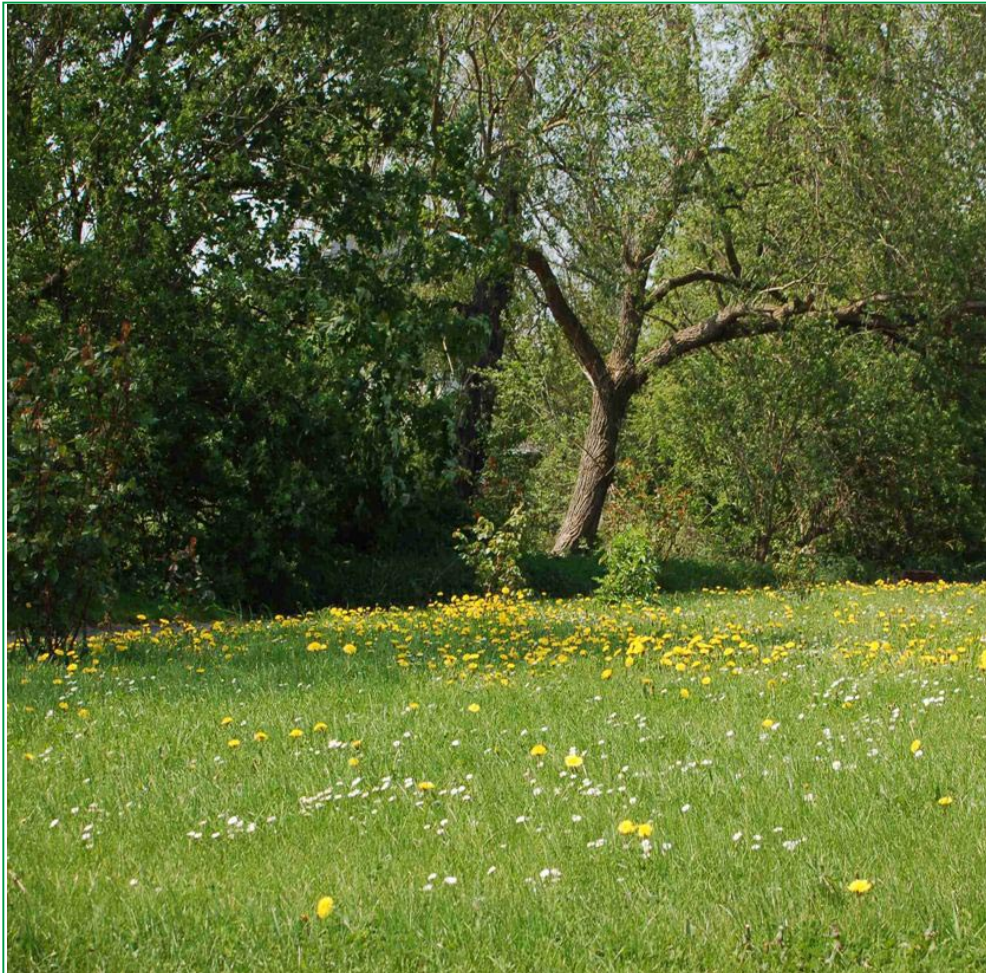




Das Lebensministerium



## Arsentransfer Boden - Pflanze

Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft

Heft 14/2006

Freistaat  Sachsen

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

**Untersuchungen zum Arsentransfer Boden - Pflanze  
auf Grünlandstandorten**

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Dipl.-Geoökol. Sina Haßler , Dr. Ralf Klose

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Arsenproblematik und Hintergrund des Projektes .....	1
1.2	Untersuchungsschwerpunkte .....	2
<b>2</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>5</b>
2.1	Probenahme.....	5
2.2	Probenaufbereitung.....	6
2.2.1	Bodenproben.....	6
2.2.2	Pflanzenproben .....	6
2.2.3	Probenbezeichnung .....	7
2.3	Analysen .....	9
2.3.1	Bodenanalysen .....	9
2.3.2	Pflanzenanalysen.....	9
2.4	Statistische Auswertung .....	12
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>13</b>
3.1	As-Gesamtgehalte der Böden und Grünlandpflanzen im Untersuchungsgebiet .....	13
3.2	Einflussfaktoren der Arsenbelastung des Grünlandes .....	18
3.2.1	Einfluss von Verschmutzung und der Pflanzenklasse.....	18
3.2.2	Einfluss des Standortes .....	19
3.2.3	Einfluss kleinräumig variierender Boden- und Standorteigenschaften .....	20
3.2.4	Einfluss der Pflanzenart .....	22
3.3	Anteile organischer und anorganischer Arsen-Formen am As-Gehalt von Grünlandpflanzen – Arsenspeziesbestimmung –.....	24
3.4	Einfluss der Silierung auf die Toxizität des Arsens im Grünfutter.....	27
<b>4</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>32</b>

## **Anlagen**

<b>Anlage A</b>	Standortdaten
<b>Anlage B</b>	Vorgehensweise bei der Probenahme und -aufbereitung
<b>Anlage C</b>	Untersuchte Pflanzenarten
<b>Anlage D</b>	Qualitätskontrolle Arsenspezies-Extraktion
<b>Anlage E</b>	Vegetationszusammensetzung der Untersuchungsstandorte
<b>Anlage F</b>	As-Gehalte im Oberboden und im Grünlandaufwuchs, Messgrößen der Oberböden
<b>Anlage G</b>	Arsengehalte und Arsenspezies der untersuchten Pflanzenarten
<b>Anlage H</b>	Relative As-Transferfaktoren der Pflanzenarten
<b>Anlage I</b>	Arsenspeziesanteile frischer und siliierter Grünlandproben

## **Abbildungen**

Abbildung 1:	Lage der Untersuchungsgebiete im Freistaat Sachsen
Abbildung 2:	Vorgehensweise bei der As-Extraktion für die Spezies-Analyse mittels HPLC-ICP-MS
Abbildung 3:	As-Gehalte (KW) im Oberboden in definierten Arsen-Belastungsklassen
Abbildung 4:	Abhängigkeit As-Gehalt Grünschnitt vom As-Gehalt des Bodens
Abbildung 5:	Wascheffekt auf der Grundlage aller untersuchten Pflanzenprobenpaare PAw/PA
Abbildung 6:	Mittlerer As-Transfer für den 1. Grünlandaufwuchs (gewaschen) in Abhängigkeit vom Standort
Abbildung 7:	Arsentransfer Boden- Grünlandaufwuchs (gewaschen) in Abhängigkeit vom Standort, getrennt nach Kräutern und Gräsern
Abbildung 8:	Relative Arsentransferfaktoren häufiger Pflanzenarten
Abbildung 9:	As-Pflanzengehalte auf Probenahmepunkten Hilbersdorf, gewaschen, 1. Schnitt
Abbildung 10:	Chromatogramm der As-Speziesbestimmung
Abbildung 11:	As <sup>3+</sup> -Anteil am As-Extrakt von ungewaschenen und gewaschenen Pflanzenproben
Abbildung 12:	Arsenspeziespektrum frischer und siliierter Grünschnittproben
Abbildung 13:	Anteil von As <sup>3+</sup> in frischen und silierten Grünschnittproben

## Tabellen

- Tabelle 1: Überblick über großflächige Arsenanomalien in sächsischen Oberböden und ihre Ursachen
- Tabelle 2: Relative Toxizität von Arsenverbindungen
- Tabelle 3: verwendete Probenbezeichnungen
- Tabelle 4: Parameter der HPLC-ICP-MS-Methode
- Tabelle 5: Gradientenprogramm
- Tabelle 6: Bestimmungsgrenzen der angewendeten Analysemethoden
- Tabelle 7: As-Gesamtgehalte der untersuchten Bodenproben
- Tabelle 8: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für Arsen in Grünland 2005
- Tabelle 9: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für Arsen in häufigen Pflanzenarten am Standort Hilbersdorf
- Tabelle 10: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für den Arsen-Transfer Boden-Pflanze für häufige Arten am Standort Hilbersdorf,  
X: pH-Wert Boden; Y: T-As, pH-Wert
- Tabelle 11: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für den Arsen-Transfer Boden-Pflanze für häufige Arten am Standort Hilbersdorf,  
X: Humusgehalt Boden; Y: T-As
- Tabelle 12: Relative As-Transferfaktoren häufiger Pflanzenarten
- Tabelle 13: As-Gehalte gewaschener Pflanzenartenproben auf Probenahmeflächen vom Standort Hilbersdorf
- Tabelle 14: Arsenspeziesspektrum der gewaschenen und ungewaschenen Pflanzenproben (n = 264; 29 Pflanzenarten, alle Standorte)

## Verwendete Abkürzungen

As <sup>3+</sup>	Arsenit
As <sup>5+</sup>	Arsenat
AsB	Arsenobetain
As_HNO <sub>3</sub>	Arsengesamtgehalt Pflanze, bestimmt im Aufschluss nach VDLUFA MB VII 2.1.1
B	Bestimmtheitsmaß
BA	Bodenprobe
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BDSS	1,2-Benzendisulfonsäure
BG	Bestimmungsgrenze
DMA	Dimethylarsinsäure
EA	Extraktionsausbeute (extrahierbarer Anteil des Elementgehaltes)
FM	Frischmasse
FuMIV	Futtermittelverordnung
HPLC	High Pressure Liquid Chromatography
ICP-MS	Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry (Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma)
KW	Königswasserextrakt
MA	Pflanzenmischprobe/Grünschnittprobe, frisch
MAX	Maximum (größter Wert)
MIN	Minimum (kleinster Wert)
MMA	Monomethylarsonsäure
MW	Mittelwert
n	Probenanzahl
PA	Pflanzenprobe, einzelne Arten
SA	Pflanzenmischprobe/Grünschnittprobe, siliert
SD	Standardabweichung
T-As	relativer Transferfaktor As-Boden→ As-Pflanze (Prozent-Anteil des As-Gehaltes in der Pflanze am Arsengehalt im Boden)
TM	Trockenmasse

## 1 Einleitung

### 1.1 Arsenproblematik und Hintergrund des Projektes

In Deutschland liegen die mittleren As-Hintergrundgehalte von Böden zwischen 2 und 7 mg/kg. (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Demgegenüber stellen die hohen As-Hintergrundwerte von Leitbodengesellschaften über Festgestein der Grundgebirgseinheiten in Sachsen eine einzigartige Situation dar. Die Ursachen hierfür sind überwiegend geogen bedingt. Häufig sind es polymetallische Lagerstätten, Zinn-Wolfram-Vererzungen und uranführende Mineralisationen des Erzgebirges, die sich durch eine starke As-Führung auszeichnen und ihre Nebengesteine deutlich beeinflussen. Großflächig erhöhte Arsengehalte im Boden befinden sich dabei im stark durch Bergbau geprägten Raum Freiberg, im Erzgebirge sowie in den Auengebieten der das Erzgebirge entwässernden Flüsse Mulde und Zschopau.

Tabelle 1 gibt einen kurzen Überblick über die regionalen As-Anomalien und die jeweiligen Hauptursachen für diese As-Anreicherungen. Anthropogene Einträge, wie z.B. Arsentrioxidemissionen aus der Bergbau- und Hüttentätigkeit, Staubverwehungen aus kontaminierten Böden und dem Abriss von Hüttenanlagen sowie der Einsatz arsenhaltiger Pflanzenschutzmittel, Herbizide und Dünger erhöhten in der Vergangenheit die Bodenbelastung noch zusätzlich.

Für den Landwirt in diesen Regionen ergibt sich das Problem, dass der Maßnahmewert von 50 mg/kg nach BBodSchV für die Nutzung des Bodens als Grünland zum Teil erheblich und flächendeckend überschritten ist. Bei Überschreitung des Maßnahmewertes ist gemäß BBodSchG mit einer Wahrscheinlichkeit von über 50 Prozent eine Überschreitung des höchsten zulässigen Pflanzenwertes anzunehmen. Es wird dann von einer schädlichen Bodenveränderung ausgegangen, die eine Gefahr für das entsprechende Schutzgut darstellt.

Die Feststellung von schädlichen Bodenveränderungen sowie die Maßnahmen zum Bodenschutz sind im sächsischen Abfallwirtschafts- und Bodenschutzgesetz (SächsAbG) geregelt. Im Falle der Grünlandnutzung ist das Schutzgut das Nutztier, der Grenzwert für die höchste zulässige Pflanzenkonzentration der Futtermittelgrenzwert, welcher für Futtermittelausgangsstoffe auf 2 mg As/kg (TM von 88 Prozent) nach EG-Richtlinie 2002/32/EG festgesetzt wurde. Nach § 5 (5) Futtermittelgesetz ist der Landwirt verpflichtet, Überschreitungen des Futtermittelgrenzwertes der zuständigen Behörde zu melden. Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (Anpassung der Nutzung und Bewirtschaftung) können notwendig werden. Mit Einführung des Verdünnungsverbot von kontaminiertem mit unkontaminiertem Futter durch die Richtlinie 2002/32/EG wurde der Handlungsspielraum für die Landwirte in den Arsenproblemgebieten weiter eingeschränkt.

**Tabelle 1: Überblick über großflächige Arsenanomalien in sächsischen Oberböden und ihre Ursachen [nach LfUG, 2000]**

As-Anomalie	Ursache insgesamt	jeweilige lokale Ursache	Arsengehalte im Oberboden
Raum Freiberg	Natürliche erhöhte As-Anomalien im Gestein aufgrund As-führender Uran-Gangvererzungen,	(1), (3)	Median: 115 mg/kg, P90: 680 mg/kg
Ehrenfriedersdorf	beziehungsweise Mineralisationen von Zinn-Wolfram-Vererzungen, Zinn- und Spatmineralisationen (1)	(1), (3)	Median: 400 mg/kg, P90: 1600 mg/kg
Westerzgebirge (Schneeberg-Schwarzenberg-Johanngeorgenstadt, Klingenthal-Gottesberg)	arsenreiche lithogene Komponente im Untergrund (Mülsener Schichten) (2)	(1)	
Auenböden von Freiberg und Zwickauer Mulde, sowie Zschopau	Emission der Zinn- und Arsenhütten (3)  Abtragung von Böden aus arsenreichen Mineralisationsgebieten (4)	(3), (4)	Freiberger Mulde (Siebenlehn): MAX: 1800 mg/kg Zschopau (Augustusburg): MAX: 5500 mg/kg
Verbreitungsgebiet von Rotliegend-Sedimenten (Zwickau-Leukersdorf-Chemnitz)		(2)	

## 1.2 Untersuchungsschwerpunkte

Vorausgehende Untersuchungen von As-Gehalten in Böden und Grünlandaufwüchsen im Gebiet der Vereinigten Mulde (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2004) bestätigten zwar die Höhe des Maßnahmewertes von 50 mg As/kg Boden für die Einhaltung des Futtermittelgrenzwertes von 2 mg As/kg Grünfutter, jedoch zeigte sich, dass auch bei weit höheren As-Gehalten im Boden unbelastete Grünlandaufwüchse möglich sind. Eine Beziehung zwischen dem As-Gehalt im Boden und dem As-Gehalt der Pflanzen konnte nicht ermittelt werden. Der Kenntnisstand zum As-Transfer Boden - Nutzpflanze kann die Belastung des Grünlandes nur unzureichend erklären. Daher bestand ein Ziel des Projekts in der Beantwortung der Frage, welche



anderen Faktoren (neben dem As-Gehalt des Bodens) maßgebend Einfluss auf den Arsentransfer Boden - Nutzpflanze haben.

Mehrfach wurde bereits publiziert, dass der Grad der Arsenaufnahme zwischen verschiedenen Pflanzenarten stark variiert (BECH ET AL. 1997, OBLASSER, 2001; HAßLER, 2002). In diesem Projekt sollte untersucht werden, ob zwischen typischen Arten von Grünlandpflanzen in Sachsen ebenfalls deutliche Unterschiede bezüglich ihrer Arsentransferkoeffizienten (Verhältnis As-Gehalt Pflanze zu As-Gehalt Boden)<sup>1</sup> existieren, um den Landwirten in den Arsenproblemgebieten Empfehlungen zum Anbau bestimmter Arten mit geringer Arsenaufnahme geben zu können. Weiterhin stand die Frage, ob es einen Unterschied zwischen Auen- und Verwitterungsstandorten bezüglich der Höhe des Arsentransfers Boden → Grünland gibt.

Der Futtermittelgrenzwert bezieht sich auf den As-Gesamtgehalt im Futter. Die akute und chronische Toxizität des Arsens für Organismen hängt jedoch nicht allein von der Dosis des aufgenommenen Arsens ab, sondern sie wird in starkem Maße auch durch die chemische Form des Arsens beeinflusst. Besonders groß ist der Unterschied der Toxizität anorganischer As-Verbindungen wie Arsenat ( $\text{As}^{5+}$ ) und Arsenit ( $\text{As}^{3+}$ ) einerseits und methylierten organischen Arsenspezies, wie Monomethylarsensäure (MMA) oder Dimethylarsinsäure (DMA) oder Arseno-betain (AsB) andererseits. Die Toxizität nimmt in folgender Reihenfolge ab:



In Tabelle 2 sind die letalen Dosen einiger Arsenverbindungen als Kenngröße für die Toxizität aufgeführt.

---

<sup>1</sup> Transferkoeffizient nach ALLOWAY (1999): Kennzahl für die Aufnahme von Metallen aus dem Boden in die Pflanze. Er wird aus dem Verhältnis der Konzentration des Metalls im oberirdischen Pflanzengewebe zur Gesamtbodenkonzentration des Metalls gebildet und ist dimensionslos. Er wird auch für andere, nichtmetallische Elemente verwendet, häufig auch unter der Bezeichnung Transferfaktor. Im Bericht wurde er zur besseren Veranschaulichung in Prozent angegeben und als relativer Transferfaktor (T-As) bezeichnet:  $\text{T-As} = \text{As-Pflanze [mg/kg]} * 100\% / \text{As-Boden [mg/kg]}$ .

**Tabelle 2: Relative Toxizität von Arsenverbindungen, angegeben in 50 Prozent der letalen Dosen (LD50) in mg Arsenverbindung pro kg Körpergewicht (KAISE & FUKUI 1992; SHIOMI, 1994; DONOHUE & ABERNATHY, 1999)**

As-Spezies	LD-50-Wert [mg/kg]
As <sup>3+</sup>	15-42
As <sup>5+</sup>	20-800
MMA	700-1800
DMA	1200-2600
AsB	> 10000

Um die Möglichkeit zu prüfen, ob ein bedeutender Anteil des Arsens im Grünland oder in bestimmten Arten organischer Herkunft und damit nur gering toxisch ist, sollte in diesem Projekt ein breites Spektrum an Gras-, Kraut- und Leguminosenarten bezüglich ihrer As-Spezieszusammensetzung untersucht werden. Dann wäre eine Grundlage für die Diskussion des bestehenden Futtermittelgrenzwertes geschaffen. Bisher existieren zwar Publikationen über den As-Speziespool einzelner Pflanzenarten (NISSEN & BENSON, 1982), jedoch sind keine Untersuchungen zu Grünlandpflanzenarten in Sachsen bekannt.

Daneben sollte untersucht werden, wie groß der Verschmutzungsanteil am Gehalt an toxischen anorganischen Arsenformen im Grünschnitt ist, um mit verschmutzungsmindernden Maßnahmen nicht nur die Konzentration, sondern auch die Toxizität des mit dem Futter aufgenommenen Arsens zu senken. Weiterhin sollte die Frage geklärt werden, ob es einen Unterschied zwischen dem Arsen-Speziespool von frischem und siliertem Grünfutter gibt. Aus der Literatur ist bekannt, dass durch mikrobielle Prozesse Arsenformen auf vielfache Weise ineinander umgewandelt werden können (KLOKE, 1994; JACKSON ET AL., 2003). Dabei ist die Biomethylierung, bei der As<sup>3+</sup> und As<sup>5+</sup> über Reduktions-, Oxidations- und Methylierungsprozesse in organische Spezies umgewandelt werden, von besonderer Bedeutung für die biologische Detoxifizierung des Arsens in der Umwelt. Dieser Prozess kann, katalysiert durch Mikroorganismen, in Böden, Sedimenten, Tier und Mensch als auch in aquatischen und terrestrischen Pflanzen ablaufen (MOMPLAISIR ET AL., 2001).

Weil bei Silierungsprozessen eine Reihe von Mikroorganismen beteiligt sind (CULLEN & REIMER, 1989), ist eine Veränderung der Arsenspezies und damit eine einhergehende Toxizitätsveränderung im Futter möglich. Ergeben sich aus den Untersuchungen bedeutende Unterschiede hinsichtlich der Anteile an anorganischen und organischen Arsenbindungsformen zwischen frischem Grünfutter und Silage, ist eine Empfehlung zur Silierung beziehungsweise zu ihrer Reduzierung in arsenbelasteten Gebieten sinnvoll.

## 2 Methodik

### 2.1 Probenahme

Als Untersuchungsflächen wurden drei Gebiete ausgewählt, deren Oberböden zum einen As-Gehalte oberhalb des Maßnahmewertes von 50 mg/kg aufweisen, zum anderen über eine große Varianz der As-Gehalte innerhalb einer möglichst kleinen Fläche verfügen. Weiterhin sollten sich die Gebiete hinsichtlich des Standorttyps (Verwitterungs- und Auenstandort) unterscheiden. Die ausgewählten Standorte Wurzen, Colditz sowie Hilbersdorf sind in der Übersichtskarte in Abbildung 1 eingezeichnet. Einen Überblick über die Standortdaten enthält Anlage A.

Die Beprobung erfolgte für den ersten Schnitt in der 18. Kalenderwoche, für den zweiten Schnitt zwischen der 26. und 29. Kalenderwoche 2005. An jedem Standort wurden sechs bis 10 Probenahmeflächen mit einer Größe von 4 m<sup>2</sup> ausgewählt, die sich bezüglich ihrer Arsengehalte im Boden voneinander unterschieden. Von diesen Flächen wurde der Pflanzenaufwuchs abgemäht und in zwei Pflanzenmischproben geteilt. Dabei wurde darauf geachtet, die Pflanzenarten gleichmäßig auf beide Pflanzenmischproben zu verteilen. Auf der gleichen Fläche wurde mit einem Rillenbohrstock aus 10 bis 15 Einstichen eine Mischprobe des Oberbodens (0 bis 10 cm Tiefe) gebildet.

Anlage B gibt einen Überblick über die Beprobung der Grünlandflächen sowie über die weitere Probenaufbereitung im Labor.

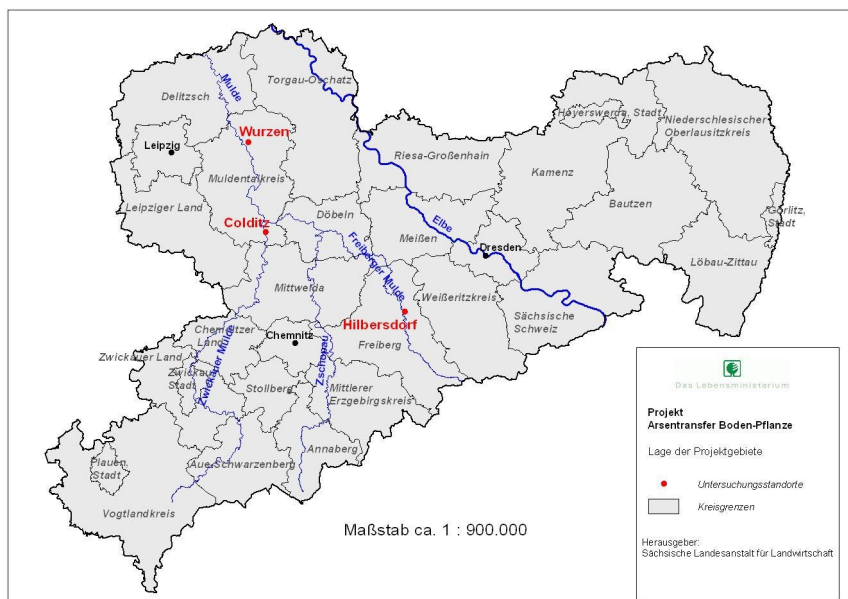


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsgebiete im Freistaat Sachsen

## **2.2 Probenaufbereitung**

### **2.2.1 Bodenproben**

Die Bodenproben wurden homogenisiert und getrocknet. Für die Körnungsanalyse wurden ungesiebte, getrocknete Teilproben verwendet. Zum Zeitpunkt des ersten Schnittes wurden insgesamt 26, zum zweiten Schnitt insgesamt 15 Oberbodenmischproben entnommen.

### **2.2.2 Pflanzenproben**

#### Pflanzenartenproben

Eine der beiden pro Probenahme­fläche entnommenen Pflanzenmischproben wurde im Labor nach Pflanzenarten getrennt. Jede dieser Einzelproben wurde in zwei Teilproben aufgeteilt und ein Teil unter fließendem Wasser gewaschen. Anschließend wurden beide Teilproben auf eine Länge von 0,5 bis 1 cm geschnitten und bis zur Analyse bei -20°C aufbewahrt. Einzelproben mit einem Gewicht von weniger als 10 g wurden nicht mehr getrennt und lediglich die gewaschene Probe hergestellt. Durch die Aufteilung in 32 Pflanzenarten und in gewaschen/ungewaschen ergeben sich 300 Einzelproben (PA) für den 1. Schnitt und 160 für den 2. Schnitt. Eine Liste der entnommenen Pflanzenarten befindet sich in Anlage C.

#### Pflanzenmischproben und Silagen

Die zweite entnommene Pflanzenmischprobe wurde auf 2 - 3 cm Länge geschnitten und anschließend in zwei Subproben geteilt. Eine Subprobe wurde in zwei Unterproben geteilt, wovon eine als frische Probe (MA) für die spätere Analyse des As-Speziesspektrums eingefroren und die andere bei 105°C getrocknet, mittels Ultra-Zentrifugalmühle homogenisiert und bis zur Analyse des As-Gesamtgehaltes in PE-Flaschen aufbewahrt wurde. Für die Ermittlung des Trockenmasseanteils wurde diese Unterprobe vor und nach der Trocknung gewogen.

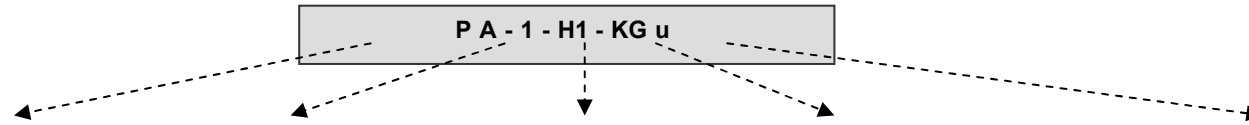
Aus der anderen Subprobe wurde Silage (SA) hergestellt, dabei wurden die Bedingungen für eine optimale Silagenherstellung (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER, 2001) realisiert. Um eine Verschimmelung oder Buttersäurebildung zu vermeiden, sollte der Trockenmassegehalt in der Silage 35 Prozent betragen und ein Verdichtungsgrad von 220 kg TM/m<sup>3</sup> gewährleistet werden. Ausgehend von dem Volumen der verwendeten Siliergefäße von 250 ml wurde bei einer TM von 35 Prozent eine Masse von 157 g Grünlandschnitt eingesetzt. Bei einem angenommenen durchschnittlichen TM-Gehalt der entnommenen Grünlandproben des 1. Schnittes von 15 Prozent wurden je 206 g Frischmasse benötigt, welche durch Anwelkung auf die Masse von 157 g verringert wurde und anschließend jeweils in die Siliergefäße per Hand eingefüllt und verdichtet wurden. Zur Verbesserung der Silierbedingungen wurde je Probe 0,5 g Silierhilfsmittel untergemischt. Für den luftdichten Abschluss wurden die Deckel der Gefäße zusätzlich mit Klebeband fixiert. Nach acht bis neun Wochen Standzeit bei Raumtemperatur wurden die Gefäße geöffnet und die Silagen bis zur Analyse der As-Spezies in der Gefriertruhe aufbewahrt.

Entsprechend der Anzahl der beprobten Grünlandflächen beim 1. Schnitt ergeben sich 26 frische Pflanzenmischproben (MA) und 22 Silagen (SA). Vier Silagen konnten nicht für die Analysen verwendet werden, weil sie starke Vermoderungserscheinungen aufwiesen.

### **2.2.3 Probenbezeichnung**

In Tabelle 3 sind die im Bericht vorkommenden Probenbezeichnungen zusammengefasst.

**Tabelle 3: Im Bericht vorkommende Probenbezeichnungen (systematische Artenbezeichnungen siehe Anlage C)**



Probenart	Bez. des Grünland-schnittes	Bezeichnung des Standortes	Pflanzenart		Zustand
BA= Bodenprobe	1 = 1. Schnitt	C= Colditz	A =	Sauerampfer	u= ungewaschen
PA= Pflanzenartenprobe	2 = 2. Schnitt	H= Hilbersdorf	AS =	Stumpflättriger Ampfer	w= gewaschen
MA= Pflanzenmischprobe, frisch		W= Wurzeln	B =	Bärenklau	
SA= Pflanzenmischprobe, siliert		1= 1.Probenahmepunkt des Standortes	E =	Eisenkraut	
		.	G =	Glatthafer	
		.	GW =	Wiesenglockenblume	
		.	KH =	Kriechender Hahnenfuß	
		.	H =	Hirtentäschel	
		.	HW =	Wolliges Honiggras	
		.	K =	Klee*	
		.	KG =	Knaulgras	
		.	L =	Gemeiner Löwenzahn	
		.	LH =	Herbstlöwenzahn	
		.	MG =	Grasmiere	
		.	MV =	Vogelmiere	
		10= 10. Probenahmepunkt des Standortes	Q =	Gemeine Quecke	
			R =	Rispengras*	
			RG =	Rohrglanzgras	
			RS =	Rohrschwengel	
			S =	Schafgarbe	
			T =	Taubnessel*	
			WW =	Welsches Weidelgras	
			F=	Wiesenfuchsschwanz	
			WK =	Wiesenkerbel	
			WL=	Wiesenlabkraut	
			SK =	Wiesenschaumkraut	
			WS =	Wiesenschwengel	
			WB =	Breitwegerich	
			W =	Spitzwegerich	

## **2.3 Analysen**

### **2.3.1 Bodenanalysen**

Die Bestimmung des Arsengesamtgehaltes erfolgte jeweils aus dem nach DIN ISO 11466 hergestellten Königswasserextrakt nach der Verbandsmethode VDLUFA MB VII 2.2.1.2. Der pH-Wert des Bodens wurde aus dem Calcium-Extrakt (VDLUFA MB I A.5.1.1), der Humusgehalt nach DIN ISO 10694 ermittelt.

### **2.3.2 Pflanzenanalysen**

#### **Bestimmung des As-Gesamtgehaltes**

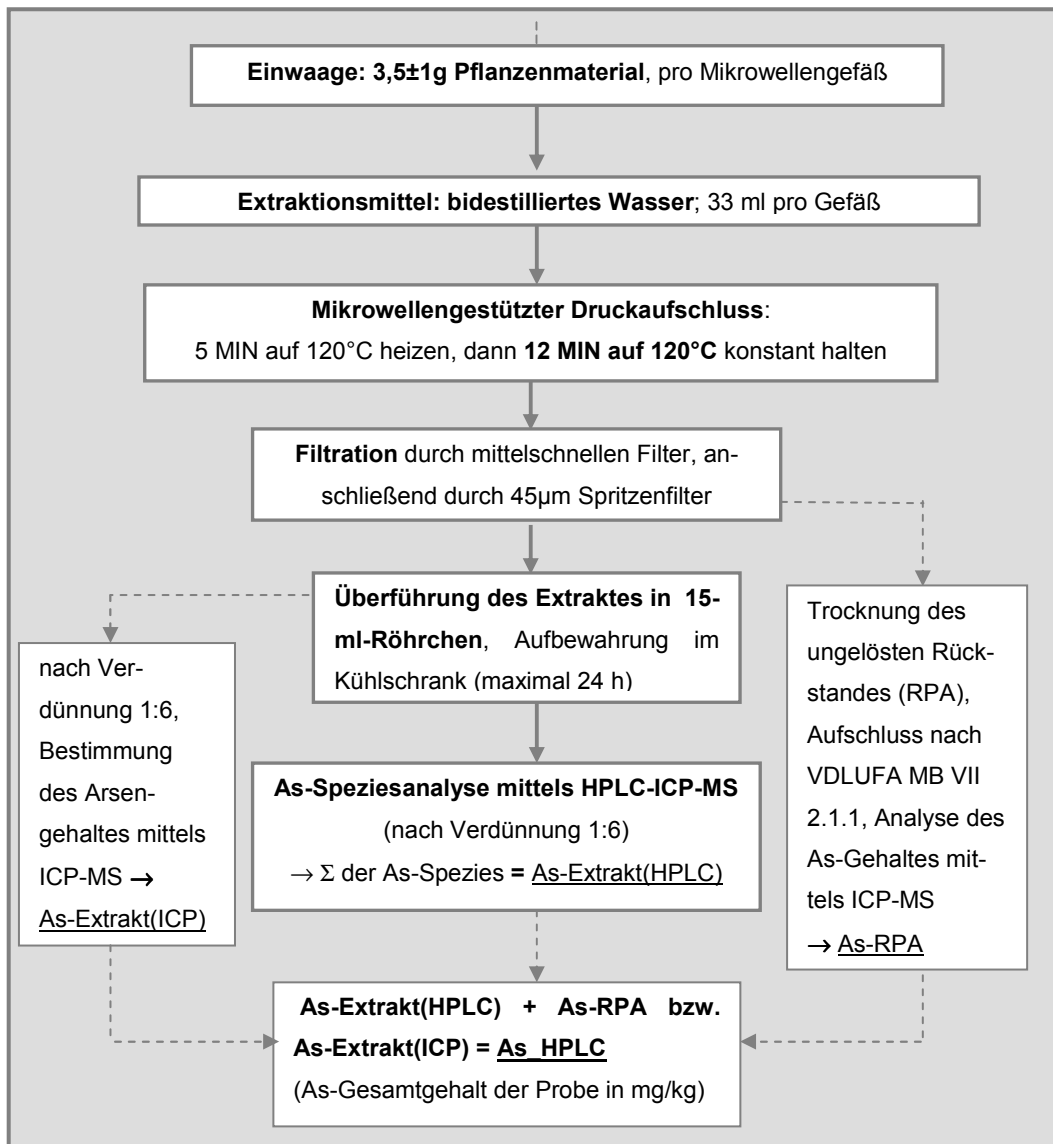
Der für die Bestimmung des As-Gesamtgehaltes in den Pflanzenproben notwendige Aufschluss erfolgte nach der Verbandsmethode VDLUFA MB VII 2.1.1 in einer mikrowellengestützten Druckaufschlussapparatur (Mikrowelle ETHOS der Firma MLS). Die Analyse erfolgte mittels ICP-MS ELAN 6000 der Firma Perkin Elmer nach der Verbandsmethode VDLUFA MB VII 2.2.2.5. Zur Kontrolle der Richtigkeit der Messung wurden zwei zertifizierte Pflanzenstandards mitanalysiert.

#### **Qualitative und quantitative Bestimmung des As-Speziesspektrums**

Ziel war es, die häufigsten in Pflanzen auftretenden As-Spezies in den Pflanzenproben nachzuweisen und deren Konzentrationen messen zu können. Dabei wurden folgende fünf Arsenspezies ausgewählt:  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{As}^{5+}$ , Monomethylarsonsäure (MMA), Dimethylarsinsäure (DMA) sowie Arsenobetain (AsB). Als Messmethode wurde die HPLC-ICP-MS gewählt, welche die hohe Trennleistung der Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) mit der ausgezeichneten Empfindlichkeit der ICP-MS verknüpft.

Um das Arsen messen zu können, muss es zuvor aus dem Pflanzenmaterial so vollständig wie möglich extrahiert werden (hohe Extraktionsausbeute EA), wobei darauf geachtet werden muss, dass während der Extraktion keine Veränderung der Arsenspeziesverteilung verursacht wird. Wichtig ist die Optimierung der Parameter Extraktionszeit, Extraktionstemperatur und Filtrationszeit. Um auch nach der Extraktion die Stabilität der Arsenspezies zu gewährleisten, wurden die Extrakte kühl und dunkel gelagert und innerhalb von 24 Stunden mittels HPLC-ICP-MS analysiert.

Nach Vorversuchen mit unterschiedlichen Extraktionsarten (Extraktion im Homogenisator, Ultraschallbad und in der Mikrowelle), verschiedenen Extraktionsmitteln (Ammoniumphosphat, Wasser/Methanol-Gemisch, Wasser), unterschiedlichen Einwaagen und variierenden Extraktionszeiten sowie -temperaturen wurde die in aufgezeigte Methode als die optimale Lösung gewählt. Als Orientierung für mögliche und effiziente Extraktionsmethoden für Arsen wurden die Angaben von SCHMIDT ET AL. (2000) verwendet.



**Abbildung 2: Vorgehensweise bei der As-Extraktion für die Spezies-Analyse mittels HPLC-ICP-MS (unterstrichen: im Bericht verwendete Abkürzungen für As-Gehalte)**

Zur chromatographischen Trennung der Arsenspezies wurden verschiedene Säulen (Hamilton PRP-X100; DIONEX-Ionpac AG7/AS7) und Eluenten ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ) in unterschiedlichen Elutionsprogrammen (Isokratische und Gradientenelution mit Änderung der pH-Werte, Fließraten und Zeiten für die einzelnen Elutionsschritte) getestet. Dabei stellte sich die Methode nach KOHLMAYER ET AL. (2002) als optimal heraus.



Bei dieser Methode werden die fünf As-Spezies durch Gradientenelution mit zwei unterschiedlich stark konzentrierten Salpetersäurelösungen innerhalb von 12 Minuten getrennt und erscheinen als scharfe Peaks im Chromatogramm. In Tabelle 4 sind die Gerätekomponenten und -einstellungen für die Analyse mittels HPLC-ICP-MS zusammengefasst. Tabelle 5 gibt die einzelnen Schritte des verwendeten Gradientenprogramms wieder.

**Tabelle 4: Parameter der HPLC-ICP-MS-Methode**

Komponente/Parameter	
Säule	DIONEX-Ionpac AG7/AS7
ICP-MS	ELAN 6000
Pumpe	Perkin Elmer Series 200
Injektionsvolumen	200 µl
Eluent A	0,5 mM HNO <sub>3</sub> + 0,5 Prozent CH <sub>3</sub> OH + 0,05 M BDSS
Eluent B	50 mM HNO <sub>3</sub> + 0,5 Prozent CH <sub>3</sub> OH + 0,05 M BDSS
Fließrate (Flow rate)	1,3 ml/min
Druck (Pumpe)	139 bar
Zerstäubergasstrom ICP-MS	0,92 l/min

**Tabelle 5: Gradientenprogramm (verändert nach KOHLMAYER ET AL., 2002)**

Schritt	pH-Wert	Zeit [min]	Gradient
1	3.50	2	100 Prozent A
2	1.76	1	50 Prozent A (linear)
3	1.76	3.3	50 Prozent A
4	3.50	0.5	100Prozent A (linear)
5	3.50	5	100 Prozent A

Weil bisher keine zertifizierten Referenzmaterialien für Arsenspezies in Pflanzen erhältlich sind, wurde die Arsenkonzentration in den Pflanzenextrakten zusätzlich mittels ICP-MS ohne HPLC-Kopplung gemessen (As-Extrakt(ICP)) und mit der Summe der mittels HPLC-ICP-MS bestimmten Konzentrationen der einzelnen As-Spezies (As-Extrakt(HPLC) verglichen (siehe ). Zur Bestimmung der Extraktionsausbeute EA wurden die gemessenen Konzentrationen der einzelnen As-Spezies in den Extrakten [µg/l] aufsummiert, über die Einwaage und die ermittelte TM in mg As/kg Pflanze umgerechnet und der prozentuale Anteil des extrahierbaren As-Gehaltes am As-Gesamtgehalt (As\_HNO<sub>3</sub>) berechnet. (Gl. 1 und 2) Die Extraktionsausbeute der Methode liegt im Mittel bei 80 Prozent.

$$EA \text{ [Prozent]} = \text{As-Extrakt } [\mu\text{g/g}] * 100 / \text{As\_HNO}_3 \text{ [mg/kg]} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{As-Extrakt } [\mu\text{g/g}] = \text{As-Extrakt } [\mu\text{g/l}] / \text{Einwaage [g/l]} * 100 / \text{TM [MProzent]} \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Überprüfung der Stabilität der untersuchten As-Spezies während der Extraktion erfolgte durch Analyse eines Mischstandards. Dieser enthielt die fünf As-Spezies in einer Konzentration von je 5 µg/l. Der Mischstandard wurde, wie die Pflanzenproben bei der Extraktion, bei 120°C in der Mikrowelle erhitzt und mit einem nicht erhitzten Standard der gleichen Konzentration an As-Spezies verglichen. Von beiden Standards wurden nach Bestimmung der As-Spezies-Konzentrationen die Anteile am aufsummierten Arsengesamtgehalt bestimmt und verglichen. Zusätzlich wurden zwei Pflanzenproben mit sehr niedrigem As-Gehalt einmal vor der Extraktion und parallel dazu zwei Lösungen der gleichen Pflanzenprobe nach der Extraktion mit 3 ml Mischstandard (fünf As-Spezies enthaltend) versetzt und die Anteile der fünf As-Spezies ermittelt. Das Ergebnis dieser Kontrolluntersuchung befindet sich in Anlage D. Eine ausreichende Stabilität der As-Spezies während der Extraktion wurde nachgewiesen.

Für die durchgeführten Untersuchungsmethoden sind die in der Tabelle 6 angegebenen Bestimmungsgrenzen maßgeblich.

**Tabelle 6: Bestimmungsgrenzen der angewendeten Analysemethoden**

Matrix/ Extraktionsmittel	Analyt	Methode	Bestimmungsgrenze
Boden/KW	Arsen gesamt	Hydrid-AAS	
Pflanze/ Druckaufschluss (HNO <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Arsen gesamt	ICP-MS	0,08 µg/l
Pflanze/ Extraktion mit Wasser in Mikrowelle (12 min, 120°C)	As <sup>3+</sup>	HPLC-ICP-MS	0,1 µg/l
	As <sup>5+</sup>		0,5 µg/l
	MMA		0,1 µg/l
	DMA		0,2 µg/l
	AsB		0,3 µg/l

## 2.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit den Programmen SPSS 12.0 for Windows und Microsoft Excel 2000. Die Prüfung von Beziehungen zwischen dem Arsengehalt im Boden und in der Pflanze erfolgte mittels linearer Regression beziehungsweise bei Einbeziehung mehrerer unabhängiger Ausgangsparameter mittels multipler Regression.

Zur Überprüfung der Signifikanz von Unterschieden zwischen den Mittelwerten zweier unabhängiger, normalverteilter Messreihen (z.B. Mittelwert des relativen Arsentransferfaktors von Kräutern und Gräsern) wurde der T-Test verwendet. Zuvor wurde die Normalverteilung der Datenreihen überprüft und Extremwerte eliminiert.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 As-Gesamtgehalte der Böden und Grünlandpflanzen im Untersuchungsgebiet

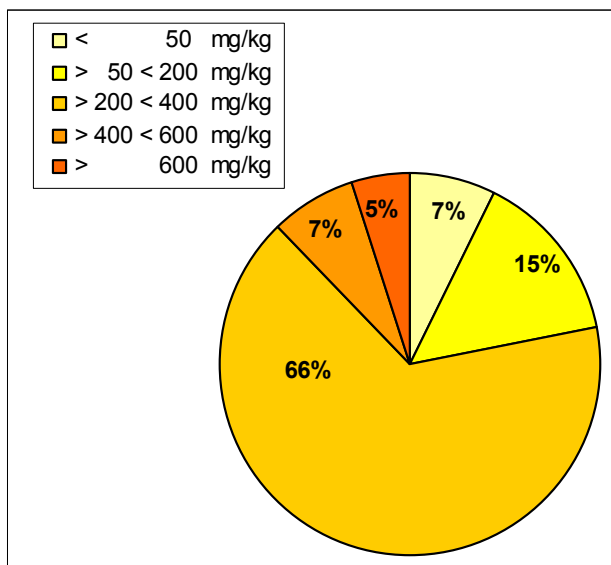
Die Einzelergebnisse der Arsengehaltsbestimmung in den Boden- und Pflanzenmischproben sowie die Ergebnisse aller weiteren in den Bodenproben bestimmten Messgrößen sind in Anlage F aufgelistet. Einen Überblick über die Arsengehalte der Oberböden geben Tabelle 7 und Abbildung 3. Die Arsengesamtgehalte der untersuchten Bodenproben liegen zwischen 29 mg/kg und 2 260 mg/kg. In 38 von insgesamt 41 Bodenproben überschreitet der Gehalt den Maßnahmewert der BBodSchV für Arsen in Grünland von 50 mg/kg Boden (Abb. 3). Bei 93 Prozent der untersuchten Probenahmeplätze besteht somit die Besorgnis der Überschreitung des zulässigen As-Höchstwertes für Futtermittel.

**Tabelle 7: Übersicht über die As-Gesamtgehalte der untersuchten Bodenproben**

Standort	n	Kenngroße	As [mg/kg]
Colditz	6	MIN	29
		MAX	78
		Median	44
Hilbersdorf	18	MIN	224
		MAX	2254*
		Median	296
Wurzen	17	MIN	167
		MAX	450
		Median	285

\* Extremwert innerhalb der insgesamt 18 bestimmten As-Bodengehalte vom Standort Hilbersdorf

Tatsächlich wird der Futtermittelgrenzwert von 2 mg As /kg nur bei sieben von insgesamt 41 Grünschnittproben (17 Prozent) überschritten (Abbildung 4 und Anlage F). Bei As-Bodengehalten unterhalb des Maßnahmewertes von 50 mg/kg ergibt sich eine Einhaltung des Futtermittelgrenzwertes (Abbildung 4). Der niedrigste As-Bodengehalt, bei dem der As-Gehalt der untersuchten Grünschnitte den Futtermittelgrenzwert überschreitet, beträgt 167 mg/kg, wobei keine Grünlandflächen mit Bodengehalten im Bereich zwischen 78 und 167 mg/kg untersucht wurden. Auch oberhalb von 500 mg As/kg Boden treten noch unbelastete Grünlandaufwüchse auf.



**Abbildung 3:**  
**As-Gehalte (KW) im Oberboden in definierten Arsen-Belastungsklassen**

Wie die Bestimmtheitsmaße für die Beziehung zwischen As-Gesamtgehalt (KW) im Boden und Arsengehalt im Grünlandaufwuchs in Tabelle 8 zeigen, besteht keine Korrelation zwischen diesen beiden Größen. Mit zunehmenden As-Bodengehalten nimmt die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen nicht zu. Auch bei Einbeziehung der Faktoren Standort und Schnittnutzung (Tab. 9: Gl. 4, 5, 6, 8, 12) verbessert sich der lineare Zusammenhang nicht.

Beim Standort Colditz ist ein linearer Zusammenhang zu verzeichnen (Gl. 4), jedoch ist dies zumindest teilweise bedingt durch die geringere Probenanzahl, die nur wenig streuenden Arsengehalte im Boden (Abbildung 4) sowie die größere Homogenität des Standortes bezüglich der Artenzusammensetzung gegenüber Wurzen und Hilbersdorf (Anlage E). Die zweiten Schnitte von Hilbersdorf und Wurzen zeigen nur bei Einbeziehung der Punkte mit extremen As-Bodengehalten einen Zusammenhang zwischen As-Boden und As-Grünland (Gl. 6, 12). Bezieht man die Extremwerte (siehe Abbildung 5) nicht mit ein (Gl. 7, 13) besteht kein linearer Zusammenhang mehr.

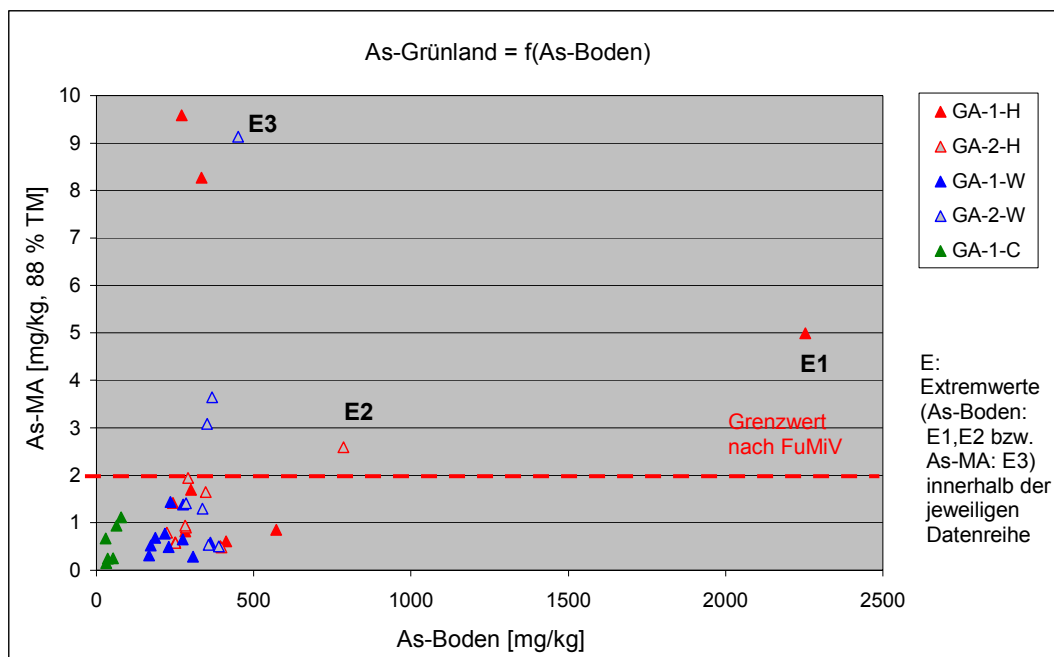


Abbildung 4: Abhängigkeit As-Gehalt Grünschnitt vom As-Gehalt des Bodens

Tabelle 8: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für Arsen in Grünland 2005 (Grünschnittproben MA), unabhängige Variable(X): As-BA; abhängige Variable(Y): As-PA

GI.	Abhängige Variable (Y)	Zustand	mit (1) oder ohne (2) Extremwert*	Gleichung	B	n
3	As-MA <sub>gesamt</sub>	ungewaschen	1	$y = 0,002x + 0,99$	0,10	41
4	As-MA-1-C	ungewaschen		$y = 0,015x - 0,18$	0,55	6
5	As-MA-1-W	ungewaschen		$y = 0,001x - 0,59$	0,01	10
6	As-MA-2-W	ungewaschen	1	$y = 0,043x - 12,8$	0,51	7
7	As-MA-2-W	ungewaschen	2	$y = 0,001x + 1,31$	0,01	6
8	As-MA-1-H	ungewaschen	1	$y = 0,001x + 2,43$	0,03	10
9	As-MA-1-H	ungewaschen	2	$y = -0,008x + 5,51$	0,06	9
10	As-MA-1-H	gewaschen	1	$y = 0,001x + 1,11$	0,01	10
11	As-MA-1-H	gewaschen	2	$y = -0,002x + 1,73$	0,04	9
12	As-MA-2-H	ungewaschen	1	$y = 0,003x + 0,18$	0,51	8
13	As-MA-2-H	ungewaschen	2	$y = 0,001x + 0,86$	0,01	7

\* ohne Extremwerte As-BA beziehungsweise As-MA (siehe Abbildung 4 und Anlage E)

Auch die alleinige Betrachtung des systemischen Aufnahmepfades (gewaschene Probe, Gl. 10 und 11) bringt keine Verbesserung. Weil sich dieses Problem auch in früheren Untersuchungen (LFL, LfUG, 2004) zeigte, wurde darauf verzichtet, dies an weiteren Grünschnittproben (MA) zu überprüfen. Die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Arsengehalt des Bodens und der Pflanze unter Einbeziehung der Art erfolgte anhand von vier Pflanzenarten, die am Standort Hilbersdorf mit ausreichender Häufigkeit vorkamen ( $n \geq 8$ ). Das Ergebnis ist in Tabelle 10 dargestellt.

**Tabelle 9: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für Arsen in häufigen Pflanzenarten am Standort Hilbersdorf, 1. Schnitt, gewaschene Proben, unabhängige Variable (X): As-BA; abhängige Variable (Y): As-PA**

Gl.	Pflanzenart	mit (1) oder ohne (2) Extremwert*	Gleichung	B	n
14	Löwenzahn	1	$y = 0,001x + 0,43$	0,71	10
15		2	$y = -0,001x + 0,94$	0,01	9
16	Grasmiere	1	$y = 0,006x - 0,38$	0,93	9
17		2	$y = -0,001x + 1,68$	0,01	8
18	Klee	1	$y = 0,001x + 0,83$	0,54	8
19		2	$y = -0,003x + 2,15$	0,27	7
20	Rispengras	1	$y = 0,001x + 0,29$	0,37	10
21		2	$y = -0,001x + 1,68$	0,01	9

\* ohne Extremwerte As-BA

Wie die Gleichungen in Tabelle 9 zeigen, besteht auch auf Artenebene kein linearer Zusammenhang zwischen As-Boden und As-Pflanze. Wenn man den Punkt 3 mit einem Bodengehalt von 2 254 mg/kg As mit einbezieht, besteht zwar für Grasmiere (Gl. 16) ein sehr starker und für Löwenzahn (Gl. 14) ein starker linearer Zusammenhang zwischen As-Boden und As-Pflanze, jedoch besteht bei keiner Art mehr eine Korrelation zwischen beiden Variablen, wenn man diesen Punkt nicht mit einbezieht (Gl. 15, 17, 19 und 21).

Am Standort Colditz war keine, am Standort Wurzen nur eine Pflanzenart (Wiesenfuchsschwanz) ausreichend häufig vertreten ( $n = 10$ ), um diesen Zusammenhang mittels linearer Regression zu untersuchen. Das Ergebnis brachte auch hier keinen linearen Zusammenhang zwischen As-Boden und As-Pflanze ( $B = 0,16$ ). Um den zusätzlichen Einfluss des pH-Wertes und des Humusgehaltes auf den Zusammenhang zwischen As-Boden und As-Pflanze zu untersuchen, wurden lineare Regressionen mit beiden Größen als unabhängigen Variable und dem Arsentransferfaktor ( $T\text{-As [Prozent]} = \text{As-Pflanze} \cdot 100 / \text{As-Boden}$ ) als abhängige Variable durchgeführt (Tabelle 10 und Tabelle 11).

**Tabelle 10: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für den Arsen-Transfer Boden-Pflanze für häufige Arten am Standort Hilbersdorf, X: pH-Wert Boden; Y: T-As**

Gl.	Pflanzenart	mit (1) oder ohne (2) Extremwert	Gleichung	B	n
20	Löwenzahn	1	$y = -0,099x + 0,75$	0,14	10
21		2	$y = 0,008x + 0,22$	0,02	9
22	Grasmiere	1	$y = -0,272x + 1,88$	0,27	9
23		2	$y = -0,270x + 1,87$	0,27	8
24	Klee	1	$y = -0,297x + 1,84$	0,44	8
25		2	$y = 0,040x + 0,23$	0,09	7
26	Rispengras	1	$y = -0,063x + 0,43$	0,23	10
27		2	$y = 0,010x + 0,07$	0,11	9

**Tabelle 11: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße für den Arsen-Transfer Boden-Pflanze für häufige Arten am Standort Hilbersdorf, X: Humusgehalt Boden; Y: T-As**

Gl.	Pflanzenart	mit (1) oder ohne (2) Extremwert	Gleichung	B	n
28	Löwenzahn	1	$y = 0,023x + 0,087$	0,07	10
29		2	$y = 0,008x + 0,215$	0,02	9
30	Grasmiere	1	$y = 0,005x + 0,476$	0,01	9
31		2	$y = 0,097x - 0,080$	0,21	8
32	Klee	1	$y = 0,045x + 0,151$	0,16	8
33		2	$y = 0,040x + 0,226$	0,09	7
34	Rispengras	1	$y = 0,008x + 0,055$	0,03	10
35		2	$y = 0,010x + 0,069$	0,11	9

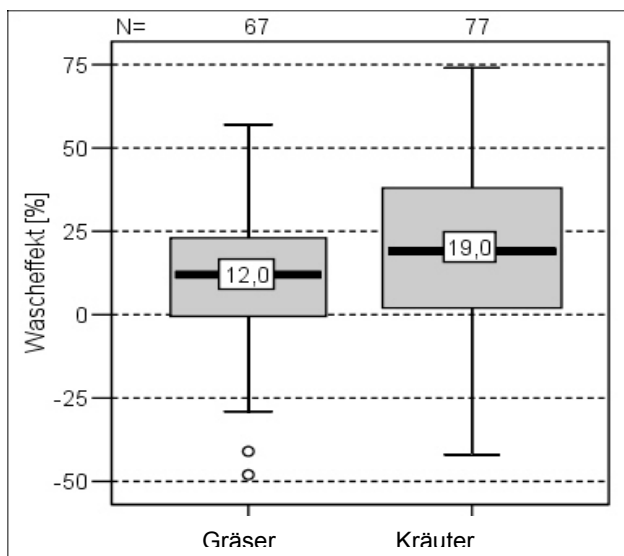
Wie die Bestimmtheitsmaße in Tabelle 10 und Tabelle 11 zeigen, kann keine Korrelation zwischen Arsentransfer und dem Humusgehalt oder dem pH-Wert des Bodens festgestellt werden. Der Einfluss weiterer Variablen auf den Zusammenhang zwischen dem As-Gehalt im Boden und im Grünlandaufwuchs wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

### 3.2 Einflussfaktoren der Arsenbelastung des Grünlandes

#### 3.2.1 Einfluss von Verschmutzung und der Pflanzenklasse

Es sollte untersucht werden, ob der Arsentransfer Boden → Pflanze für einkeimblättrige (monokotyle) und zweikeimblättrige (dikotyle) Grünlandpflanzen unterschiedlich hoch ist. Zur Klasse der Monokotylen zählen unter anderem Gräser, zur Klasse der Dikotylen zählen Kräuter und Leguminosen. Weil unter den auf den Untersuchungsstandorten vorkommenden Grünlandarten lediglich Weiß- und Rotklee Vertreter der Leguminosen darstellen, wurden diese zur Vereinfachung im Bericht zu den Kräutern hinzugezählt.

Kräuter der untersuchten Grünlandflächen nehmen im Mittel dreimal soviel Arsen auf wie Gräser und weisen einen höheren Wascheffekt (Abbildung 5) auf. Der Grund hierfür liegt in der im Vergleich zu Gräsern größeren Blattoberfläche der Krautpflanzen, über die Arsen ins Pflanzeninnere aufgenommen wird oder As-belastete Bodenteilchen in größerem Umfang an der Pflanze haften können.



**Abbildung 5:**  
**Wascheffekt auf der Grundlage**  
**aller untersuchten Pflanzen-**  
**probenpaare  $PA_w/PA_u$ , getrennt**  
**nach Gräsern und Kräutern**  
**(ohne Extremwerte) (Box-Plot<sup>1</sup>)**

Der verschmutzungsbedingte As-Anteil am Arsengesamtgehalt der Pflanzen (= Wascheffekt W) wurde von 153 Paaren von Pflanzenproben (jeweils gewaschen und ungewaschen) des 1. und 2. Schnittes wie folgt bestimmt:  $W = 100 - (As-PA_w * 100 / As-PA_u)$ . Der mittlere Wascheffekt beträgt bei den untersuchten Proben 16 Prozent (Median bei Ausschließung der Extremwerte), dabei tritt eine starke Streuung auf (SD = 24 Prozent), der Maximalwert liegt bei 74 Prozent.

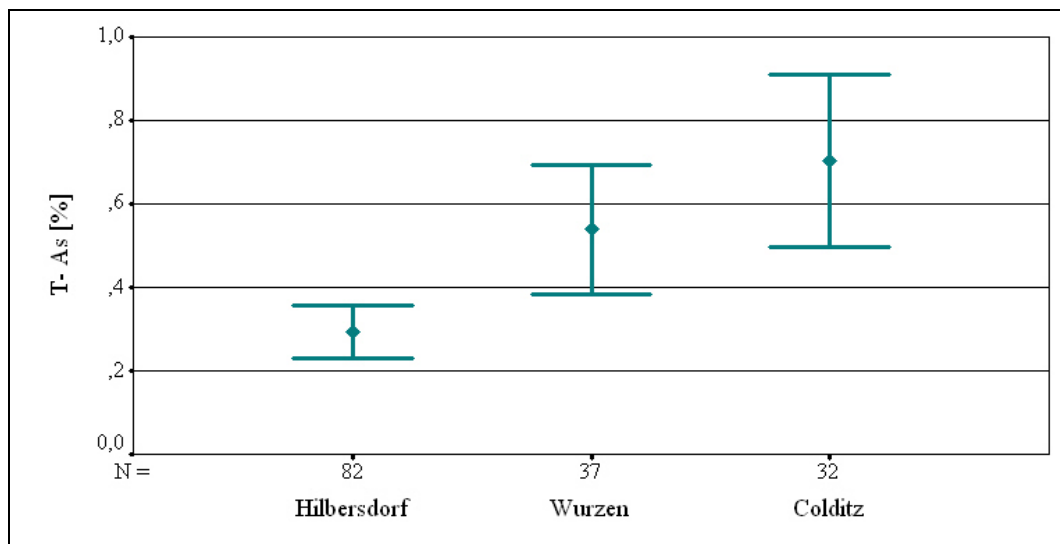
<sup>1</sup> Box-Plot: Vergleichende Darstellung der Verteilung von Werten verschiedener Grundgesamtheiten. Die Box wird vom 25%-Quantil (untere Grenze) und vom 75%-Quantil (obere Grenze) begrenzt, außerhalb der Box werden Maximal- und Minimalwert markiert sowie (sofern vorhanden) Ausreißer und Extremwerte dargestellt. Die innere Linie repräsentiert den Median



Für 27 Prozent der Probenpaare ergaben sich dabei negative Werte, d.h. die gewaschene Probe zeigte höhere As-Gehalte als die ungewaschene. Die Ursache dafür liegt in der geringen, aber nicht vermeidbaren Inhomogenität der Probenpaare  $PA_u/PA_w$ ; die Pflanzenproben konnten erst nach der Auftrennung in gewaschene und ungewaschene Probe zerkleinert werden. Weil sich die Arsengehalte von Blättern, Blüten/Ähren, Stängeln einer Pflanze unterscheiden können (DE KOE ET AL., 1988 in: BECH ET AL., 1997; BARONI ET AL., 2003) kann bei inhomogenen Probenpaaren  $PA_u/PA_w$  bezüglich der Anteile der einzelnen Pflanzenteile besonders bei nur gering verschmutzten Proben ein solcher negativer Wascheffekt erklärt werden.

### 3.2.2 Einfluss des Standortes

Der Einfluss des Standortes auf den Arsentransfer Boden→Pflanze, d.h. ob es sich um einen Verwitterungs- (V-) oder Auenstandort (AI-) handelt, wurde anhand der gewaschenen Pflanzenartenproben (PA) des 1. Schnittes untersucht. Dazu wurden die relativen Transferfaktoren aller gewaschenen Proben des jeweiligen Standortes berechnet und die Mittelwerte daraus gebildet. Das Ergebnis ist im Fehlerbalkendiagramm in Abbildung 6 dargestellt.

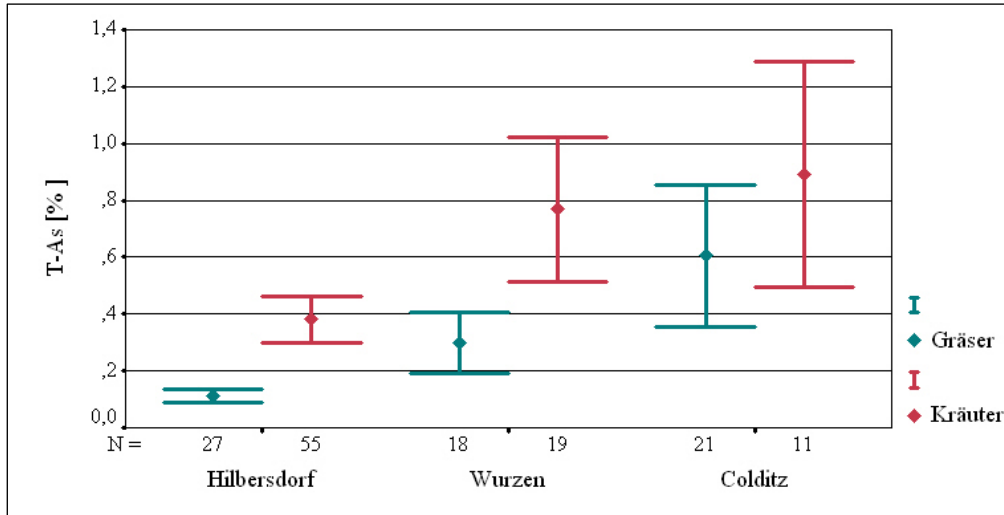


**Abbildung 6: Mittlerer As-Transfer im 1. Grünlandaufwuchs (gewaschen) in Abhängigkeit vom Standort bei Ausschluss der Extremwerte pro Standort (Fehlerbalken<sup>3</sup>)**

Wie die Abbildung zeigt, ist der Arsentransfer Boden→Grünland an den Auenstandorten Wurzen und Colditz signifikant höher als am Verwitterungsstandort Hilbersdorf.

<sup>3</sup> Fehlerbalken: hier einfaches Fehlerbalkendiagramm: Eine numerische Variable (hier T-As) wird innerhalb der Kategorien einer anderen Variablen (hier Standort) ausgewertet. Die Länge der einzelnen Balken stellt im Bericht stets die Konfidenzintervalle der Mittelwerte der Variablen dar, als Niveau wurde 95 Prozent gewählt. In gruppierten Fehlerbalkendiagrammen ist die Auswertung auch über mehrere Variablen oder über Kategorien einer Variablen (Abbildung 7 und Abbildung 11) möglich.

Am Standort Colditz ist der mittlere relative Transferfaktor für Arsen am größten, jedoch zeigt der T-Test, dass sich Wurzen und Colditz nicht signifikant voneinander unterscheiden. Stellt man denselben Zusammenhang getrennt nach Gräsern/Kräutern dar, erhält man das in Abbildung 7 aufgeführte Ergebnis.



**Abbildung 7: Arsentransfer Boden→1. Grünlandaufwuchs (gewaschen) in Abhängigkeit vom Standort, getrennt nach Kräutern und Gräsern**

Wie unter 3.2.1. anhand der As-Gesamtgehalte bereits dargestellt, zeigt sich auch bei den nach Standorten getrennten Transferfaktoren die deutlich höhere As-Belastung der Kräuter gegenüber den Gräsern. Auch ohne Differenzierung des Gras-/Krautanteils zeigt sich, dass der Arsentransfer Boden→Pflanze auf dem V-Standort Hilbersdorf deutlich niedriger ist als auf den AI-Standorten. Der mittlere As-Transfer Boden → Kräuter ist auf den Auenstandorten mit 0,8 Prozent in Wurzen und 0,9 Prozent in Colditz etwa doppelt so hoch wie in Hilbersdorf mit 0,4 Prozent. Der As-Transfer in Gräsern ist auf dem V-Standort ebenfalls am niedrigsten, jedoch unterscheiden sich hier auch die beiden AI-Standorte deutlicher voneinander.

Gründe für den erhöhten As-Transfer Boden → Grünland sind in einer stärkeren Bindung des Arsens (z. B. durch Sulfide) auf dem Verwitterungsstandort, beziehungsweise in einer stärkeren Mobilisierung des Arsens in den Auenböden aufgrund häufig wechselnder Redoxbedingungen zu sehen.

### 3.2.3 Einfluss kleinräumig variierender Boden- und Standorteigenschaften

Um den Einfluss der Summe der kleinräumig variierenden Boden- (pH-Wert, Humusgehalt, Feinbodenart, Bodenfeuchte) und Standorteigenschaften (Relief, Nähe zum Fluss etc.) auf den Arsentransfer Boden → Grünlandaufwuchs zu untersuchen, wurden die Schwankungen der relativen Transferfaktoren häufig vorkommender Pflanzenarten innerhalb der einzelnen Standorte betrachtet

(Tabelle 12). Hierzu wurden nur die Standorte Colditz und Hilbersdorf herangezogen; auf dem Standort Wurzen wurde nur eine Pflanzenart mit ausreichender Häufigkeit gefunden.

**Tabelle 12: Relative As-Transferfaktoren häufiger Pflanzenarten (gewaschene Proben, 1. Schnitt); Standorte Hilbersdorf und Colditz**

Pflanzenart	Colditz			Hilbersdorf		
	n	(T-As) [Prozent]	MAX/MIN (T-As)	n	(T-As) [Prozent]	MAX/MIN (T-As)
F	6	0,2-1,9	8	6	0,07-0,14	2
KG	5	0,2-1,9	9	5	0,04-0,17	5
Q	4	0,3-1,6	8	5	0,1-0,2	2
A	3	0,3-13,3	47	/	/	/
AS	/	/	/	6	0,1-2,2	23
K	/	/	/	8	0,2-0,8	6
L	/	/	/	10	0,1-0,6	4
MG	/	/	/	9	0,1-1,2	9
MV	/	/	/	7	0,1-0,7	5
R	/	/	/	10	0,04-0,3	8

Im Mittel schwankt die Arsenaufnahme einer Pflanzenart des gleichen Schnittes an einem Standort um einen Faktor von 8 (Median aus allen Werten MAX/MIN T-As).

Bei der Diskussion der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass neben den Boden- und Standortunterschieden auch nicht vermeidbare Unterschiede der einzelnen Probenahmepunkte eines Standortes bezüglich des Reifezustandes einer Pflanzenart<sup>4</sup> und des Bodenarsengehaltes die Variabilität des Arsentransferfaktors dieser Pflanzenart bedingen.

Gewächshausversuche, bei denen Unterschiede zwischen den Proben einer Pflanzenart bezüglich ihres Reifezustandes unter gleichen Wuchsbedingungen minimiert werden, können eindeutigere Aussagen bezüglich der Abhängigkeit des Arsentransfers von den einzelnen Bodeneigenschaften liefern. Kleinräumig variierende Standorteigenschaften (z. B. unterschiedliche Hanglage und damit Unterschiede in der Bodenfeuchte und der Intensität der Sonneneinstrahlung, unterschiedliche Redoxverhältnisse durch unterschiedliche Entfernung zum Fluss), wie sie im natürlichen Grünland häufig vorkommen, können jedoch nicht in ihrer Gesamtheit berücksichtigt werden.

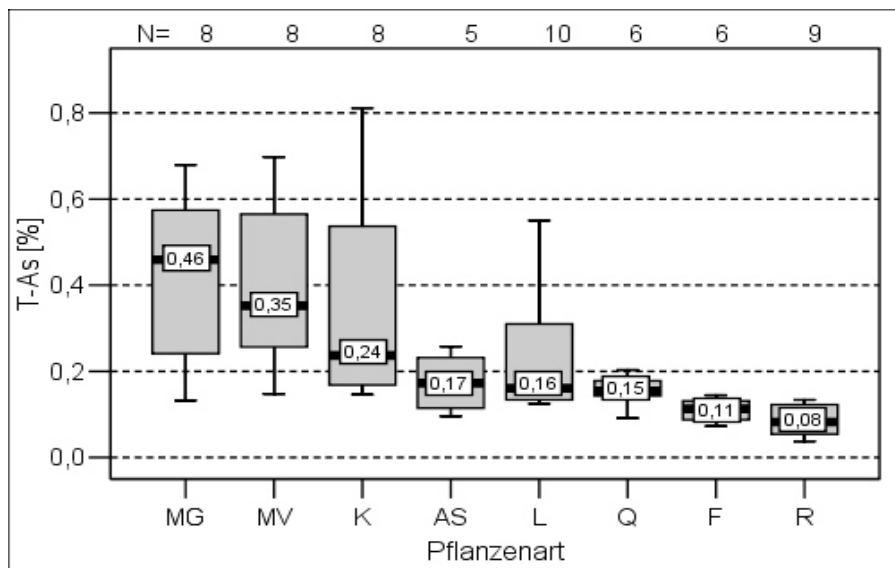
---

4 Bei der Feldprobenahme kann nicht sichergestellt werden, dass die Proben einer Pflanzenart von unterschiedlichen Probenahmepunkten eines Standortes und eines Schnittes absolut gleich sind hinsichtlich ihrer Wuchshöhe und des Anteils der einzelnen Pflanzenteile. Da sich die Arsengehalte, wie bereits unter 3.2.1. erwähnt, der einzelnen Teile einer Pflanze voneinander unterscheiden können, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Variabilität der Transferfaktoren einer Pflanzenart innerhalb eines Standortes nicht auch durch eben diese Unterschiede im Reifezustand bedingt ist.

### 3.2.4 Einfluss der Pflanzenart

Die Darstellung der Arsengesamtgehalte der Pflanzenartenproben und der relativen As-Transferfaktoren befindet sich in Anlage G. Bei allen Standorten zeigte sich, dass Unkräuter beziehungsweise im Grünlandbestand unerwünschte Arten wie stumpfblättriger Ampfer (AS), rote und weiße Taubnessel (T), Grasmiere (MG) und Vogelmiere (MV) häufig die höchsten Arsengehalte unter den Arten der jeweiligen Probenahmefläche aufweisen (Abbildung 8).

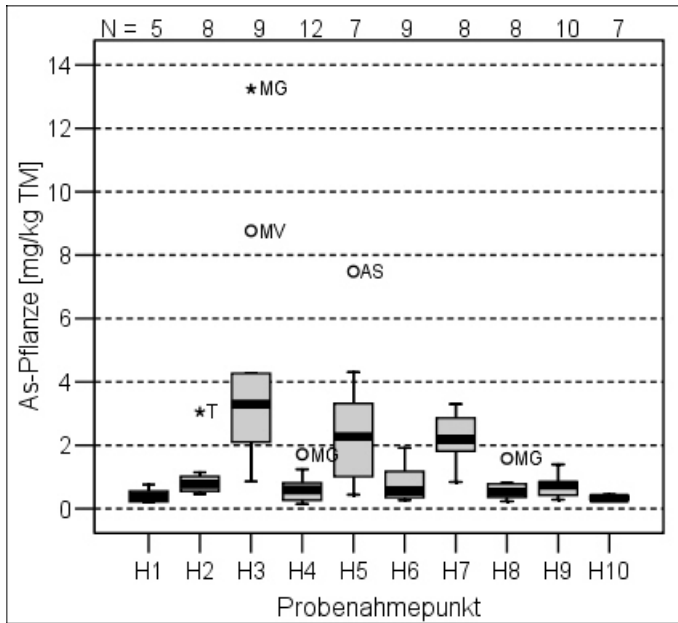
Aufgrund von Unterschieden der Standorte und der beprobten Flächen eines Standortes bezüglich der Vegetationszusammensetzung (Anlage E) und der daraus resultierenden unterschiedlichen Anzahl vorkommender Pflanzenarten, ist eine standortübergreifende Reihung der Pflanzenarten nach ihren relativen Transferfaktoren nicht möglich. Die Standorte können nur getrennt voneinander betrachtet werden. Abbildung 8 zeigt die Reihenfolge der häufigsten Pflanzenarten bezüglich ihrer relativen As-Transferfaktoren am Standort Hilbersdorf. Anlage H enthält die Mittelwerte der relativen As-Transferfaktoren aller Pflanzenarten pro Standort.



**Abbildung 8: Relative Arsentransferfaktoren häufiger Pflanzenarten; Standort Hilbersdorf, 1. Grünlandaufwuchs; Ausschluss der Extremwerte und Ausreißer (Box-Plot)**

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich, gibt es deutliche Unterschiede bezüglich des Arsentransfers zwischen den Pflanzenarten. So würde bei der Grasmiere mit einem relativen Transferfaktor von rund 0,5 Prozent der Futtermittelgrenzwert ab einem Bodengehalt von 400 mg As/ kg Boden überschritten werden, bei Rispengras erst ab einem Bodengehalt von 1 000 mg As/ kg Boden. Hier zeigt sich auch erneut der deutliche Unterschied zwischen Gräsern und Kräutern.

Noch deutlicher zeigen sich die unterschiedlichen As-Aufnahmeraten der Pflanzenarten, wenn die einzelnen Probenahme­flächen der drei Standorte getrennt betrachtet werden (Abbildung 9). Da­durch werden kleinräumige Unterschiede im pH-Wert und Humusgehalt des Bodens, Feinbodenan­teil und Arsengehalt ausgeglichen.



**Abbildung 9: Streuung der As-Pflanzengehalte auf den 10 Probenahmepunkten von Hilbersdorf (gewaschen, 1. Schnitt) (N = Anzahl der untersuchten Arten) (Box-Plot)**

In Tabelle 13 sind die minimalen und maximalen Arsengehalte der entnommenen Pflanzenarten pro Probenahme­fläche, der daraus berechnete Quotient MAX/MIN für den Standort Hilbersdorf und der zugehörige As-Bodengehalt aufgeführt. In Abhängigkeit von der Artenzusammensetzung treten mehr oder weniger große Streuungen der Arsengehalte der Pflanzenarten auf den einzelnen Probenahme­flächen auf. An den insgesamt 26 Punkten des 1. Schnittes unterscheiden sich die Arsengehalte der Arten untereinander im Mittel um das Fünffache und maximal um das 17-fache.

**Tabelle 13: Streuung der As-Gehalte der gewaschenen Pflanzenartenproben auf 10 Probenahme­flächen vom Standort Hilbersdorf, 1. Schnitt**

Kenngröße	Probenahme­fläche									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MIN As-PA [mg/kg TS]	0,19	0,47	0,85	0,14	0,44	0,27	0,84	0,23	0,28	0,25
MAX As-PA [mg/kg TS]	1,02	3,05	13,2	1,7	7,5	1,9	3,3	1,6	1,4	0,44
MAX/MIN	5	6	16	12	17	7	4	7	5	2
As-BA [mg/kg]	412	572	2254	393	334	243	271	282	300	250

#### Diskussion

Um den Landwirten Anbauempfehlungen zur Minderung der Arsenbelastung ihres Grünlandes liefern zu können, sind in Gewächshausversuchen ausgewählte Grünlandarten/-sorten (gern gefressene, hoher Futterwert) bezüglich ihrer Arsenaufnahme aus dem Boden zu untersuchen. Besonders sollten hier Kräuter-/Leguminosenarten getestet werden, weil diese aufgrund ihrer gegenüber Gräsern deutlich höheren Arsenaufnahme einen viel größeren Einfluss auf den Arsengesamtgehalt eines Grünlandaufwuchses nehmen. Weil der Arsentransfer, wie die Ergebnisse zeigten, aber auch sehr stark vom Standorttyp (siehe 3.2.2) und von den Bodeneigenschaften abhängig (siehe 3.2.3) ist, sollten die Versuche auf einem Auen- und einem Verwitterungsboden durchgeführt werden.

### **3.3 Anteile organischer und anorganischer Arsen-Formen am As-Gehalt von Grünlandpflanzen – Arsenspeziesbestimmung –**

Das Ergebnis der qualitativen und quantitativen Bestimmung der organischen und anorganischen Arsenspezies der 29 untersuchten Pflanzenarten des Grünlandes mittels HPLC-ICP-MS ist in Tabelle 14 zusammenfassend dargestellt. Anlage G enthält die detaillierten Ergebnisse für alle untersuchten Pflanzenproben.

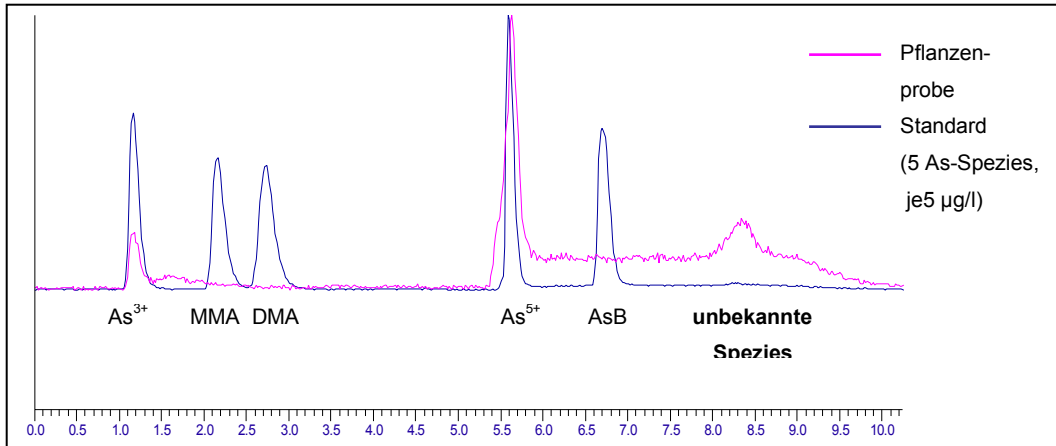
Der mittels der angewandten Extraktionsmethode extrahierbare Anteil am Arsengesamtgehalt der untersuchten Pflanzenarten (MW= 80Prozent) setzt sich zum größten Teil aus den anorganischen As-Formen  $As^{3+}$  und  $As^{5+}$  in unterschiedlichen Anteilen zusammen. Zusätzlich treten in 13 Prozent der Proben geringe Anteile an organischen Spezies (MMA und DMA) auf, Arsenobetain konnte nicht nachgewiesen werden.

**Tabelle 14: Arsenspeziespektrum der gewaschenen und ungewaschenen Pflanzenproben (n=264; 29 Pflanzenarten, alle Standorte)**

Kenngröße	Anteil der As-Spezies am extrahierbaren As-Gesamtgehalt der Pflanze				
	As3+	As5+	MMA	DMA	Σ MMA+DMA
im Mittel [Prozent]	36	63	0,2	0,2	0,4
minimal [Prozent]	0	2	0	0	0
maximal [Prozent]	98	100	6	10	10
Nachweisbar in X Proben	263	264	25	9	33

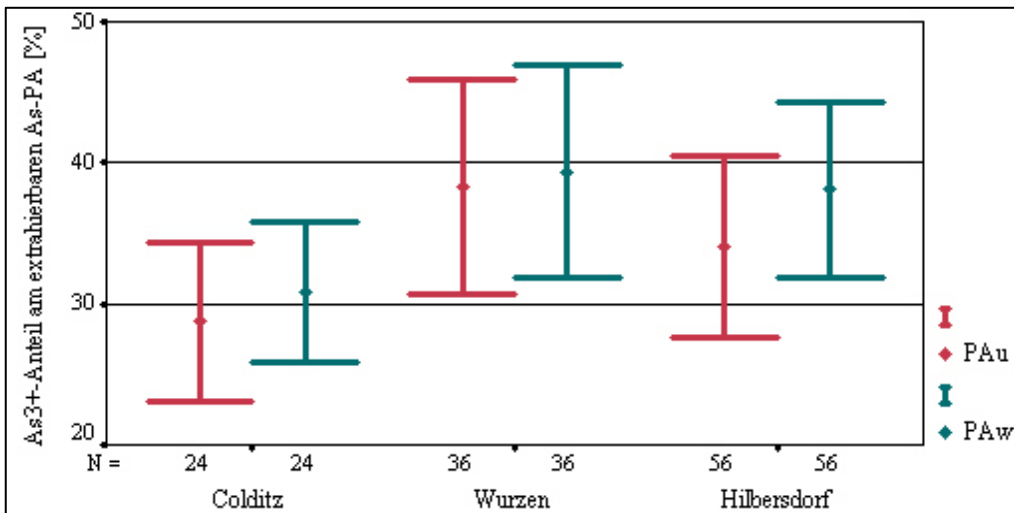
Die Konzentration der organischen Spezies in den Extrakten lag in den meisten Fällen unterhalb der Bestimmungsgrenze (Tabelle 7), d. h. sie konnten zwar nachgewiesen, jedoch nicht quantitativ sicher erfasst werden. Der Anteil der organischen Spezies (Summe MMA und DMA) am H<sub>2</sub>O-extrahierbaren As-Gehalt liegt bei maximal 10 Prozent, im Mittel bei unter 1 Prozent. In 10 Prozent der Proben zeigte sich im Chromatogramm neben den fünf untersuchten As-Spezies eine weitere unbekannte organische As-Spezies (Abbildung 10), deren Konzentration jedoch nicht quantifiziert werden konnte, weil die Messmethode speziell nur für die Determination der fünf genannten As-Formen entwickelt wurde und keine weiteren As-Formen als Standards vorhanden waren.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Versuche von LONDESBOROUGH ET AL. (1998) in FRESENIUS J ANAL CHEM (1999) zur Trennung von As-Spezies mittels HPLC-ICP-MS zeigen bei sehr ähnlichen chromatographischen Bedingungen (AG/AS7-Säulensystem von DIONEX; Eluent A: 0.4 mM HNO<sub>3</sub>, Eluent B: 50 mM HNO<sub>3</sub>, BDSS als Modifier) Peaks von AsC- (Arsenocholin) und TMAO- beziehungsweise TMAs-Standardlösungen an der gleichen Stelle (hinter dem Peak von AsB) im Chromatogramm wie die unbekannte Arsenspezies (Abbildung 10). Es handelt sich hier wie bei MMA und DMA um methylierte organische As-Verbindungen. Möglich ist jedoch auch, dass es sich bei diesem Peak um einen sogenannten Arsenozucker handelt, deren Existenz bisher nur in aquatischen Organismen publiziert wurde.



**Abbildung 10: Chromatogramm einer Pflanzenprobe (PA-1-C3-Bu) mit unbekannter As-Form im Speziesspektrum**

Um den Anteil der unbekanntes Spezies an der Summe aller As-Spezies im Extrakt abschätzen zu können, wurde die Summe der mittels HPLC bestimmten Gehalte der bekannten Spezies mit dem mittels ICP-MS gemessenen As-Gehalt im Extrakt verglichen. Weil die Abweichung zwischen beiden nur sehr gering ist (siehe Anlage G), kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der unbekanntes Spezies vernachlässigbar klein ist.



**Abbildung 11: As<sup>3+</sup>-Anteil am As-Extrakt von ungewaschenen (PA<sub>u</sub>) und gewaschenen Pflanzenproben (PA<sub>w</sub>)**

### Diskussion

Weil nur sehr geringe Anteile an mindertoxischen organischen Arsenformen in Pflanzen nachgewiesen konnten, ist eine Diskussion des Futtermittelgrenzwertes nach EG-Richtlinie 2002/32/EG nicht möglich.



Eine Abhängigkeit des Vorkommens organischer Spezies von der Pflanzenart ist nicht erkennbar. Pflanzenproben mit nachgewiesenen Anteilen an organischen As-Formen (MMA, DMA, unbekannte Spezies) stammen vorwiegend vom Standort Colditz. Diese organischen Arsenverbindungen können über Methylierung anorganischer Arsenformen in der Pflanze gebildet worden sein, wie NISSEN & BENSON (1982) bei Versuchen mit verschiedenen arsenexponierten Pflanzenarten feststellten. Möglich ist jedoch auch, dass es sich um Relikte früherer Ausbringung von Herbiziden handelt, die solche Arsenverbindungen enthielten.<sup>6</sup>

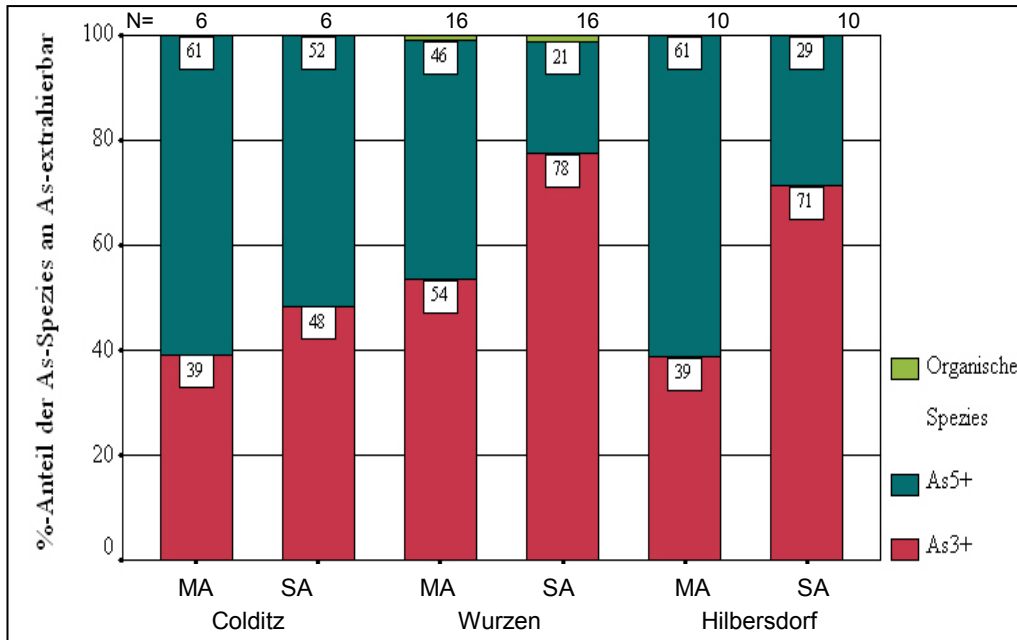
Zwischen den gewaschenen und ungewaschenen Proben zeigt sich weder ein bezüglich des Anteils anorganisch beziehungsweise organisch gebundenen Arsens noch bezüglich des Anteils an  $As^{3+}$  und  $As^{5+}$  (Abbildung 11) signifikanter Unterschied. Es wird also keine bestimmte As-Spezies primär über den Verschmutzungsanteil aufgenommen. Ungeklärt bleibt, in welcher Form der mittels der angewandten Extraktionsmethode nicht extrahierbare As-Anteil (im Mittel 20 Prozent) in den Grünlandpflanzen gebunden ist und weshalb die Extraktionsausbeuten, besonders am Standort Hilbersdorf, stark streuen.

#### **3.4 Einfluss der Silierung auf die Toxizität des Arsens im Grünfütter**

Das Ergebnis der vergleichenden Untersuchung der As-Speziesanteile von frischen und den dazugehörigen silierten Grünschnittproben ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Messergebnisse für die einzelnen Proben sind der Anlage I zu entnehmen. Zwischen frischer und siliertes Grünschnittprobe besteht bezüglich des Anteils der gering toxischen organischen Spezies am extrahierbaren As-Gehalt kein Unterschied, ihr Anteil wird während des Silierungsprozesses nicht erhöht.

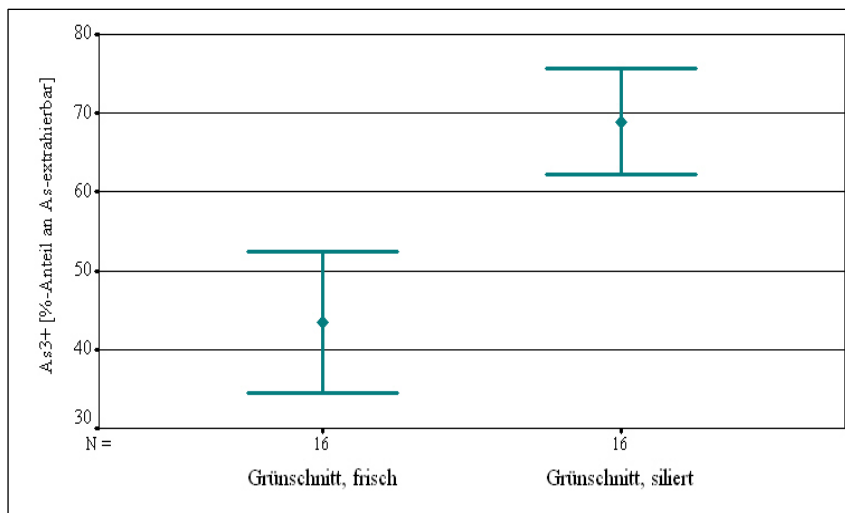
---

<sup>6</sup> Nach WOOLSON (1983) enthalten Herbizide beispielsweise die Arsenverbindungen Natriummethylarsonat und Natriumdimethylarsinat. Nach CULLEN & REIMER (1989) fanden Dimethylarsinsäure und vor allem Monosodiummethylarsonate weitverbreitete Verwendung als Herbizide.



**Abbildung 12: Arsenspeziespektrum frischer (MA) und silierter (SA) Grünschnittproben<sup>7</sup>**

Es fällt die Erhöhung des Anteils an As<sup>3+</sup> in der Silage (MW = 72 Prozent) gegenüber dem frischen Grünschnitt (MW = 42 Prozent) auf. Dieser Unterschied zwischen Silage und frischem Grünschnitt ist, wie die Überprüfung mittels T-Test zeigte, für die Gesamtheit der untersuchten Proben signifikant (Abbildung 13).



**Abbildung 13: Anteil von As<sup>3+</sup> in frischen und silierten Grünschnittproben<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> Probenpaare MA/SA (n=6), bei denen bei einer der Proben die Ausbeute der Extraktion der Arsenspezies mittels Wasser bei 120°C unter 70% lag oder der mittels ICP-MS gemessene Arsengehalt im Extrakt um mehr als 30 % von dem mittels HPLC-ICP-MS bestimmten abwich (n=1), wurden nicht berücksichtigt.

## Diskussion

Auf Grundlage der Ergebnisse ist keine Handlungsempfehlung für die Silierung ableitbar, weil der Anteil der mindertoxischen organischen Arsenspezies konstant bleibt.

Die Beantwortung der Frage, ob der erhöhte  $\text{As}^{3+}$ -Anteil in den Silagen gegenüber frischem Grünschnitt für die Fütterung von Bedeutung ist, bedarf noch der Klärung. Aus der Literatur ist bekannt, dass  $\text{As}^{3+}$  aufgrund seiner höheren Bioverfügbarkeit für den menschlichen Organismus zwei- bis zehnfach toxischer ist als  $\text{As}^{5+}$ . Ob sich beide Spezies jedoch auch in ihrer chronischen toxischen Wirkung für das Tier bei der Aufnahme mit dem Futter unterscheiden, ist noch ungeklärt. Ergebnisse des derzeit laufenden Projektes „Untersuchungen zum carry over von Arsenverbindungen in das Gewebe bzw. in die Milch von Rind und Schaf“ der LfL können zur Klärung des Toxizitätsunterschiedes zwischen mit frischem Grünschnitt und mit siliertem Futter aufgenommenem Arsen für das Tier beitragen.

## **4 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Ableitung von Handlungsempfehlungen**

Der Einfluss der Pflanzenart auf den Arsentransfer wird aufgrund der Untersuchungsergebnisse als hoch eingeschätzt. Die As-Gesamtgehalte zwischen den Arten eines Probenahmepunktes können sich um einen Faktor von 17 unterscheiden. Der mittlere Faktor zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert der As-Gehalte der Pflanzenarten einer der insgesamt 26 Probenahmepunkte des 1. Schnittes liegt bei 5 (Median aller Punkte). Dabei besteht insbesondere ein bedeutender Unterschied zwischen Gras- und Kräuterarten; Kräuter reichern im Mittel dreimal so viel Arsen an wie Gräser.

Der Einfluss kleinräumig variierender Bodeneigenschaften und Standortfaktoren wird als hoch eingeschätzt. So variieren die Transferfaktoren der Probenahmepunkte eines Standortes bis zu einem Faktor von 16 (Hilbersdorf), wobei die Variation auf den Verwitterungsstandorten erheblich höher ist als auf den Auenstandorten (Faktor von 5). Der verschmutzungsbedingte Anteil des Arsengesamtgehaltes der untersuchten Grünlandpflanzen beträgt bis zu 74 Prozent, im Mittel liegt er bei 16 Prozent.

Die Untersuchung eines breiten Spektrums von Grünlandpflanzenarten (insgesamt 29) bezüglich ihres Gehaltes an organischen und anorganischen Arsenspezies brachte bei 20 Prozent der insgesamt 264 Proben einen Anteil von maximal 10 Prozent an organischen Spezies (MMA und DMA, unbekannte organische Spezies) am extrahierbaren As-Gehalt. Dabei konnte keine Abhängigkeit des Vorkommens organischer Spezies vom Standort und von der Pflanzenart festgestellt werden. Der an der Pflanze anhaftende Schmutz erhöht nicht den Gehalt organischer Spezies in der Pflanze.

Eine Diskussion des bestehenden Futtermittelgrenzwertes ist auf der Basis der Arsenspezieszusammensetzung von Grünlandpflanzen nicht führbar, weil im Mittel 99 Prozent des extrahierbaren As-Gehaltes aus den sehr toxischen Spezies  $\text{As}^{3+}$  und  $\text{As}^{5+}$  zusammengesetzt sind und nur 1 Prozent aus mindertoxischen organischen Verbindungen.

Die vergleichende Untersuchung der Arsenspeziespektren frischer und silierter Grünschnittpflanzen zeigt, dass Silierung nicht zur Verminderung des Anteils toxischer anorganischer Arsenformen am Arsengesamtgehalt von Grünschnitt führt. Für den Umgang mit As-belasteten Flächen und die Konzeption von weiteren Untersuchungen werden die folgenden Schritte empfohlen.

- Grünlandpflanzenarten unterscheiden sich bezüglich ihrer Arsenaufnahme aus dem Boden deutlich. Dikotyle Pflanzen nehmen, wie die Untersuchungen zeigten, deutlich mehr Arsen auf als monokotyle und beeinflussen die Arsenbelastung des Grünlandbestandes daher auch viel stärker. Es wird eine Reduktion des Kräuteranteils im Grünlandbestand empfohlen. Zur Empfehlung von Arten mit geringer Arsenaufnahme sollten Arten- und Sortenversuche unter definierten Bedingungen im Gewächshaus hinsichtlich ihres Arsen-Transfers durchgeführt werden. Dabei sind vor allem bestandsbildende Dikotyle zu berücksichtigen.

Es zeigte sich, dass der Arsen-Transfer Boden → Pflanze für Unkräuter und unerwünschte Kräuterarten des Grünlandes besonders hoch ist. Dies ist neben der Unverträglichkeit und dem geringen Futterwert ein weiterer Grund zu Grünlandpflegemaßnahmen, die eine Verringerung dieser Arten zum Ziel haben.

- Zurzeit gibt es keinen Lebensmittelgrenzwert für Arsen, er ist nach Informationen des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz jedoch in Vorbereitung. Mit Einführung eines Lebensmittelgrenzwertes im Ergebnis der vorgesehenen Harmonisierung von Futter- und Lebensmittelrecht in Höhe des früheren Richtwertes der Zentralen Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien (ZEBS) von 0,2 mg/kg FM wären in Sachsen auch bei der Nahrungsmittelproduktion Grenzwertüberschreitungen zu erwarten.<sup>9</sup> Durch die Prüfung der Arten- und Sortenabhängigkeit der Arsenaufnahme auch bei Getreide und der Empfehlung von Arten mit geringer Arsenaufnahme kann die Einhaltung des Lebensmittelgrenzwertes unterstützt werden.

---

<sup>9</sup> So zeigten Untersuchungen an Winterweizen im Pilotprojekt „Vereinigte Mulde“ bei As-Bodengehalten 12 bis 212 mg/kg in 21% der Fälle Arsengehalte von > 0,2 mg/kg FM im Korn. Die Arsengehalte im Boden auf den Ackerflächen im Projektgebiet reichten jedoch insgesamt bis zu 540 mg/kg.

- Die Untersuchungen bestätigten das Ergebnis des Pilotprojektes „Auenböden der Vereinigten Mulde“, indem ein Großteil der Arsenbelastung des Grünlandes durch anhaftende Verschmutzung bedingt ist. Verschmutzungsmindernde Maßnahmen, wie z. B. die Vermeidung lückenhafter Pflanzenbestände oder die Erhöhung der Schnitthöhe werden empfohlen. Weitere Maßnahmen sind dem Informationsblatt der LfL (KLOSE 2006) zu entnehmen.
- Aus der Fachliteratur ist bekannt, dass Phosphor und Arsen aufgrund ihres ähnlichen chemischen Charakters bei der Aufnahme über die Wurzel konkurrieren. Die Nutzbarkeit dieser Konkurrenz für die Verringerung des Arsentransfers Boden → Nutzpflanze durch P-Düngung sollte geprüft werden. Hinzukommend zum Aspekt der guten Praktikierbarkeit dieser Maßnahme würde gleichzeitig die fortwährende P-Unterversorgung, die von 1997 bis 2004 nahezu konstant blieb und 2004 noch auf 35 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Sachsen herrschte (LFL, 2004), vermindert werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- (1) BARONI, F., BOSCALI, A., DI LELLA, L.A., PROTANO, G., RICCOBONO, F., (2003): Arsenic in soil and vegetation of contaminated areas in southern Tuscany (Italy). - *Journal of Geochemical Exploration* 81 (2004), S.1-14.
- (2) BECH, J., POSCHENRIEDER, C., LIUNGANY, M., BERCELÓ, J., TUME, P., TOBIAS, F.J., BARRANZUELA, J.L., VASQUEZ, E.R. (1997): Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru.- *The Science of the Total Environment* 203, S. 83-91.
- (3) CULLEN, W.R., REIMER, K.J. (1989): Arsenic Speciation in the Environment: *Chem. Rev.* 89, 713-764
- (4) DE KOE, T., ROZEMA, J., BROEKMAN, R.A., OTTE, M.L., ERNST, W.H.O. (1988): Heavy Metals and Arsenic in Water, sediment and plants nears the Jales gold and silver mine in Portugal. – in: BECH et al. (1997)
- (5) DONOHUE, J.M., ABERNATHY, C.O. (1999): Exposure to inorganic arsenic from fish and shellfish. In: *Arsenic Exposure and Health Effects* (Chappell, W. R., Abernathy, C. O. & Calderon, R. L., eds.), pp. 89–98. Elsevier, Amsterdam.
- (6) HÄBLER, S. (2002): Geochemie von Böden und deren Wechselwirkung mit Pflanzen im südlichen Eisernen Viereck, Brasilien. - Diplomarbeit, TU – Bergakademie Freiberg.
- (7) JACKSON, C.R. ET AL. (2003) : Microbial transformations of arsenite and arsenate in natural environments. *Resent Research Developments in icrobiology* 7, S. 103-118.
- (8) KAISE, T., FUKUI, S. (1992): The chemical form and acute toxicity of arsenic compounds in marine organisms. *Appl. Organomet. Chem.* 6, S.155-160.
- (9) KOHLMAYER, U., KUBALLA, J., JANTZEN, E. (2002): *Rapid Comm. Mass Spectrom.* 16, 965
- (10) KLOKE, A. (Hrsg.) (1994): KREYSA, G.; WIESNER, J.: Beurteilung von Schwermetallen in Böden und Ballungsgebieten: Arsen, Blei, Cadmium. – Internationale Expertenbeiträge und Resümee der DECHEMA -Arbeitsgruppe „Bewertung von Gefährdungspotentialen im Bodenschutz. –DECHEMA. – Frankfurt/ Main.
- (11) KLOSE, R. (2006): Hinweise und Empfehlungen zum Umgang mit arsen- und schwermetallbelasteten landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. – Informationsblatt der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- (12) LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER (Hrsg.) (2001): Top Silagen für Top Milchleistungen. - *Praxisinformation Grünland und Futterwirtschaft*, Heft 30.
- (13) MOMPLAISIR, G.M.; ROSAL, HEITHMAR, E.M. (2001): Arsenic Speciation Methods for Studying the Environmental Fate of Organoarsenic Animal-Feed-Additives. U.S. EPA, NERL -Las Vegas (TIM No. 01-11)
- (14) NISSEN, P., BENSON, A.A. (1982): Arsenic metabolism in freshwater and terrestrial plants. - *Physiologia Plantarum* 54: 446-450.

- (15) OBLASSER, A. (2001): Untersuchungen des Einflusses von Gruben- und Haldensickerwässern auf Boden und Pflanzen im Gebiet Oruro / Bolivien. - Diplomarbeit, TU – Bergakademie Freiberg.
- (16) SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (1995): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen, Teil 1: Spurenelementgehalte in Gesteinen
- (17) SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2000a): Bodenatlas, Teil 3: Bodenmessprogramm. Bodenraster 4 km x 4 km.
- (18) SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2000b): Karte Natürliche Standorteinheiten. -Stand 09/2000.
- (19) SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.): Bodenatlas Freistaat Sachsen, Teil 1: Hintergrundwerte für Schwermetalle und Arsen in landwirtschaftlich genutzten Böden.
- (20) SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT; SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2004): Landwirtschaftliche und Gärtnerische Nutzung auf schadstoffbelasteten Flächen im Freistaat Sachsen – Pilotprojekt Auenböden der Vereinigten Mulde, Abschlußbericht
- (21) SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2004): Die Entwicklung der Nährstoff- und Kalkversorgung der landwirtschaftlich genutzten Böden im Freistaat Sachsen und in den Bereichen der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft in den Jahren 1997 bis 2004
- (22) SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- (23) SCHMIDT, A.-C.; REISSER, W., MATTUSCH, J., POPP, P., WENNRICH, R. (2000): -Evaluation of extraction procedures for the ion chromatographic determination of arsenic species in plant materials.- Journal of Chrom. A. 889 (2000), S. 83-91
- (24) SHIOMI, K. (1994): Arsenic in marine organisms: chemical forms and toxicological aspects in Arsenic in the Environment; Part II: Human Health and Ecosystem Effects; Nriagu J.O.; Ed., John Wiley and Sons, Inc., S.261-282.
- (25) TERÄSAHDE, P., PANTSAR-KALLIO, M., MANNINEN, P.K.G. (1996): Simultaneous determination of arsenic species by ion chromatography – inductively coupled plasma mass spectrometry - J. Chromatography A 1996, 750, S. 83-88.
- (26) WOOLSON, E.A. (1983): Emissions, Cycling and effects of Arsenic in Soil Ecosystems in: FOWLER, B.A. (Ed.) (1984): "Biological and Environmental effects of Arsenic". -Elsevier. - S. 51.

**Anlage A: Standortdaten**

<b>Standortdaten</b>	<b>Colditz</b>	<b>Wurzen</b>	<b>Hilbersdorf</b>
<b>Natürliche Standorteinheit<sup>a</sup></b>	Diluvialstandort, D1, 2, 3 Sandböden	Alluvialstandort, AI3 Lehmböden und lehmige Sandböden	Verwitterungsstandort, V6, 7 lehmige, z. T. staunasse Sandböden
<b>Geologischer Untergrund<sup>b</sup></b>	Saure Vulkanite des Oberkarbon-Perm/ Auenterrassen des Quartär	Auenterrassen des Quartär	Paragneis des Präkambrium und ältere Granite des Oberkarbon-Perm
<b>As im Gestein<sup>b</sup></b>	3,0	20 mg/kg	(5,0)
<b>Bodentyp<sup>c</sup></b>	Parabraunerde aus Fluvisand, untergeordneter Schmelzwassersand, lokal von Flugsand überlagert	Vega, Gley und Augley aus Fluvisand, -lehm, Schluff oder Sand über Fluvigeröll	Braunerde-Podsol aus Hanglehm über mäßig basenreichem metamorphen oder magmatischen Gestein
<b>As-Anomalie durch<sup>c</sup></b>	Eintrag über die das Erzgebirge entwässernden Flüsse Zwickauer und Freiburger Mulde		unmittelbare Nähe zu stillgelegter Verhüttungsanlage
			stark arsenführende Mineralisationen

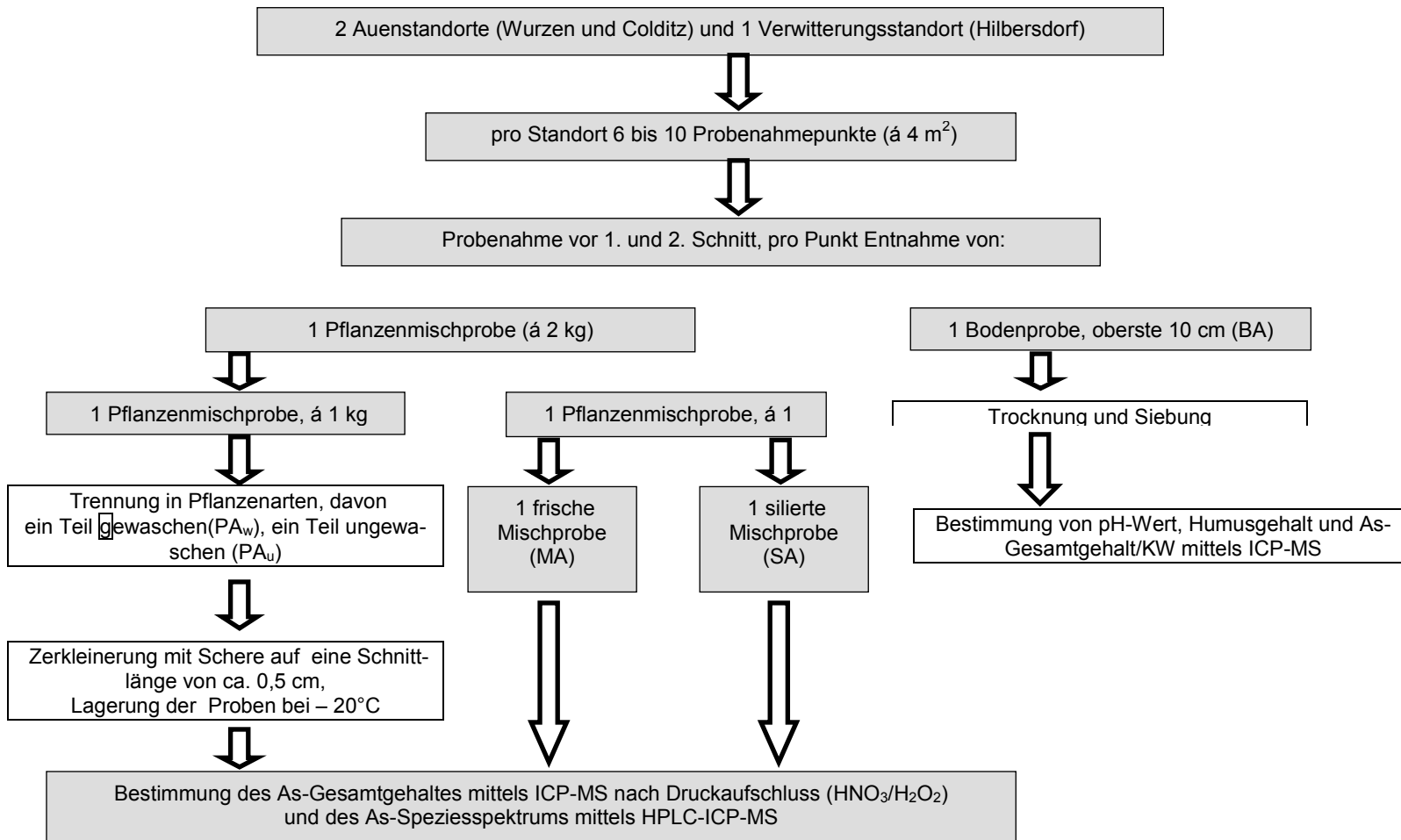
<sup>a</sup> [LfUG, 2000b]

<sup>b</sup> [LfUG, 1995]

<sup>c</sup> [LfUG, 2000]



**Anlage B: Vorgehensweise bei der Probenahme und -aufbereitung**



Anlage C:        Untersuchte Pflanzenarten

Pflanzenart		Code	Gras(1) Kraut (2)	Vorkommen		
deutscher Name	systematischer Name			Colditz	Wurzen	Hilbersdorf
Ampfer, ~ Sauer	Rúmex acetósa	A	2	x	x	
Ampfer, ~ Stumpflättriger	Rúmex obtusifólius	AS	2		x	x
Bärenklau	Herácleum spondýlium	B	2	x	x	x
Eisenkraut	Verbena officinális	E	2			x
Glatthafer	Arrhenátherum elátius	G	1		x	
Glockenblume, Wiesen~	Campanula patula	GW	2			x
Kriechender Hahnenfuß	Ranúnculus répens	KH	2	x	x	x
Hirtentäschel	Capsella bursa-pastoris	H	2			x
Honiggras, Wolliges~	Hólcus lanátus	HW	1			x
Klee (Weiß~ und Rot~)	Trifólium (répens)	K	(2)			x
Knautgras (Knäuelgras)	Dáctylis glomeráta	KG	x	x	x	x
Löwenzahn, Gemeiner ~	Taráxacum officinále	L	2	x	x	x
Löwenzahn, Herbst~	Leóntodon autumnális	LH	2			x
Miere, Gras~	Stellária graminéa	MG	2			x
Miere, Vogel~	Stellária media	MV	2		x	x
Quecke, Gemeine ~	Agropýron répens	Q	1	x	x	x
Rispengras (Wiesen~ und	Póa (praténsis und trivalis)	R	1	x	x	x
Rohrglanzgras	Phálaris arundinácea	RG	1		x	
Rohrschwengel	Festúca arundinácea	RS	1		x	
Schafgarbe	Achilléa millefólium	S	2	x	x	
Taubnessel	Lámium (purpuréum	T	2	x	x	x
Weidelgras, Welsches~	Lólium multiflórum	WW	1			x
Wiesenfuchsschwanz	Alopecúrus praténsis	F	1	x	x	x
Wiesenkerbel	Anthriscus silvéstris	WK	2		x	x
Wiesenlabkraut	Gálium álbum ssp. álbum	WL	2		x	
Wiesenschaumkraut	Cardámine praténsis	SK	2			x
Wiesenschwengel	Festúca praténsis	WS	1	x		x
Wegerich, Breit~	Plantágo májor	WB	2			x
Wegerich, Spitz~	Plantágo lanceoláta	W	2			x

\* Diese Arten wurden jeweils zur übergeordneten Gattung zusammengefasst (z.B. Póa praténsis und Póa trivalis = Gattung Póa), da man die Arten im nicht blühenden Zustand (z.B. Lámium purpuréum und álbum) bzw. bei der Art der Probenahme (nach Abmähung mit der Sense Blätter, Stengel und Blüten, bzw. Ähren teilweise getrennt) (z.B. Póa praténsis und ~ trivalis) nicht fehlerfrei voneinander separieren konnte.

**Anlage D: Qualitätskontrolle As-Spezies-Extraktion**

Tabelle D1: Überprüfung der Stabilität des As-Speziespools während der mikrowellen-gestützten Extraktion von As aus Pflanzenmaterial (T= 120°C, t = 12 min, Extraktions-mittel: Wasser), Mittelwert von Doppelbestimmung

Probe	Anteil der einzelnen As-Spezies an der Summe aller Spezies [Prozent]				
	As <sup>3+</sup>	MMA	DMA	As <sup>5+</sup>	AsB
St5 <sup>a</sup>	19,6	20,2	20,3	19,9	20,1
St5 (extrahiert) <sup>b</sup>	18,4	19,7	20,3	19,9	20,3
Wiederfindungsrate St5 [Prozent]	94	98	100	100	101
Pflanzenmatrix+ St50 nach Extraktion <sup>c</sup>	16,2	13,7	14,4	38,8	16,8
Pflanzenmatrix+ St50 (extrahiert) <sup>d</sup>	19,1	14,0	12,6	40,3	13,9
Wiederfindungsrate St 50 [Prozent]	118	102	88	104	83

- <sup>a</sup> wässriger Standard aus As<sup>3+</sup>, As<sup>5+</sup>, MMA, DMA und AsB, je 5 µg/l
- <sup>b</sup> wie a, aber mit Wasser bei 120°C in Mikrowelle erhitzt
- <sup>c</sup> 3 g Pflanzenprobe mit 27 ml bidestilliertem Wasser extrahiert, nach Extraktion Zugabe von 3 ml St50 (je 50 mg/l der 5 As-Spezies enthaltend)
- <sup>d</sup> 3 g Pflanzenprobe mit 27 ml bidestilliertem Wasser + 3 ml St50 extrahiert

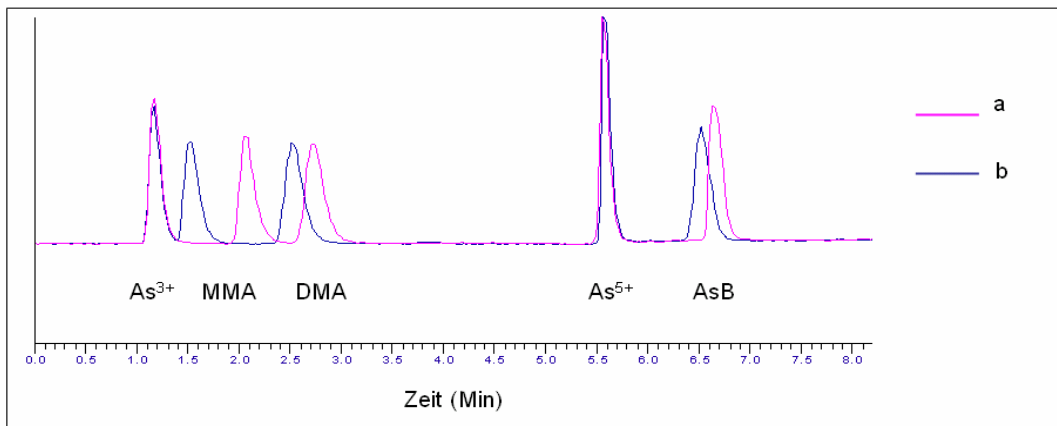
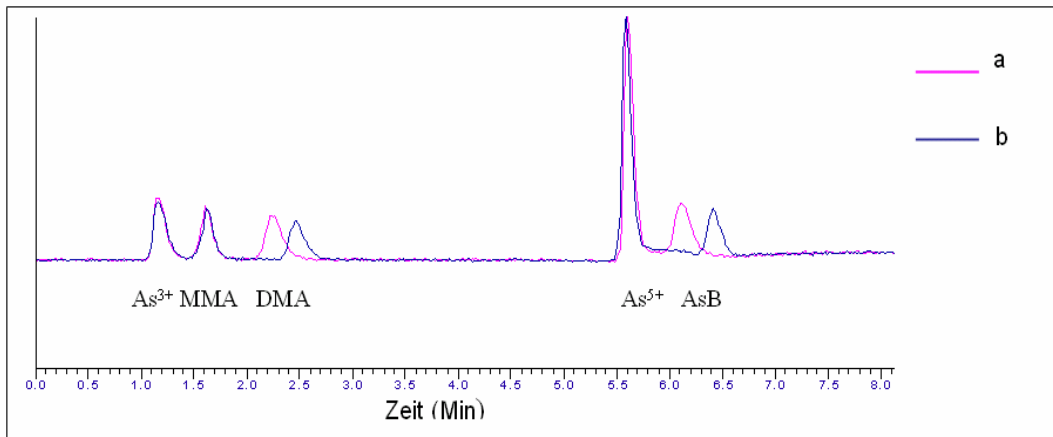


Abbildung D1: Vergleich der Chromatogramme eines As-Standards (5 As-Spezies, je 5 µg/l) 12 min bei 120°C in der Mikrowelle erhitzt; a = nach Erhitzen bei 120°C; b = ohne Erhitzen



**Abbildung D2:** Vergleich der Chromatogramme eines Pflanzenextraktes (Luzerne, As = 0,15 mg/kg) mit Zusatz von As-Standard (5 Spezies, je 5mg/l) vor (a) und nach der Extraktion (b)



Tabelle E3: Vorkommen von Pflanzenarten, Standort Hilbersdorf, 1. Schnitt

Punkt	Anteil Gräser [Pro- zent]	Pflanzenart																		
		A	AS	B	E	F	H	K	KG	KH	L	MG	MV	Q	R	SK	T	WB	WK	WS
H1	20						x	x	x		x		x		x					
H2	70		x					x			x	x	x		x		x			x
H3	75			x				x	x		x	x	x	x	x				x	
H4	75	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x		x			
H5	80		x			x					x	x	x		x		x			
H6	80		x			x		x	x		x	x	x		x				x	
H7	50			x	x			x		x	x	x		x	x				x	
H8	65		x			x		x			x	x	x	x	x			x		
H9	85		x			x		x		x	x	x	x	x	x	x				
H10	85				x	x			x	x	x	x		x	x	x		x		

**Anlage F: As-Gehalte im Oberboden und im Grünlandaufwuchs, Messgrößen der Oberböden**

Standort/ Punkt	Schnitt	pH-Wert BA	Humus- gehalt BA [Prozent]	As-BA (KW) [mg/kg]	Cd-BA (KW) mg/kg	Pb-BA (KW) mg/kg	As-MA [mg/kg 88Prozent TM]	T-As [Pro- zent]
C1	1	5,5	5,7	29	6,2	122	0,67	2,3
C2	1	5,7	4,9	36	2,4	97	0,24	0,7
C3	1	5,3	5,3	31	3,7	100	0,15	0,5
C4	1	5,4	5,2	52	3,6	112	0,25	0,5
C5	1	5,7	6,8	78	5,2	158	1,11	1,4
C6	1	5,8	6,9	63	6,6	154	0,93	1,5
W1	1	5,5	10,3	276	12,4	713	1,38	0,5
W2	1	5,1	8,0	362	9,4	938	0,58	0,2
W3	1	5,5	9,1	167	17,9	438	0,31	0,2
W4	1	5,4	9,1	187	15,8	431	0,68	0,4
W5	1	5,2	10,4	230	16,4	498	0,49	0,2
W6	1	5,2	8,8	275	10,2	648	0,64	0,2
W7	1	4,8	11,2	307	12,2	675	0,28	0,1
W8	1	5,3	9,1	173	17,0	371	0,52	0,3
W9	1	5,3	9,9	217	3,1	234	0,77	0,4
W10	1	5,0	3,7	235	13,8	391	1,44	0,6
H1	1	5,5	5,4	412	7,1	1289	0,61	0,1
H2	1	6,2	4,8	572	6,0	1410	0,86	0,1
H3	1	4,8	6,5	2254*	6,2	4426	4,99	0,2
H4	1	5,1	6,6	393	4,3	1383	0,51	0,1
H5	1	5,7	9,6	334	3,2	1474	8,27	2,7
H6	1	4,6	5,7	243	4,9	1521	1,42	0,6
H7	1	4,2	6,6	271	3,0	1674	9,58	3,3
H8	1	5,0	6,9	282	4,5	1614	0,81	0,3
H9	1	4,6	5,3	300	5,2	2162	1,69	0,6
H10	1	5,2	10,0	250	8,3	1815	0,59	0,2
W1	2	5,2	8,8	389	10,5	/	0,50	0,1
W2	2	5,1	7,7	450	10,5	/	9,13*	2,0
W6	2	4,9	6,8	352	8,2	/	3,08	0,9
W7	2	4,9	9,4	356	12,7	/	0,54	0,2
W8	2	5,1	6,4	337	10,4	/	1,30	0,4
W9	2	5,1	7,2	368	9,8	/	3,65	1,0
W10	2	5,1	8,3	285	9,4	/	1,41	0,5

Standort/ Punkt	Schnitt	pH-Wert BA	Humus- gehalt BA [Prozent]	As-BA (KW) [mg/kg]	Cd-BA (KW) mg/kg	Pb-BA (KW) mg/kg	As-MA [mg/kg 88Prozent TM]	T-As [Pro- zent]
H3	2	5,2	7,6	786*	6,7	/	2,59	0,3
H4	2	5,1	6,3	397	2,3	/	0,48	0,1
H5	2	5,7	5,0	291	5,0	/	1,95	0,7
H6	2	4,8	4,1	224	5,2	/	0,79	0,4
H7	2	4,9	4,5	347	5,0	/	1,64	0,5
H8	2	4,6	7,0	285	5,4	/	0,90	0,3
H9	2	5,1	5,0	282	4,3	/	0,93	0,3
H10	2	5,1	6,8	251	5,1	/	0,57	0,2

\* Extremwerte As-BA (Arsengehalt Boden) innerhalb der Reihe BA-1-H bzw. BA-2-H

\* Extremwert As-MA (Arsengehalt Grünschnitt) innerhalb der Reihe MA-2-W



**Anlage G: Arsengehalte und Arsenspeziesanteile der untersuchten Pflanzenarten (PA-Proben, 1. Schnitt)**

(Werte in Klammern: Konzentration des Analyten < Bestimmungsgrenze; x= As-Spezies vorhanden, aber nicht quantifizierbar, weil kein Standard verfügbar)

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
C1-A <sub>u</sub>	2	4,0	3,5	11	89	/	/	/	5,8	68	61	20,1
C1-A <sub>w</sub>	2	1,1	0,9	21	79	/	/	/	3,9	28	22	13,3
C1-F <sub>u</sub>	1	0,3	0,2	17	83	/	/	/	0,6	53	39	1,9
C1-F <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	24	76	/	/	/	0,5	39	38	1,8
C1-Q <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,6	/	/	2,1
C1-Q <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,5	/	/	1,6
C1-R <sub>u</sub>	1	0,4	0,3	19	81	/	/	/	0,5	82	75	1,6
C1-R <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	19	81	/	/	/	0,4	65	58	1,2
C1-KG <sub>u</sub>	1	0,4	0,4	15	85	/	/	/	0,5	81	84	1,6
C1-KG <sub>w</sub>	1	0,4	0,4	20	80	/	/	/	0,5	75	76	1,9
C2-KG <sub>u</sub>	1	0,2	0,1	19	81	/	/	/	0,1	139	130	0,3
C2-KG <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	30	70	/	/	/	0,1	169	160	0,2
C2-F <sub>u</sub>	1	0,1	0,1	27	73	/	/	/	0,1	128	131	0,3
C2-F <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	39	61	/	/	/	0,1	111	114	0,2
C2-L <sub>u</sub>	2	0,2	0,2	20	76	(4)	/	/	0,2	112	124	0,5
C2-L <sub>w</sub>	2	0,1	0,3	27	69	(3)	/	/	0,2	91	163	0,4
C2-A <sub>u</sub>	2	0,3	0,4	8	92	/	/	/	0,4	82	90	1,1
C2-A <sub>w</sub>	2	0,2	0,2	11	89	/	/	/	0,3	57	53	1,0
C2-S <sub>u</sub>	2	0,2	0,3	36	64	/	/	/	0,3	71	72	1,0
C2-S <sub>w</sub>	2	0,2	0,2	37	63	/	/	/	0,4	62	66	1,0
C3-F <sub>u</sub>	1	0,1	0,1	33	58	/	/	x	0,1	91	131	0,3
C3-F <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	41	48	/	/	x	0,1	60	93	0,4
C3-B <sub>u</sub>	2	0,1	0,2	10	68	(4)	/	x	0,3	39	67	0,9
C3-B <sub>w</sub>	2	0,1	0,2	11	74	/	/	x	0,1	86	112	0,4
C3-A <sub>u</sub>	2	0,1	0,1	17	83	/	/	/	0,1	87	109	0,4
C3-A <sub>w</sub>	2	0,1	0,1	17	81	/	/	x	0,1	158	141	0,3
C3-WS <sub>u</sub>	1	0,1	0,1	48	40	(5)	/	x	0,1	84	114	0,2
C3-WS <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	51	39	(3)	/	x	0,1	82	114	0,2
C4-L <sub>u</sub>	2	0,3	0,3	31	65	(1)	/	x	0,5	60	63	0,9

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
C4-L <sub>w</sub>	2	0,3	0,3	30	64	(3)	/	x	0,3	83	82	0,6
C4-KG <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	28	62	/	/	x	0,2	79	105	0,4
C4-KG <sub>w</sub>	1	0,1	0,2	31	61	/	/	x	0,2	59	78	0,4
C4-Q <sub>u</sub>	1	0,1	0,1	49	43	(2)	/	x	0,2	60	74	0,4
C4-Q <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	41	52	/	/	x	0,2	76	63	0,3
C4-R <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,1	/	/	0,3
C4-R <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,1	/	/	0,2
C4-F <sub>u</sub>	1	0,1	(0,07)	44	46	(3)	/	x	0,1	50	52	0,3
C4-F <sub>w</sub>	1	0,1	(0,07)	44	46	(2)	/	x	0,1	74	64	0,2
C4-WS <sub>u</sub>	1	0,1	(0,08)	39	52	/	/	x	0,1	86	82	0,2
C4-WS <sub>w</sub>	1	0,1	(0,07)	36	56	(2)	/	x	0,1	89	69	0,2
C5-T <sub>u</sub>	2	0,4	0,3	17	83	/	/	/	1,1	35	29	1,4
C5-T <sub>w</sub>	2	0,4	0,4	28	72	/	/	/	1,4	29	26	1,8
C5-KG <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,2	/	/	0,3
C5-KG <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	39	57	/	/	x	0,3	50	49	0,4
C5-WS <sub>u</sub>	1	0,3	0,3	46	52	/	/	x	0,4	64	71	0,5
C5-WS <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	42	55	/	/	x	0,4	51	50	0,6
C5-Q <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	30	68	/	/	x	0,3	60	56	0,4
C5-Q <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,3	/	/	0,4
C5-F <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	32	65	(1)	/	x	0,4	59	55	0,5
C5-F <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	32	66	/	/	x	0,3	53	53	0,4
C6-KG <sub>u</sub>	1	0,1	0,1	33	63	/	/	x	0,2	73	81	0,2
C6-KG <sub>w</sub>	1	0,1	0,1	23	74	/	/	x	0,1	105	99	0,2
C6-Q <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,3	/	/	0,5
C6-Q <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	38	62	/	/	/	0,3	59	56	0,4
C6-KH <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,6	/	/	0,9
C6-T <sub>u</sub>	2	0,4	0,4	25	73	(1)	/	x	1,4	28	26	2,3
C6-T <sub>w</sub>	2	0,4	0,5	29	71	/	/	/	1,3	30	37	2,1
C6-B <sub>u</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,2	/	/	0,5
C6-B <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,3	/	/	0,4
C6-WS <sub>u</sub>	1	0,3	0,3	41	59	/	/	/	0,6	56	54	0,9
C6-WS <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,4	/	/	0,7
C6-F <sub>u</sub>	1	0,3	0,2	35	63	/	/	x	0,5	49	41	0,8
C6-F <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,2	/	/	0,4

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
C6-L <sub>u</sub>	2	0,5	0,4	26	73	(1)	/	/	0,8	64	54	1,2
C6-L <sub>w</sub>	2	0,3	0,3	26	73	(1)	/	/	0,6	58	45	0,9
W1-Q <sub>u</sub>	1	0,4	0,4	35	65	/	/	/	0,5	109	94	0,2
W1-Q <sub>w</sub>	1	0,8	0,1	47	53	/	/	/	0,4	153	/	0,1
W1-F <sub>u</sub>	1	0,6	0,2	48	52	/	/	/	0,6	99	/	0,2
W1-F <sub>w</sub>	1	0,5	0,1	55	45	/	/	/	0,5	108	/	0,2
W1-B <sub>u</sub>	2	1,6	2,0	50	50	/	/	/	1,7	94	115	0,6
W1-B <sub>w</sub>	2	0,8	0,2	40	60	/	/	/	1,7	81	/	0,6
W2-A <sub>u</sub>	2	4,9	6,1	93	7	/	/	/	4,3	114	144	1,2
W2-A <sub>w</sub>	2	2,0	1,9	92	8	/	/	/	2,3	86	80	0,6
W2-AS <sub>u</sub>	2	5,6	7,6	84	16	/	/	/	5,9	96	129	1,6
W2-AS <sub>w</sub>	2	2,8	3,7	89	11	/	/	/	3,6	77	101	1,0
W2-MV <sub>u</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	7,3	/	/	2,0
W2-S <sub>u</sub>	2	4,0	/	21	79	/	/	/	10,6	38	/	2,9
W2-S <sub>w</sub>	2	3,1	/	15	84	(1)	/	/	3,4	91	/	0,9
W2-F <sub>u</sub>	1	1,1	/	15	85	/	/	/	1,4	79	/	0,4
W2-F <sub>w</sub>	1	1,8	2,4	17	83	/	/	/	2,0	90	119	0,6
W3-RG <sub>u</sub>	1	1,2	/	17	83	/	/	/	1,3	98	/	0,8
W3-RG <sub>w</sub>	1	0,9	1,3	18	82	/	/	/	1,3	73	100	0,8
W3-F <sub>u</sub>	1	1,4	1,9	17	83	/	/	/	2,2	66	90	1,3
W3-F <sub>w</sub>	1	0,9	1,3	19	81	/	/	/	1,2	76	106	0,7
W4-Q <sub>u</sub>	1	0,8	1,1	28	72	/	/	/	1,2	68	94	0,6
W4-Q <sub>w</sub>	1	0,4	0,6	32	68	/	/	/	0,6	76	111	0,3
W4-F <sub>u</sub>	1	0,7	0,9	32	68	/	/	/	1,0	66	88	0,5
W4-F <sub>w</sub>	1	0,5	0,6	33	67	/	/	/	0,5	88	118	0,3
W4-MV <sub>u</sub>	2	7,9	10,0	18	82	/	/	/	9,9	80	101	5,3
W4-MV <sub>w</sub>	2	2,0	2,5	16	84	/	/	/	2,6	78	98	1,4
W5-F <sub>u</sub>	1	1,1	1,4	29	71	/	/	/	0,8	96	126	0,3
W5-F <sub>w</sub>	1	0,8	1,0	28	72	/	/	/	0,8	94	120	0,4
W5-Q <sub>u</sub>	1	0,9	1,4	38	62	/	/	/	1,3	73	108	0,6
W5-Q <sub>w</sub>	1	0,7	1,0	45	55	/	/	/	1,0	73	101	0,4
W5-T <sub>u</sub>	2	4,0	4,2	27	73	/	/	/	4,6	87	92	2,0
W5-T <sub>w</sub>	2	2,7	2,8	30	70	/	/	/	4,1	65	70	1,8
W5-MV <sub>u</sub>	2	4,8	5,5	6	94	/	/	/	4,7	101	115	2,1

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
W5-MV <sub>w</sub>	2	3,2	3,3	6	94	/	/	/	3,1	105	108	1,3
W5-WL <sub>u</sub>	2	2,0	2,3	12	88	/	/	/	2,6	77	89	1,1
W5-WL <sub>w</sub>	2	1,2	1,2	15	85	/	/	/	1,4	89	83	0,6
W5-KH <sub>u</sub>	2	3,5	3,6	20	80	/	/	/	3,4	102	105	1,5
W5-KH <sub>w</sub>	2	1,9	2,0	14	86	/	/	/	2,3	83	86	1,0
W5-A <sub>u</sub>	2	4,0	4,8	68	32	/	/	/	5,6	73	85	2,4
W5-A <sub>w</sub>	2	3,2	3,8	75	25	/	/	/	3,8	85	101	1,6
W5-L <sub>u</sub>	2	1,9	2,7	51	49	/	/	/	2,6	71	103	1,1
W5-L <sub>w</sub>	2	2,2	3,9	81	19	/	/	/	3,0	75	132	1,3
W6-F <sub>u</sub>	1	0,6	0,9	66	34	/	/	/	0,7	82	125	0,2
W6-F <sub>w</sub>	1	0,5	0,6	46	54	/	/	/	0,6	85	104	0,2
W6-WL <sub>u</sub>	2	3,0	/	65	35	/	/	/	3,0	99	/	1,1
W6-WL <sub>w</sub>	2	1,7	/	47	53	/	/	/	1,6	110	/	0,6
W6-R <sub>u</sub>	1	0,9	1,1	59	41	/	/	/	0,9	99	128	0,3
W6-R <sub>w</sub>	1	0,8	1,1	47	53	/	/	/	0,7	112	153	0,3
W6-L <sub>u</sub>	2	3,6	4,3	11	89	/	/	/	3,3	108	128	1,2
W6-L <sub>w</sub>	2	1,5	1,7	64	36	/	/	/	1,3	115	135	0,5
W7-G <sub>u</sub>	1	0,1	0,1	65	35	/	/	/	0,1	100	116	0,04
W7-G <sub>w</sub>	1	0,2	0,1	42	58	/	/	/	0,1	132	132	0,04
W7-F <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	47	53	/	/	/	0,2	114	116	0,1
W7-F <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	48	52	/	/	/	0,2	130	118	0,1
W7-WK <sub>u</sub>	2	0,3	0,5	69	31	/	/	/	0,5	68	92	0,2
W7-WK <sub>w</sub>	2	0,3	0,4	69	31	/	/	/	0,5	70	81	0,1
W8-T <sub>u</sub>	2	2,1	2,7	71	29	/	/	/	2,0	104	132	0,9
W8-T <sub>w</sub>	2	2,3	2,5	52	45	/	(2)	/	2,3	100	109	1,0
W8-F <sub>u</sub>	1	0,4	0,4	30	70	/	/	/	0,5	69	78	0,2
W8-F <sub>w</sub>	1	0,3	0,3	27	69	/	4	/	0,3	98	110	0,1
W9-F <sub>u</sub>	1	0,3	/	35	65	/	(10)	/	0,4	74	/	0,2
W9-F <sub>w</sub>	1	0,2	0,3	35	60	/	5	/	0,2	90	113	0,1
W9-R <sub>w</sub>	1	0,2	0,3	46	49	/	4	/	0,3	87	115	0,2
W9-L <sub>u</sub>	2	0,5	0,6	26	69	/	5	/	0,7	69	86	0,4
W9-L <sub>w</sub>	2	0,4	0,5	30	64	/	6	/	0,6	58	73	0,4
W9-A <sub>u</sub>	2	0,5	0,4	21	79	/	/	/	0,5	120	87	0,3
W9-A <sub>w</sub>	2	0,7	0,6	9	91	/	/	/	0,4	101	89	0,2

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
		W9-MV <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/		/	/	
W10-KG <sub>u</sub>	1	0,4	0,4	16	84	/	/	/	0,4	90	82	0,2
W10-KG <sub>w</sub>	1	0,8	0,9	16	84	/	/	/	0,6	122	137	0,3
W10-F <sub>u</sub>	1	0,4	0,3	15	85	/	/	/	0,3	109	106	0,1
W10-F <sub>w</sub>	1	0,4	0,3	17	83	/	/	/	0,3	110	84	0,2
W10-WK <sub>u</sub>	2	0,5	0,5	34	66	/	/	/	0,7	63	68	0,3
W10-WK <sub>w</sub>	2	0,4	0,5	46	54	/	/	/	0,7	62	70	0,3
W10-AS <sub>u</sub>	2	0,2	0,2	37	63	/	/	/	0,3	71	87	0,1
W10-AS <sub>w</sub>	2	0,3	0,4	34	66	/	/	/	0,3	119	153	0,1
H1-KG <sub>u</sub>	1	0,1	0,2	84	16	/	/	/	0,2	64	99	0,04
H1-KG <sub>w</sub>	1	0,1	0,2	64	36	/	/	/	0,2	72	97	0,05
H1-L <sub>u</sub>	2	0,3	0,4	61	39	/	/	/	0,5	68	77	0,12
H1-L <sub>w</sub>	2	0,5	0,5	56	37	/	7	/	0,6	85	85	0,13
H1-R <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	62	38	/	/	/	0,2	79	83	0,06
H1-R <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	68	32	/	/	/	0,2	88	96	0,05
H1-MV <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	1,0	/	/	0,25
H1-H <sub>w</sub>	2	0,3	0,3	66	34	/	/	/	0,4	93	88	0,09
H1-K <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,7	/	/	0,18
H2-WS <sub>u</sub>	1	0,6	0,6	48	52	/	/	/	0,9	71	71	0,15
H2-WS <sub>w</sub>	1	0,6	0,6	64	36	/	/	/	0,6	106	112	0,10
H2-AS <sub>u</sub>	2	0,7	0,6	32	68	/	/	/	0,8	86	80	0,13
H2-AS <sub>w</sub>	2	/	0,5	/	/	/	/	/	0,5	/	94	0,10
H2-L <sub>u</sub>	2	0,5	0,9	44	56	/	/	/	0,7	82	134	0,12
H2-L <sub>w</sub>	2	0,9	0,7	42	58	/	/	/	0,7	125	92	0,12
H2-MV <sub>u</sub>	2	1,9	1,6	19	81	/	/	/	2,3	82	70	0,40
H2-MV <sub>w</sub>	2	1,3	0,9	28	72	/	/	/	0,8	149	104	0,15
H2-MG <sub>w</sub>	2	1,0	0,6	15	85	/	/	/	1,1	83	55	0,20
H2-K <sub>u</sub>	2	1,4	1,0	30	70	/	/	/	1,1	125	95	0,19
H2-K <sub>w</sub>	2	1,2	1,1	43	50	/	6	/	0,9	135	120	0,16
H2-R <sub>u</sub>	1	0,6	0,4	35	65	/	/	/	0,4	148	82	0,08

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
H2-R <sub>w</sub>	1	0,6	0,3	33	67	/	/	/	0,5	125	70	0,08
H2-T <sub>w</sub>	2	3,1	3,3	61	39	/	/	/	3,1	102	107	0,53
H3-Q <sub>u</sub>	1	0,7	1,1	44	56	/	/	/	2,4	27	46	0,11
H3-Q <sub>w</sub>	1	1,7	2,0	44	56	/	/	/	2,1	84	96	0,09
H3-KG <sub>u</sub>	1	0,5	0,4	26	74	/	/	/	1,1	48	37	0,05
H3-KG <sub>w</sub>	1	2,2	1,1	22	75	(3)	/	/	2,1	103	51	0,09
H3-R <sub>u</sub>	1	0,7	0,5	47	53	/	/	/	1,1	66	44	0,05
H3-R <sub>w</sub>	1	0,6	0,4	53	47	/	/	/	0,8	67	43	0,04
H3-B <sub>u</sub>	2	6,7	5,6	10	90	/	/	/	10,7	63	53	0,47
H3-B <sub>w</sub>	2	3,2	3,4	12	88	/	/	/	4,3	74	79	0,19
H3-MV <sub>u</sub>	2	8,0	8,6	14	86	/	/	/	8,2	97	105	0,36
H3-MV <sub>w</sub>	2	2,7	1,8	16	84	/	/	/	8,8	31	21	0,39
H3-MG <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	13,2	/	/	0,59
H3-L <sub>u</sub>	2	2,2	2,4	28	72	/	/	/	3,9	57	61	0,17
H3-L <sub>w</sub>	2	2,0	1,3	54	46	/	/	/	3,0	67	43	0,13
H3-K <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	3,3	/	/	0,15
H3-WK <sub>u</sub>	2	/	/	40	60	/	/	/	4,9	/	/	0,22
H3-WK <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	3,7	/	/	0,17
H4-H <sub>w</sub>	2	0,1	0,1	56	(44)	/	/	/	0,2	50	50	0,06
H4-K <sub>w</sub>	2	0,4	0,3	38	62	/	/	/	0,8	48	40	0,21
H4-R <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,3	/	/	0,07
H4-R <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,2	/	/	0,04
H4-A <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,6	/	/	0,15
H4-MG <sub>u</sub>	2	0,6	0,6	/	/	/	/	/	1,5	42	40	0,39
H4-MG <sub>w</sub>	2	0,8	0,7	/	/	/	/	/	1,7	47	40	0,44
H4-MV <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	1,2	/	/	0,32
H4-L <sub>u</sub>	2	0,4	0,1	19	81	/	/	/	0,5	68	26	0,14
H4-L <sub>w</sub>	2	0,4	0,3	34	66	/	/	/	0,6	70	55	0,15
H4-Q <sub>u</sub>	1	0,6	0,5	53	47	/	/	/	0,8	69	61	0,21
H4-Q <sub>w</sub>	1	0,5	0,4	53	47	/	/	/	0,6	78	59	0,15
H4-T <sub>u</sub>	2	0,9	0,7	28	72	/	/	/	1,3	68	53	0,34
H4-T <sub>w</sub>	2	0,8	0,7	55	45	/	/	/	0,8	94	83	0,20
H4-F <sub>u</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,1	/	/	0,03
H4-F <sub>w</sub>	1	0,3	0,2	26	74	/	/	/	0,3	98	55	0,07

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
H4-KG <sub>u</sub>	1	0,2	0,1	26	74	/	/	/	0,1	153	95	0,04
H4-KG <sub>w</sub>	1	0,3	0,1	26	74	/	/	/	0,1	188	83	0,04
H4-AS <sub>u</sub>	2	0,5	0,3	15	85	/	/	/	0,5	108	64	0,13
H4-AS <sub>w</sub>	2	0,4	0,2	19	81	/	/	/	0,5	96	47	0,11
H5-F <sub>u</sub>	1	0,5	0,3	29	71	/	/	/	0,9	54	34	0,27
H5-F <sub>w</sub>	1	0,4	0,2	39	61	/	/	/	0,4	99	57	0,13
H5-R <sub>u</sub>	1	0,5	0,3	37	63	/	/	/	0,5	105	73	0,14
H5-R <sub>w</sub>	1	0,4	0,3	40	60	/	/	/	0,4	103	62	0,13
H5-MG <sub>u</sub>	2	3,6	3,4	3	97	/	/	/	4,1	88	82	1,23
H5-MG <sub>w</sub>	2	1,6	1,4	7	93	/	/	/	2,3	71	61	0,68
H5-MV <sub>u</sub>	2	3,2	3,0	4	96	/	/	/	2,7	120	111	0,80
H5-MV <sub>w</sub>	2	1,6	1,4	15	85	/	/	/	2,3	68	60	0,70
H5-T <sub>u</sub>	2	6,9	7,0	73	27	/	/	/	8,2	84	86	2,45
H5-T <sub>w</sub>	2	2,9	2,9	64	36	/	/	/	4,3	67	67	1,29
H5-L <sub>u</sub>	2	4,8	4,9	9	91	/	/	/	3,0	159	160	0,91
H5-L <sub>w</sub>	2	1,3	1,2	26	74	/	/	/	1,6	81	77	0,47
H5-AS <sub>u</sub>	2	4,6	4,1	6	94	/	/	/	7,5	62	54	2,24
H5-AS <sub>w</sub>	2	6,1	5,9	6	94	/	/	/	7,5	81	78	2,24
H6-L <sub>u</sub>	2	0,7	0,5	21	79	/	/	/	0,9	79	59	0,35
H6-L <sub>w</sub>	2	0,5	0,4	36	64	/	/	/	0,8	71	51	0,31
H6-WK <sub>u</sub>	2	0,6	0,4	11	89	/	/	/	1,0	55	40	0,42
H6-WK <sub>w</sub>	2	0,6	0,3	23	77	/	/	/	0,5	114	64	0,21
H6-AS <sub>u</sub>	2	1,7	1,3	9	91	/	/	/	1,2	143	108	0,49
H6-AS <sub>w</sub>	2	0,2	0,4	3	97	/	/	/	0,6	41	63	0,23
H6-MG <sub>u</sub>	2	0,9	0,9	/	100	/	/	/	1,3	67	67	0,53
H6-MG <sub>w</sub>	2	0,7	0,7	4	96	/	/	/	1,2	63	60	0,48
H6-F <sub>u</sub>	1	0,2	0,3	37	63	/	/	/	0,4	58	69	0,15
H6-F <sub>w</sub>	1	0,4	0,4	36	64	/	/	/	0,4	113	103	0,14
H6-KG <sub>u</sub>	1	0,3	0,3	45	55	/	/	/	0,4	80	80	0,16
H6-KG <sub>w</sub>	1	0,3	0,3	36	64	/	/	/	0,3	119	105	0,11
H6-K <sub>w</sub>	2	2,1	2,1	31	69	/	/	/	1,9	110	108	0,79
H6-R <sub>w</sub>	1	0,3	0,3	40	60	/	/	/	0,3	91	85	0,13
H6-MV <sub>w</sub>	2	1,2	1,1	14	86	/	/	/	1,6	75	71	0,66
H7-B <sub>u</sub>	2	1,8	1,4	6	94	/	/	/	5,9	30	24	2,17

Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
H7-B <sub>w</sub>	2	0,2	/	/	/	/	/	/	2,1	/	/	0,79
H7-L <sub>u</sub>	2	1,3	1,1	8	92	/	/	/	2,4	56	44	0,88
H7-L <sub>w</sub>	2	0,9	0,8	12	86	2	/	/	1,5	64	51	0,55
H7-KH <sub>u</sub>	2	2,7	2,3	6	94	/	/	/	3,2	84	71	1,17
H7-KH <sub>w</sub>	2	1,2	1,0	8	92	/	/	/	2,5	50	42	0,90
H7-E <sub>u</sub>	2	2,1	1,8	8	92	/	/	/	3,3	64	55	1,22
H7-E <sub>w</sub>	2	1,8	1,5	12	88	/	/	/	3,3	56	46	1,22
H7-K <sub>u</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	2,5	/	/	0,91
H7-K <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	2,2	/	/	0,81
H7-MG <sub>u</sub>	2	2,0	1,7	4	96	/	/	/	5,3	38	31	1,94
H7-MG <sub>w</sub>	2	1,5	1,2	7	93	/	/	/	3,3	45	37	1,21
H7-WK <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	2,2	/	/	0,80
H7-R <sub>u</sub>	1	0,4	0,3	21	79	/	/	/	0,7	56	42	0,26
H7-R <sub>w</sub>	1	0,4	0,3	19	81	/	/	/	0,8	48	37	0,31
H7-Q <sub>w</sub>	1	0,5	0,5	29	71	/	/	/	0,9	57	48	0,35
H8-K <sub>u</sub>	2	0,7	1,2	95	(5)	/	/	/	1,2	62	102	0,41
H8-K <sub>w</sub>	2	0,6	0,9	78	22	/	/	/	0,8	79	114	0,29
H8-AS <sub>u</sub>	2	0,4	0,6	87	13	/	/	/	0,5	74	117	0,18
H8-AS <sub>w</sub>	2	0,4	0,6	66	34	/	/	/	0,5	85	114	0,17
H8-L <sub>u</sub>	2	0,7	1,0	77	23	/	/	/	0,9	79	108	0,33
H8-L <sub>w</sub>	2	0,3	0,7	98	(2)	/	/	/	0,5	68	156	0,17
H8-F <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	54	46	/	/	/	0,3	76	85	0,10
H8-F <sub>w</sub>	1	0,2	0,3	69	(31)	/	/	/	0,2	88	142	0,09
H8-R <sub>u</sub>	1	0,2	0,3	45	55	/	/	/	0,5	46	54	0,16
H8-R <sub>w</sub>	1	0,1	0,2	75	25	/	/	/	0,2	64	76	0,08
H8-Q <sub>w</sub>	1	0,3	0,3	54	46	/	/	/	0,6	44	47	0,20
H8-WB <sub>u</sub>	2	0,3	0,3	36	64	/	/	/	/	/	/	/
H8-WB <sub>w</sub>	2	0,2	0,2	36	64	/	/	/	/	/	/	/
H8-MG <sub>u</sub>	2	0,5	0,5	7	93	/	/	/	1,0	51	49	0,34
H8-MG <sub>w</sub>	2	0,5	0,5	0	100	/	/	/	1,6	34	35	0,56
H8-MV <sub>u</sub>	2	1,0	1,1	16	84	/	/	/	1,7	55	63	0,62
H8-MV <sub>w</sub>	2	0,4	0,4	25	75	/	/	/	0,7	59	56	0,26
H9-KH <sub>u</sub>	2	1,0	1,0	29	71	/	/	/	2,3	42	41	0,78
H9-KH <sub>w</sub>	2	0,9	0,8	26	74	/	/	/	1,4	64	59	0,46



Probenbezeichnung PA-1-	Gras (1) oder Kraut (2)	As-Extrakt [mg/kg TM]		Anteil der As-Spezies an As-Extrakt [Prozent]					As_HNO <sub>3</sub> [mg/kg TM]	EA (Anteil As- Extrakt an As-HNO <sub>3</sub> ) [Prozent]		T-As [Prozent]
		HPLC (Σ Spezies)	ICP	As <sup>3+</sup>	As <sup>5+</sup>	MMA	DMA	unbekannte Spezies		HPLC	ICP	
		H9-F <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	36	64	/		/	/	
H9-F <sub>w</sub>	1	0,3	0,2	36	64	/	/	/	0,4	67	65	0,13
H9-L <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,7	/	/	0,24
H9-AS <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,8	/	/	0,26
H9-K <sub>u</sub>	2	0,6	0,6	65	35	/	/	/	0,9	62	61	0,30
H9-K <sub>w</sub>	2	0,6	0,6	68	32	/	/	/	0,8	74	71	0,26
H9-Q <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,4	/	/	0,14
H9-MG <sub>u</sub>	2	0,4	0,4	13	87	/	/	/	0,8	56	51	0,25
H9-MG <sub>w</sub>	2	0,5	0,5	12	88	/	/	/	0,8	56	54	0,28
H9-R <sub>w</sub>	1	/	/	/	/	/	/	/	0,3	/	/	0,09
H9-SK <sub>w</sub>	2	/	/	/	/	/	/	/	0,4	/	/	0,14
H9-MV <sub>w</sub>	2	0,4	0,6	1	99	/	/	/	1,4	32	45	0,47
H10-F <sub>u</sub>	1	0,2	0,2	56	(42)	(2)	/	/	0,2	79	87	0,10
H10-F <sub>w</sub>	1	0,2	0,2	53	(44)	(2)	/	/	0,2	77	77	0,10
H10-Q <sub>u</sub>	1	0,5	0,4	70	29	(1)	/	/	0,5	98	83	0,19
H10-Q <sub>w</sub>	1	0,4	0,4	68	31	(1)	/	/	0,4	81	88	0,18
H10-R <sub>u</sub>	1	0,3	0,3	62	38	/	/	/	0,5	71	70	0,18
H10-R <sub>w</sub>	1	0,3	0,2	69	31	/	/	/	0,3	109	81	0,12
H10-MG <sub>u</sub>	2	0,3	0,3	24	76	/	/	/	0,4	66	76	0,17
H10-MG <sub>w</sub>	2	0,3	0,3	25	75	/	/	/	0,3	76	90	0,13
H10-L <sub>u</sub>	2	0,2	0,3	42	58	/	/	/	0,3	70	77	0,14
H10-L <sub>w</sub>	2	0,3	0,3	42	58	/	/	/	0,4	75	74	0,14
H10-KG <sub>u</sub>	1	0,2	0,3	48	52	/	/	/	0,2	113	128	0,09
H10-KG <sub>w</sub>	1	0,3	0,3	0	100	/	/	/	0,4	60	69	0,17
H10-SK <sub>u</sub>	2	0,3	0,3	49	50	(1)	/	/	0,3	97	105	0,11
H10-SK <sub>w</sub>	2	0,2	0,2	49	46	(5)	/	/	0,3	79	84	0,11
H10-WB <sub>w</sub>	2	0,3	0,3	56	44	/	/	/	/	/	/	/
H10-E <sub>w</sub>	2	0,5	0,5	58	42	(1)	/	/	/	/	/	/

**Anlage H: Relative As-Transferfaktoren der Pflanzenproben**

Tabelle H: Mittelwerte und Standardabweichungen der relativen Transferfaktoren sowie die zugrunde liegende Probenanzahl (n) der gewaschenen Pflanzenproben (PA) der drei Untersuchungsstandorte, 1. Schnitt

Standort	Pflanzenart	n	MW T-As [Prozent]	SD T-As [Prozent]
Colditz	A	3	4,8	6,0
	T	2	1,9	0,1
	S	1	1,0	/
	KH	1	0,9	/
	R	2	0,7	0,5
	Q	4	0,7	0,5
	L	3	0,7	0,2
	F	6	0,6	0,6
	KG	5	0,6	0,6
	WS	4	0,4	0,2
Wurzen	B	2	0,4	0,03
	T	2	1,4	0,4
	KH	1	1,0	/
	MV	3	1,0	0,5
	A	3	0,8	0,6
	RG	1	0,8	/
	L	3	0,7	0,4
	B	1	0,6	/
	WL	2	0,6	0,01
	AS	2	0,6	0,4
	Q	3	0,3	0,1
	KG	1	0,3	/
	F	10	0,3	0,2
	WK	2	0,2	0,1
R	2	0,2	0,1	
Hilbersdorf	G	1	0,04	/
	E	1	1,2	/
	KH	2	0,7	0,2
	T	3	0,7	0,5
	AS	6	0,5	0,8
	MG	9	0,5	0,3
	B	2	0,5	0,3
	MV	7	0,4	0,2
	WK	3	0,4	0,3
	K	8	0,4	0,3
	L	10	0,2	0,1
	Q	5	0,2	0,04
	A	1	0,2	/
	SK	2	0,1	0,02
	F	6	0,1	0,03
	R	10	0,1	0,1
	WS	1	0,1	/
KG	5	0,1	0,05	
H	2	0,1	0,01	

Anlage I:           Arsenspeziesanteile frischer (MA) und silierter Grünlandproben (SA)<sup>1</sup>

Standort/ Punkt	Probenart 1=MA; 2=SA	As <sup>3+</sup> [Pro- zent]	As <sup>5+</sup> [Pro- zent]	Organische Spe- zies (MMA + DMA) [Prozent]	unbekannte Spezies
C1*	1	32	68		
	2	55	45		
C2	1	34	66		
	2	58	42		
C3	1	48	(52)		
	2	47	53		
C4	1	36	64		
	2	40	60		
W2	1	35	65		x
	2	72	28		
W4	1	35	64	(1)	
	2	69	31		
W5	1	30	70		x
	2	82	(18)		x
W6	1	30	70		
	2	76	24		
W7	1	65	35		
	2	74	(26)		
W8	1	53	47		
	2	65	35		
W9	1	37	63		
	2	71	29		
W10	1	24	76		
	2	60	40		

Standort/ Punkt	Probenart 1=MA; 2=SA	As <sup>3+</sup> [Prozent]	As <sup>5+</sup> [Prozent]	Organische Spezies (MMA + DMA) [Prozent]	unbekannte Spezies
H1	1	86	(14)		
	2	84	16		
H2*	1	52	45	(3)	
	2	97	(3)		
H3	1	39	61		
	2	94	6		
H4	1	45	55		
	2	84	16		
H5*	1	15	85		
	2	76	23	2	
H6	1	28	72		
	2	65	28	6	
H7*	1	66	31	(3)	
	2	92	8		
H8	1	45	55		
	2	67	33		
H9*	1	32	68		
	2	75	25		
H10	1	60	34	(5)	x
	2	81	19		

<sup>1</sup> Die Silagen SA-1-C6 und C6 sowie SA-1-W1 und-W3 wiesen Fäulniserscheinungen auf. Daher wurden für diese sowie die dazugehörigen frischen Grünschnittproben MA keine Arsenspeziesanalyse durchgeführt. SA- oder MA-Probe wies EA < 70Prozent auf oder Abweichung zwischen As<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (ICP) und As<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (ICP) > 30Prozent, diese Probenpaare SA/MA wurden bei der Auswertung (siehe Abbildung 12 und 13) nicht berücksichtigt.

## **Impressum**

- Herausgeber:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft  
August-Böckstiegel-Straße 1, 01326 Dresden  
Internet: [www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen)
- Autoren:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft  
Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen  
Gustav-Kühn-Str. 8, 04159 Leipzig  
Sina Haßler  
Dr. Ralf Klose  
Telefon: 0341/9174-208  
Telefax: 0341/9174-211  
E-Mail: [ralf.klose@smul.sachsen.de](mailto:ralf.klose@smul.sachsen.de)
- Redaktion:** siehe Autoren
- Endredaktion:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft  
Birgit Seeber, Ramona Scheinert, Matthias Löwig  
Telefon: 0351/2612-345  
Telefax: 0351/2612-151  
E-Mail: [birgit.seeber@smul.sachsen.de](mailto:birgit.seeber@smul.sachsen.de)
- ISSN:** 1861-5988
- Redaktionsschluss:** Oktober 2006

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

### **Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.