg/kg	23	29	8,4	3,9	2,1	2	1,8	2,1
Uran (mobil)	µg/kg	< 25	< 25						
Zink (Königswasser)	mg/kg	630	920	680	730	140	130	110	110
Zink (mobil)	µg/kg	20.000	13.000						

A 1.6.3 Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:



A 1.7 Bodenprofil PS_6_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	337680
Hochwert (UTM)	5698829
Bodentyp	reliktische, schwach vergleyte Normvega
Substrat	Schluff über Lehmsand
Nutzung	Forst
Bewuchs	KL; GB; VZ
Datum	18.09.2019
Vernässungsgrad	nicht vernässt
mittlerer Grundwasserstand	Grundwasserstand nicht erreicht
Bemerkungen	kein rAp, trotz Ackerschätzung; Kiefern 40-50 Jahre



A 1.7.1 Profilbeschreibung PS_6_2019:

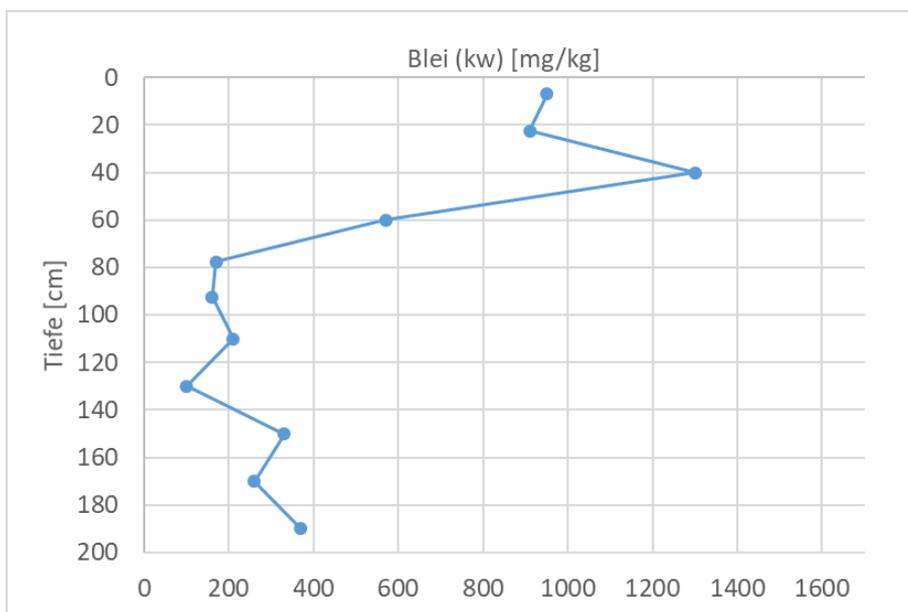
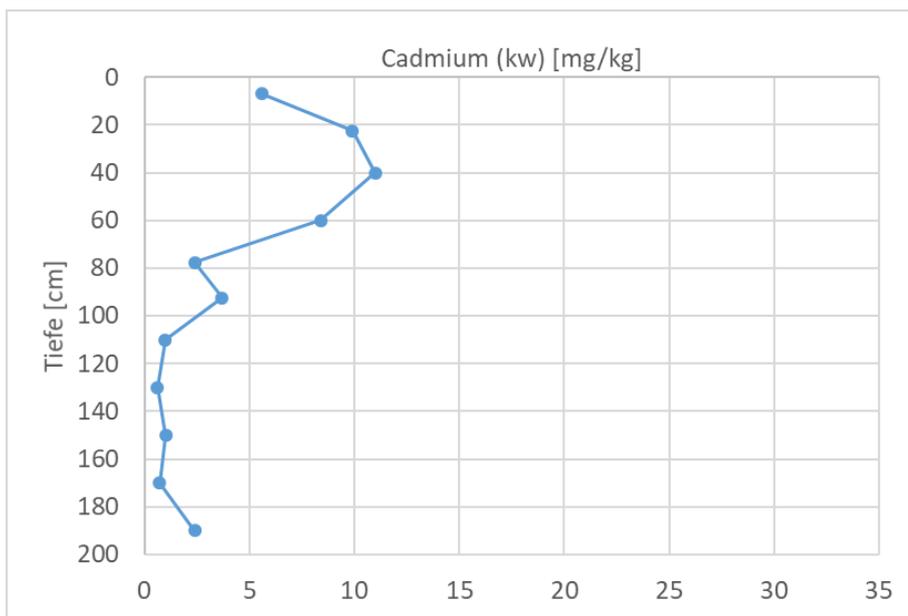
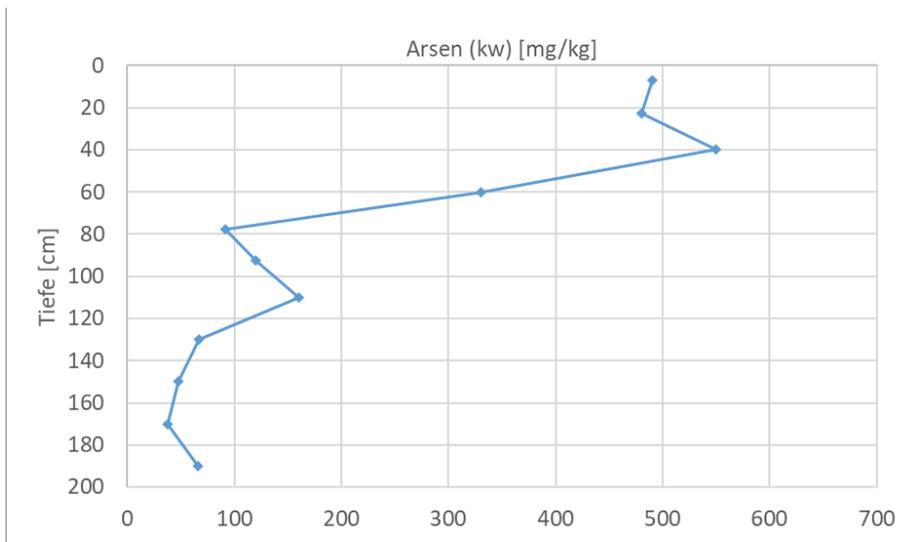
Grenze [cm]		Horizont	Farbe	Humusgehalt	Redoxmerkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungsdichte	Genese	Feinbodenart	Grobboden [Vol-%]		We eff [dm]
0	4	L	kein Erkenntnisstand	h7	0	kein Erkenntnisstand	kru-sub	kein Erkenntnisstand	organogen, auenabgelagert	ein Erkenntnisstand	-	-	tief (7 bis < 12)
0	4	Ah+Oh	kein Erkenntnisstand	h7	0	feu1	kru-sub	kein Erkenntnisstand	organogen, auenabgelagert	Ut3	-	-	
0	14	aAh	10YR4/2; 10YR5/3	h3	0	feu2	kru-sub	Ld1	auenabgelagert	Ut3	-	-	
14	50	aM	10YR4/2; 10YR5/4; 10YR5/6	h2	0	feu3	shi	Ld2	auenabgelagert	Ut3	-	-	
50	85	aM	10YR6/2; 10YR7/2; 10YR5/3	h1	0	feu3	koh	Ld2	auenabgelagert	Uls	-	-	
85	100	raGo-M	7.5YR7/2; 7.5YR7/1; 7.5YR6/8	h1	0	feu3	koh	Ld2	auenabgelagert	Slu	-	-	
100	140	aM-rGo	7.5YR7/2; 7.5YR6/2; 7.5YR5/8	h1	0	feu4	shi	Ld2	auenabgelagert	Slu	-	-	
140	220	aM-rGrGo	7.5YR7/2; 7.5YR8/1; 7.5YR6/8	h1	0	feu4	koh	Ld2	auenabgelagert	Su4	-	-	

A 1.7.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_6_2019											
		0-14	15-30	30-50	50-70	70-85	85-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200	
Tiefe	cm												
Hauptbodenart		Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C _{org}	%	3,5	1,73	2,46	0,77	0,2	0,27	0,24	0,12	0,94	0,71	1,82	
CaCO ₃	%												
N _{gesamt}	%	0,25	0,12	0,16	0,05	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,04	0,1	
pH-Wert	-	4,2	4,7	4,7	5	5,1	5,1	5	5,1	4,9	5,1	5,3	
Arsen (Königswasser)	mg/kg	490	480	550	330	92	120	160	67	48	38	66	
Arsen (mobil)	µg/kg												
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	5,6	9,9	11	8,4	2,4	3,7	0,99	0,61	1	0,71	2,4	
Cadmium (mobil)	µg/kg												
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	23	28	33	22	8,7	13	9,5	4,6	5,2	4,1	7,4	
Cobalt (mobil)	µg/kg												
Chrom (Königswasser)	mg/kg	63	49	80	37	15	14	18	9,4	24	19	28	
Chrom (mobil)	µg/kg												
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	150	140	190	97	35	37	44	20	59	48	66	
Kupfer (mobil)	µg/kg												
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	1,8	2	1,9	0,99	0,21	0,11	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Mangan (mobil)	µg/kg												
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	2,4	2,1	2,6	1,4	0,54	0,6	0,6	< 0,50	0,57	0,5	0,73	
Molybdän (mobil)	µg/kg												
Nickel (Königswasser)	mg/kg	39	43	46	39	16	21	15	8,6	19	15	27	

Bezeichnung	Einheit	PS_6_2019											
Nickel (mobil)	µg/kg												
Blei (Königswasser)	mg/kg	950	910	1300	570	170	160	210	100	330	260	370	
Blei (mobil)	µg/kg												
Antimon (Königswasser)	mg/kg	15	13	15	12	2,8	3,5	4,7	1,6	5,5	4,4	5,5	
Antimon (mobil)	µg/kg												
Selen (Königswasser)	mg/kg	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,91	0,79	0,85	0,75	0,35	0,31	0,41	0,23	0,54	0,45	0,65	
Thallium (mobil)	µg/kg												
Uran (Königswasser)	mg/kg	5,7	5	5,2	4,2	1,9	2	2,3	1,6	3,1	2,8	3,9	
Uran (mobil)	µg/kg												
Zink (Königswasser)	mg/kg	620	790	870	660	230	300	220	110	230	170	270	
Zink (mobil)	µg/kg												

A 1.7.3 Tiefenprofile der Arsen-, Cadmium- und Blei-Gehalte:



A 1.8 Bodenprofil PS_7_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	334089
Hochwert (UTM)	5713801
Bodentyp	stark vergleyte Acker-Normvega
Substrat	Skelett führender Sand
Nutzung	Ackerland allg.
Bewuchs	Getreide allg.
Datum	06.11.2019
Vernässungsgrad	sehr schwach vernässt
mittlerer Grundwasserstand	Grundwasserstand nicht erreicht
Bemerkungen	-



A 1.8.1 Profilbeschreibung PS_7_2019:

Grenze [cm]		Hori-zont	Farbe	Humus-gehalt	Redox-merkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungs-dichte	Genese	Fein-boden art	Grob-boden [Vol-%]	We eff [dm]
0	26	Ap	7.5YR4/3	h2	0	feu3	bro, gre4, h	Ld2	auenab-gelagert	Sl2	Reinkies	3
26	39	fM+a Ap	7.5YR5/3; 7.5YR5/4	h1	0	feu3	bro, gre5, g	Ld2	auenab-gelagert	Su2	Reinkies	3
39	49	aM	7.5YR5/4; 7.5YR5/6	h1	0	feu3	sub, gre3, g	Ld2	auenab-gelagert	Su2	Reinkies	3
49	76	ailCv	10YR6/1	h0	0	feu2	shi	Ld2	fluviatil	gS	Reinkies	20
76	104	ailCv	10YR7/1	h0	0	kein Erkenntnisstand	0	kein Erkenntnisstand	fluviatil	gS	Reinkies	15
104	114	ailCv	10YR4/6	h0	0	feu2	shi	Ld2	fluviatil	mSfs	Reinkies	1
114	122	ailCv	2.5Y6/1	h0	0	feu1	ein	Ld2	fluviatil	gS	Reinkies	70
122	160	ailCv	10YR7/1; 10YR6/1	h0	0	feu1	shi	Ld2	fluviatil	mSgs	Reinkies	10
160	185	Go-ailCv	10YR7/3	h0	eo,fl,g1,f3	kein Erkenntnisstand	shi	Ld2	fluviatil	mSgs	Reinkies	15
185	200	aGo	7.5YR6/6; 7.5YR5/6	h0	eo,fl,g2,f5	kein Erkenntnisstand	shi	Ld2	fluviatil	mSfs	Reinkies	10

A 1.8.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_7_2019	
Tiefe	cm	5-20	30-35
Hauptbodenart		Sand	Sand
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	97	97
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	3	3
Corg	%	0,94	0,64
CaCO3	%		
N _{gesamt}	%	0,07	0,04

Bezeichnung	Einheit	PS_7_2019	
pH-Wert	-	6,5	6,5
Arsen (Königswasser)	mg/kg	36	38
Arsen (mobil)	µg/kg	26	<25
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	0,78	0,79
Cadmium (mobil)	µg/kg	13	10
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	6,7	7,5
Cobalt (mobil)	µg/kg	< 15	< 15
Chrom (Königswasser)	mg/kg	19	20
Chrom (mobil)	µg/kg	< 25	< 25
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	22	20
Kupfer (mobil)	µg/kg	110	67
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	< 0,05	0,14
Mangan (mobil)	µg/kg	800	570
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	< 0,50	< 0,50
Molybdän (mobil)	µg/kg	< 15	< 15
Nickel (Königswasser)	mg/kg	14	14
Nickel (mobil)	µg/kg	18	16
Blei (Königswasser)	mg/kg	62	60
Blei (mobil)	µg/kg	< 15	< 15
Antimon (Königswasser)	mg/kg	1,5	1,4
Antimon (mobil)	µg/kg	< 25	< 25
Selen (Königswasser)	mg/kg	< 2	< 2
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,25	0,26
Thallium (mobil)	µg/kg	3,3	3,9
Uran (Königswasser)	mg/kg	3,1	3,9
Uran (mobil)	µg/kg	< 25	< 25
Zink (Königswasser)	mg/kg	120	120
Zink (mobil)	µg/kg	< 100	110

A 1.9 Bodenprofil PS_8_2019

Sachverhalt	Angabe
Rechtswert (UTM)	322621
Hochwert (UTM)	5719606
Bodentyp	Acker-Gley-Pseudogley-Vega
Substrat	Schluff über tiefen Ton über tiefem Lehm
Nutzung	Ackerland allg.
Bewuchs	Getreide allg.
Datum	08.11.2019
Vernässungsgrad	schwach vernässt
mittlerer Grundwasserstand	Grundwasserstand nicht erreicht
Bemerkungen	-



A 1.9.1 Profilbeschreibung PS_8_2019:

Grenze [cm]		Horizont	Farbe	Humusgehalt	Redoxmerkmale	Feuchte	Gefüge	Lagerungsdichte	Genese	Feinbodenart	Grobboden [Vol-%]		We eff [dm]
0	28	aAp	7.5YR4/3	h2	0	feu3	bro,	Ld2	auenabgelagert	Sl2	-	-	sehr tief (12 bis < 20)
28	35	raAp	7.5YR5/3; 7.5YR5/4	h2	es,fl, g2,f2	feu2	pla	Ld2	auenabgelagert	Su2	-	-	
35	75	aSw-M	7.5YR5/4; 7.5YR5/6	h1	ed,dif,+,fl, g2,f4,+	feu2	sub	Ld2	auenabgelagert	Su2	-	-	
75	95	aM-Go-Sd	10YR6/1	h1	r,dif,g3,f6,-ed,fl, g4,f6,-es,fl, g4,f6	feu2	pol	Ld2	auenabgelagert	gS	-	-	
95	120	aM-Go	10YR7/1	h1	e,fl,g4,f7	feu2	sub	kein Erkenntnisstand	auenabgelagert	gS	-	-	
120	160	aM-Go	10YR4/6	h1	e,fl, g4,f8	feu3	sub	Ld2	auenabgelagert	mSfs	-	-	
160	180	aM-Go	2.5Y6/1	h1	es,dif, g2,f5	feu3	shi	Ld2	auenabgelagert	gS	-	-	
180	220	aGo	10YR7/1; 10YR6/1	h0	es,dif,+,fl, g2,f5,+	feu3	ein	Ld2	auenabgelagert	mSgs	-	-	

A 1.9.2 Analytik:

Bezeichnung	Einheit	PS_8_2019
Tiefe	cm	5-20
Hauptbodenart		Schluff
Feinbodenanteil (<= 2 mm)	%	100
Grobbodenanteil (> 2 mm)	%	0
Corg	%	2,03
CaCO3	%	
N _{gesamt}	%	0,18

Bezeichnung	Einheit	PS_8_2019
pH-Wert	-	5,8
Arsen (Königswasser)	mg/kg	130
Arsen (mobil)	µg/kg	< 25
Cadmium (Königswasser)	mg/kg	1,8
Cadmium (mobil)	µg/kg	57
Cobalt (Königswasser)	mg/kg	14
Cobalt (mobil)	µg/kg	< 15
Chrom (Königswasser)	mg/kg	44
Chrom (mobil)	µg/kg	< 25
Kupfer (Königswasser)	mg/kg	49
Kupfer (mobil)	µg/kg	91
Quecksilber (Königswasser)	mg/kg	0,15
Mangan (mobil)	µg/kg	7.800
Molybdän (Königswasser)	mg/kg	1
Molybdän (mobil)	µg/kg	< 15
Nickel (Königswasser)	mg/kg	30
Nickel (mobil)	µg/kg	90
Blei (Königswasser)	mg/kg	250
Blei (mobil)	µg/kg	65
Antimon (Königswasser)	mg/kg	3,3
Antimon (mobil)	µg/kg	< 25
Selen (Königswasser)	mg/kg	< 2
Thallium (Königswasser)	mg/kg	0,62
Thallium (mobil)	µg/kg	5,1
Uran (Königswasser)	mg/kg	4,3
Uran (mobil)	µg/kg	< 25
Zink (Königswasser)	mg/kg	300
Zink (mobil)	µg/kg	1.100

A 2 Klassifizierungs-Schemata für Stoffgehalte im Untersuchungsgebiet

Tabelle 2.1: Klassifizierung nach statistischen Kenngrößen

	Arsen [mg/kg]	Cadmium [mg/kg]	Blei [mg/kg]
≤ P25	≤ 53	≤ 1,1	≤ 99
≤ P50	> 53-94	> 1,1-1,8	> 99-180
≤ P75	> 94-150	> 1,8-4,9	> 180-330
> P75	> 150-690	> 4,9-37,0	> 330-1.400

Tabelle 2.2: Klassifizierung der Arsengehalte (mg/kg) nach statistischen Kenngrößen und Referenzwerten

dunkelgrün	≤ Z0 Lehm/Schluff	≤ 15
hellgrün	≤ MW Grünland	> 15-50
gelb	≤ P50	> 50-100
orange	≤ PW Acker	> 100-200
rot	≤ P95	> 200-300
violett	> P 95	≥ 300

Tabelle 2.3: Klassifizierung der Cadmiumgehalte (mg/kg) nach statistischen Kenngrößen und Referenzwerten

dunkelgrün	≤ Vorsorgewert/Z0, EW 1 Lebensmittel	≤ 1
gelb	≤ EW 2 Lebensmittel, EW 2 Futtermittel	> 1-2
orange	≤ P75	> 2-5
rosa	≤ EW3 Futtermittel	> 5-7
rot	≤ MW Grünland	> 7-20
violett	> MW Grünland	≥ 20

Tabelle 2.4: Klassifizierung der Bleigehalte (mg/kg) nach statistischen Kenngrößen und Referenzwerten

dunkelgrün	≤ Vorsorgewert/Z0	≤ 70
hellgrün	≤ P25	> 70-100
gelb	≤ P50	> 100-180
orange	≤ EW Lebensmittel	> 180-250
rosa	≤ P95	> 250-600
rot	≤ MW Grünland	> 600-1.200
violett	> MW Grünland	≥ 1.200

MW = Maßnahmenwert, PW = Prüfwert, EW = Empfehlungswert

A 3 Bewertung der Einflussfaktoren

Legende:

geeignet	optional geeignet	ungeeignet	nicht geprüft
----------	-------------------	------------	---------------

Einflussfaktor	Untersuchungsgebiet	Testgebiet Nord	Testgebiet Mitte	Testgebiet Süd
Altarmbereich	aggregiert	v. a. für Cd (nicht aggregiert)	erklärt As, Pb, Cd im Süd-Teil (nicht aggregiert)	überlagert Höhe ü. Fluss
Bodenschätzung: Bodenart, abschlämmbare Teilchen (Ton, Feinschluff und 50 % Mittelschluff), Kulturart (Nutzung), Entstehung (Ausgangssubstrat Ackerböden), Boden- und Zustandsstufe	geringer Stichprobenumfang und ungünstige Klassenverteilung	geringer Stichprobenumfang und ungünstige Klassenverteilung		
Anzahl Dämme/Lage in der Aue Cd*1 (nach BEAK 2018, überarbeitet)	aggregiert, teilw. Überlagerung von Nutzung (kein Damm ≈ Grünland)	v. a. für Cd	v. a. für Cd. erklärt As, Pb im Nord-Teil des Testgebietes (aggregiert), überlagert Auenbereich	geringe Unterschiede
Auenbereich (Fluss, rezente Aue, Altaue)	teilw. Überlagerung mit Nutzung (rezente Aue ≈ Grünland)	für Cd. für As und Pb bedingt	geringer Unterschied zw. Rezenter Aue und Altaue bei Pb und As	N<10 in Altaue
Auentyp (Koenzen, AZB BfN)	keine Unterschiede As, Pb, Cd (nur zwei Klassen)	keine Unterschiede As, Pb, Cd, da jeweils nur eine Klasse		
Bodenartenklasse (BK50)	keine Unterschiede As, Pb, Cd			
Einzugsgebiete DLM1000 (BfN)	aggregiert	keine Unterschiede As, Pb, Cd	keine Unterschiede As, Pb, Cd	keine Unterschiede As, Pb, Cd, da nur eine Klasse
Flussabschnitte	für Gliederung des Gesamtgebietes im Flussverlauf	nur zwei Klassen	nur eine Klasse	
Höhe über dem Fluss	überlagert Auen- und Altarmbereich	keine Unterschiede As, Pb, Cd	keine Unterschiede As, Pb, Cd	aggregiert
HQ25/50 Gefahr/Intensität*2	ungünstige Flächenausprägung (Raster, Kleinstflächen), überlagert Höhe ü. Fluss und Altarmbereiche,			

Einflussfaktor	Untersuchungsgebiet	Testgebiet Nord	Testgebiet Mitte	Testgebiet Süd
HQ500	ungünstige Flächenausprägung (Raster, Kleinstflächen), überlagert Altarmbereich (Altaue $\approx \geq 2$ m) und Höhe ü. Fluss			
Messwerte C _{org} -Gehalte *4	deutlicher Zusammenhang mit Cd			
Messwerte pH-Wert *4	kein Zusammenhang erkennbar			
Messwerte Sandgehalt *4	kein Zusammenhang erkennbar			
Messwerte Tongehalt *4	kein Zusammenhang erkennbar			
Nutzung	teilw. Überlagerung von Auenbereich (Grünland \approx rezente Aue) und Anzahl Dämme (Grünland \approx kein Damm)	für As, Pb, Cd	v. a. für Cd; geringe Unterschiede zwischen Acker und Grünland für As und Pb bei starker Streuung	keine Differenzierung möglich, da nur Acker
Raumeinheiten UBA	<p>Die Bearbeitungskulisse ist im Flusslängsverlauf in 1 km-Segmente unterteilt. Die Raumeinheiten sind nach 5 Einzelfaktoren gegliedert:</p> <p>Lage in der Aue (Altaue/rezente Aue)</p> <p>Auentyp nach Koenzen (hier: Schotter, gefällereich, Grundgebirge, Flussaue, Winter-Hochwasser [CgrGGFWH] und Kies, gefällereich, Flach- und Hügelland, Flussaue, Winter-Hochwasser [KgrFHFH])</p> <p>Nutzung (zugeordnet zu 1km-Segmenten)</p> <p>Flussgebiet Hydrologischer Atlas Deutschland (hier: Mittlere Elbe)</p> <p>Fluss (hier: Mulde)</p> <p>Unterschiede As, Pb, Cd in den Raumeinheiten mit $n > 10$.</p> <p>Die zum Zweck einer bundesweiten Darstellung in kleinem Maßstab verwendeten Raumeinheitengrenzen sind für eine großmaßstäbige Raumeinheitenbildung an einem einzelnen Fluss nicht geeignet. Insbesondere die 1 km-Segmente bilden lokale Sedimentationsbedingungen nicht ab. Die Einzelfaktoren „Lage in der Aue“ und „Auentyp nach Koenzen“ wurden einzeln geprüft (siehe „Auenbereich“ und „Auentyp“).</p>			
Kombination von Altarm, Anzahl der Dämme und Flussabschnitte *3	Betrachtung mehrerer „Teilfaktoren“ für As, Pb, Cd			
Lage in der Aue Pb und Lage in der Aue As	keine maßgebliche Verbesserung gegenüber „Lage in der Aue Cd“			
Altlasten und Altablagerungen, Aufschüttungen und Abgrabungen	Punktdaten sind nicht geeignet für Raumeinheitenbildung			

*1 HRE BEAK 2018

*2 keine Unterschiede erkennbar

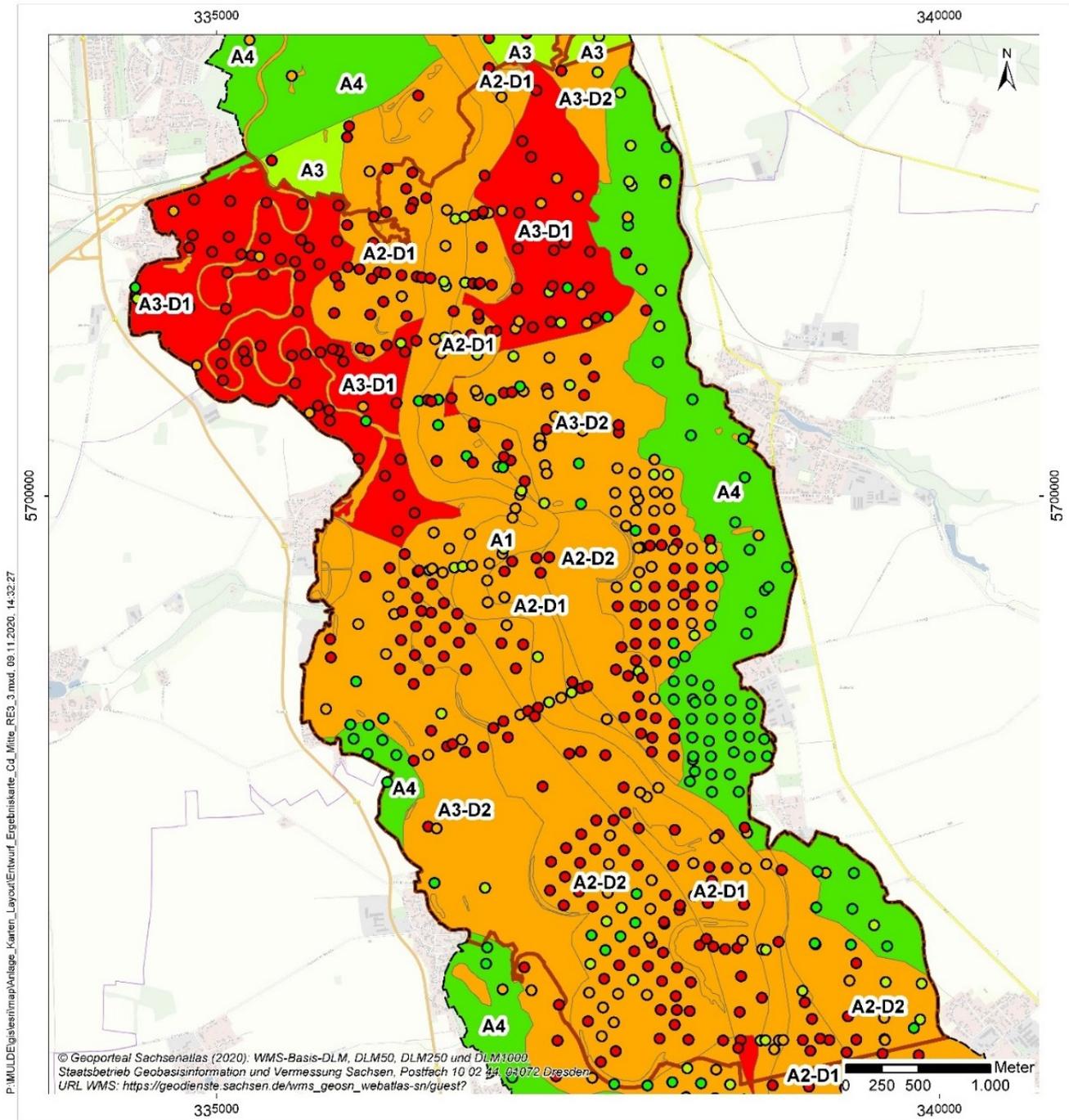
*3 Übernahme A1 „flussnah (Gewässerbereiche und ufernahe Aue)“ und „ältere Altarmbereiche“ (A4), Kombination (Union) von „jüngste Altarmbereiche“ (A2) mit Anzahl der Dämme (D1, D2) im Gesamtgebiet und Kombination (Union) von „am weitesten v. Fluss entf. Auenbereiche“ (A3) mit Anzahl der Dämme (D1, D2) im zweiten Flussabschnitt (Q2: Auentyp Kies/Flach- und Hügelland vor Mündung Lossa)

*4 Prüfung mittels Streudiagrammen und R^2 ; $n=151$; Analysenergebnisse

A 4 Ergebniskarten mit statistischen Kenngrößen für Testgebiet Mitte

Ergebniskarte der Raumeinheiten (RE3.3) in Testgebiet Mitte

Maßstab 1:40.000



gewichtete Mittelwerte im Oberboden, Quartile As Gehalt [mg/kg]

- 0,25 - 53,0
- >53,0 - 94,0
- >94,0 - 150,0
- >150,0 - 690,0

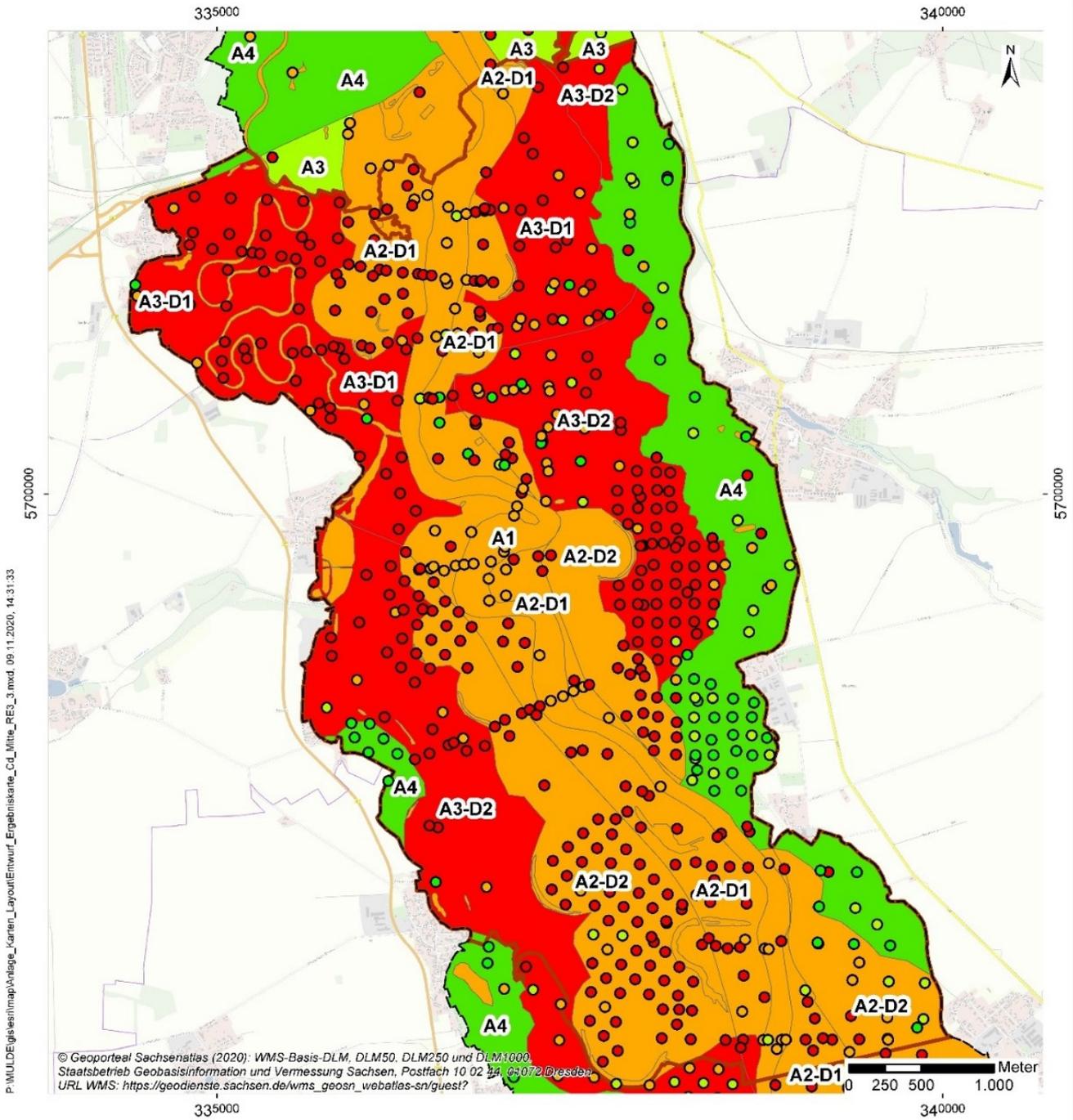
- ▭ Auenbereich der Vereinigten Mulde
- ▭ Testgebiet Mitte

Raumeinheiten 3.3, Median, IQA

A4	P50: 48	IQA: 40,5
A3	P50: 78	IQA: 59
A1	P50: 130	IQA: 77,5
A2-D2	P50: 130	IQA: 130,5
A3-D2	P50: 130	IQA: 118,5
A2-D1	P50: 150	IQA: 110
A3-D1	P50: 200	IQA: 117,5

Ergebniskarte der Raumeinheiten (RE3.3) in Testgebiet Mitte

Maßstab 1:40.000



gewichtete Mittelwerte im Oberboden, Quartile Pb Gehalt [mg/kg]

- 1,5 - 99,0
- >99,0 - 180,0
- >180,0 - 330,0
- >330,0 - 1400,0

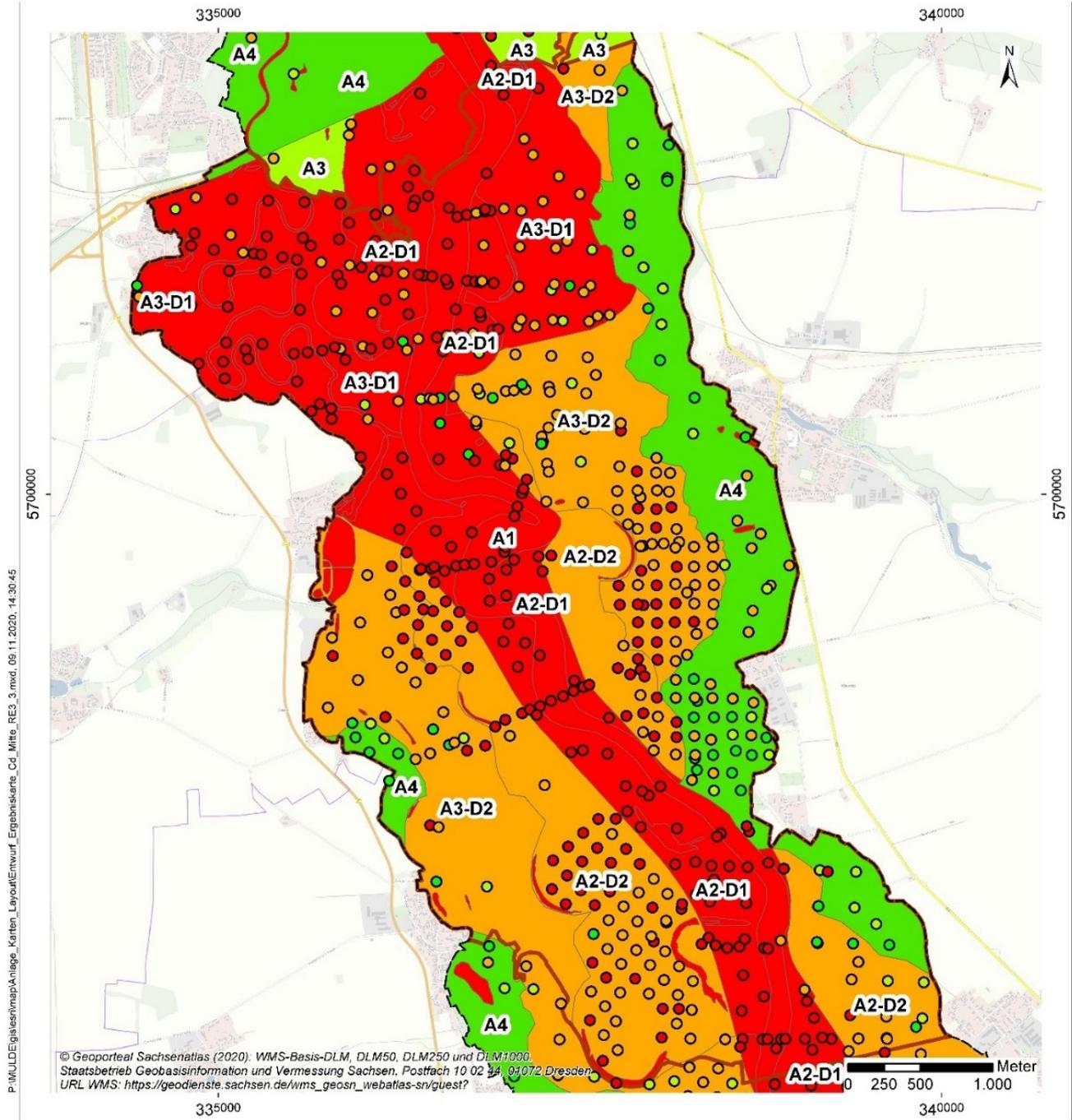
- ▭ Auenbereich der Vereinigten Mulde
- ▭ Testgebiet Mitte

Raumeinheiten 3.3, Median, IQA

A4	P50: 90, IQA: 56
A3	P50: 140, IQA: 98
A2-D2	P50: 270, IQA: 282
A1	P50: 300, IQA: 140
A2-D1	P50: 330, IQA: 210
A3-D2	P50: 368, IQA: 364
A3-D1	P50: 430, IQA: 237

Ergebniskarte der Raumeinheiten (RE3.3) in Testgebiet Mitte

Maßstab 1:40.000



gewichtete Mittelwerte im Oberboden, Quartile Cd Gehalt [mg/kg]

- 0,0 - 1,1
- >1,1 - 1,8
- >1,8 - 4,9
- >4,9 - 37,0

- Auenbereich der Vereinigten Mulde
- Testgebiet Mitte

Raumeinheiten 3.3, Median, IQA

	A4, P50: 1, IQA: 0,62
	A3, P50: 1,4, IQA: 0,7
	A2-D2, P50: 2,3, IQA: 2,6
	A3-D2, P50: 3,15, IQA: 2,725
	A3-D1, P50: 5,85, IQA: 7
	A2-D1, P50: 6,8, IQA: 8,9
	A1, P50: 11,8, IQA: 10,8

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
(LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: + 49 351 2612-0

Telefax: + 49 351 2612-1099

E-Mail: poststelle.lfulg@smekul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft. Diese Veröffentlichung wird finanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushalts.

Autoren:

Carolin Kaufmann-Boll, Maike Kern, Stefanie Niederschmidt,
Michael Kastler, Tina Neef

ahu GmbH Wasser · Boden · Geomatik

Kirberichshofer Weg 6, 52066 Aachen

Telefon: +49 (0)241 900011-0

Telefax: +49 (0)241 900011-9

E-Mail: info@ahu.de

Redaktion:

Kati Kardel, Ingo Müller

Referat 42 Boden, Altlasten

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft
und Geologie

Halsbrücker Str. 31A, 09599 Freiberg

Telefon: + 49 (0)3731 294-2808

Telefax: + 49 351 03731 2942099

E-Mail: Kati.Kardel@smekul.sachsen.de

Foto:

Titelblatt: Falk Hieke (2019)

Auflage:

1. Auflage

Redaktionsschluss:

2.2.2022

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de