

**Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens <sup>1</sup>**

Zuwendungsempfänger: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH	Förderkennzeichen: 2816ERA02W
Thema: AgriAs – Bewertung und Management der Arsenbelastung in landwirtschaftlich genutzten Böden und Wässern	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 – 31.03.2019	

**Projektbeschreibung:**

Arsen in landwirtschaftlichen Böden und Wässern und dessen Verbreitung in der Nahrungskette kann hohe gesundheitliche Risiken verursachen, da es sich in Pflanzen wie Reis und Getreide anreichert. In vielen europäischen Oberböden sind die Arsenkonzentrationen erhöht, häufig durch hohe geogene Hintergrundkonzentrationen. Allerdings gibt es auch Arsenanomalien anthropogenen Ursprungs, z. B. aufgrund von Bergbautätigkeit, Verhüttung, durch Freisetzung von Arsen aus Holzschutzmitteln, Insektiziden, Herbiziden oder durch Zerstörung und Lagerung von arsenreichen Chemiewaffen. Es ist notwendig, die Arsenquellen an diesen Standorten zu identifizieren und Stoffverläufe innerhalb des Ökosystems nachzuvollziehen.

Ziel von AgriAs ist es, die existierenden Risiken der Arsenfreisetzung durch die Landwirtschaft aufzuzeigen und mögliche Methoden zur Sanierung arsenbelasteter Standorte und zur Erfassung des ökotoxikologischen Potentials zusammenzustellen. AgriAs baut auf Informationen aus verschiedenen nationalen und europäischen Datenbanken auf, beinhaltet die Testung und Entwicklung neuer Technologien und einer Methodik zur umfassenden Risikobewertung. Besonderes Augenmerk wird auf die Demonstration effizienter Technologien und die Verbreitung der erworbenen Kenntnisse in Zusammenarbeit mit Stakeholdern gelegt.

**Projektergebnisse:**

Im Teilprojekt bearbeitet durch die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft wurden eigens entwickelte eisenbasierte Adsorbentien auf ihre Eignung als Bodenzusätze zur Arsenimmobilisierung getestet. Dazu wurden Bodenproben aus einer Monitoringfläche des Bodenbeobachtungsgebietes bei Freiberg (Sachsen) entnommen, die hohe Arsen (245 mg/kg), Blei (540 mg/kg) und Cadmiumkonzentrationen (6 mg/kg) aufwies. Die Adsorbentien wurden aus einem natürlichen und mikrobiell gewonnenen Eisenmineral (Schwertmannit) hergestellt und in Gefäßversuchen in Zusammenarbeit mit der BfUL (Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft) getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass bis zu 70% des im kontaminierten Boden vorhandenen Arsens gegenüber der Kontrolle (ohne Zusatz) immobilisiert werden konnten. Laut statistischer Auswertung bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Dosierung des Adsorbent und der Bioverfügbarkeit des Arsens im Boden.

Die Arsenkonzentration im geernteten Getreide (Sommergerste) konnte in bestimmten Ansätzen um bis zu 50% reduziert werden. Die Bioverfügbarkeit von Phosphat für die Pflanzen wurde durch die Zusätze kaum beeinträchtigt. Bei der Anwendung von Schwertmannit-Adsorbentien mit eingemischtem Kalk bzw. Filterasche konnte auch für andere Schwermetalle (Cadmium, Blei) eine Immobilisierung im Boden nachgewiesen werden. Dennoch wurden keine geringeren Cadmium- und Bleikonzentrationen im Getreide gemessen.

Obwohl noch keine Verifizierung der Ergebnisse im Feldversuch erfolgte, waren die Ergebnisse sehr vielversprechend und wurden in Stakeholderworkshops und auf Konferenzen einem breiten Publikum vorgestellt.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Vielzahl von Parametern und biogeochemische Wechselwirkungen das Verhalten der Schwermetalle im Bodenökosystem und den Übergang vom Boden in die Pflanze beeinflusst. Diese Erkenntnisse und die gesammelten Hintergrundinformationen wurden in der Risikobewertung und bei der Erstellung des Risikomodells berücksichtigt.

**Short Project Description <sup>1</sup>**

Beneficiary: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH	Project number: 2816ERA02W
Project title: AgriAs – Evaluation and management of Arsenic contamination in agricultural soil and water	
Project : 01.04.2017 – 31.03.2019	

**Project objective:**

Arsenic (As) in agricultural soils and water, and its entering into the food chain can cause risk to human health, as As can accumulate in plants such as rice or barley. In Europe, agricultural top soils in many countries are affected by elevated arsenic concentrations. Most of the As anomalies can be directly linked to geological features. However, some anomalies have an anthropogenic origin, mostly from past or present mining activities. Also, anthropogenic releases from wood preservatives, insecticides, herbicides, destruction and storage of As-rich chemical weapons have increased As concentrations in the soils, surface and ground water. It is therefore necessary to understand the sources of As, its speciation and transformation in soil, its uptake by plants and impact on vegetation and ecosystems.

The overall goal of AgriAs is to identify the existing risks of As exposure through agriculture, a complete summary of existing tools available for As risk management and remediation as well as a toolkit for ecotoxicity and bioavailability assessment. AgriAs build on existing knowledge by using comprehensive national and European databases, developing and testing new technologies aiming to solve problems and carry out efficient risk monitoring. A particular attention will be paid to the demonstration and dissemination phase in close cooperation with stakeholders.

**Project results:**

Within the AgriAs project G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH tested a new iron based adsorbent, developed by G.E.O.S. for using it as amendment to immobilize arsenic in soils. Samples were taken from a monitoring site of the soil planning area near Freiberg (Saxony), with high concentration of arsenic (245 mg/kg), lead (540 mg/kg) and cadmium (6 mg/kg) in soil. The adsorbents were produced from a natural microbially precipitated iron mineral (Schwertmannite) and tested in pot experiments in close cooperation with BfUL (state operating company for environment and agriculture). The results showed that up to 70% of the As in the contaminated soil were immobilized compared to the control without adsorbents. According to the statistical interpretation there was a significant correlation between the dosage of the adsorbents and the bioavailability of As in the soil.

As-concentrations in the harvested crops (spring barley) were 50% lower compared to the control experiments. The bioavailability of phosphate, necessary for a healthy plant growth was hardly affected. For the applied Schwertmannite-adsorbents, produced as a mixture with chalk and ash, even an immobilization of cadmium and lead in soil was observed. Unfortunately the cadmium and lead concentrations in the harvested crops were not reduced.

So far, there was no verification of the results in field tests. However, the good performance of the adsorbents led to the presentation of the results in stakeholder workshops and at conferences to make them available for the public.

Knowledge gained from the project was that several parameters and biogeochemical interactions determine the behavior of heavy metals in the soil ecosystem and the transfer from soil to plants. This knowledge and the important background information from the soil planning area Freiberg were considered in risk evaluation and risk modelling.

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema: **AgriAs -  
Bewertung und Management der Arsenbelastung in  
landwirtschaftlich genutzten Böden und Wässern**

Zuwendungsempfänger:  
**G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH**

Förderkennzeichen:  
**2816ERA02W**

Laufzeit:  
**01.04.2017 bis 31.03.2019**

Monat der Erstellung:  
**04/2019**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## I. Ziele

Arsen in landwirtschaftlichen Böden und Wässern und dessen Verbreitung in der Nahrungskette kann hohe gesundheitliche Risiken verursachen. In vielen europäischen Oberböden sind die Arsenkonzentrationen erhöht, häufig durch hohe geogene Hintergrundkonzentrationen. Allerdings gibt es auch Arsenanomalien anthropogenen Ursprungs, z. B. aufgrund von Bergbautätigkeit, Verhüttung, durch Freisetzung von Arsen aus Holzschutzmitteln, Insektiziden, Herbiziden oder durch Zerstörung und Lagerung von arsenreichen Chemiewaffen. Es ist notwendig, die Arsenquellen an diesen Standorten zu identifizieren und Stoffverläufe innerhalb des Ökosystems nachzuvollziehen. Trotz umfangreicher Forschungsarbeiten zu dieser Thematik in der Vergangenheit bestehen noch erhebliche Wissenslücken zu deren Schließung AgriAs beitragen soll. **Ziel von AgriAs war es**, die existierenden Risiken der Arsenfreisetzung durch die Landwirtschaft aufzuzeigen und mögliche Methoden zur Sanierung arsenbelasteter Standorte und zur Erfassung des ökotoxikologischen Potentials zusammenzustellen. AgriAs baut auf Informationen aus verschiedenen nationalen und europäischen Datenbanken auf, beinhaltet die Testung und Entwicklung neuer Technologien und einer Methodik zur umfassenden Risikobewertung. Besonderes Augenmerk wird auf die Demonstration effizienter Technologien und die Verbreitung der erworbenen Kenntnisse in Zusammenarbeit mit Stakeholdern gelegt.

### 1. Aufgabenstellung

Aus der oben genannten Zielstellung ließen sich folgende Einzelaufgaben ableiten:

- *Aufzeigen der Relevanz der Arsenkontamination in Wässern und Böden Europas und der Notwendigkeit einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Nutzung*
- *Erfassung der vorhandenen nationalen und europäischen Daten zur Einschätzung zur Arsenkontamination in europäischen Böden und Wässern*
- *Entwicklung von Empfehlungen und Richtlinien gemeinsam mit Stakeholdern für ein effektives Arsenrisikomanagement*
- *Demonstration einer effektiven Arsenentfernungstechnologie am Fallbeispiel und Einschätzung der technologischen und wirtschaftlichen Machbarkeit*
- *Anwendung biologischer Methoden zur Einschätzung der Umweltrelevanz des Arsens und für das Management des Risikos für Mensch, Ökologie und Umwelt*
- *Information von Stakeholdern und Behörden in Europa über wichtige Projektergebnisse und Erkenntnisse.*

Umfangreiche Kenntnisse, die aus dem „Freiberger Bodenplanungsgebiet“ vorliegen, sollten durch den deutschen Partner G.E.O.S. innerhalb des Verbundprojektes eingebracht und mit anderen europäischen Standorten verglichen werden. Die Ergebnisse wurden bei der Ausarbeitung von Empfehlungen zum nachhaltigen Management arsenkontaminierter Standorte (WP5) angewendet.

Die langjährige Expertise und praktische Erfahrung von G.E.O.S. auf dem Gebiet der Arsenkontamination (Entwicklung eigener eisenbasierter Arsenabsorptionsmittel zur Arsenentfernung EP 2664376 A1) war Voraussetzung für die Bewertung von Arsenentfernungstechnologien, die experimentellen Versuche in AP3 mit realen Standortproben aus dem „Freiberger Bodenplanungsgebiet“ sowie die Mitwirkung bei der Risikobewertung in AP4.

Die genaue Eingliederung der Aufgaben von G.E.O.S. in den Gesamtarbeitsplan, Meilensteine und Balkenplan sind im Anhang 1 dargestellt.

### 2. Stand der Technik

Die sächsische Region um Freiberg in Ostdeutschland ist durch hohe geogene Schwermetallkonzentration und über 800 Jahre Erzbergbau und Verhüttung geprägt. Begleitende Schadstoffe wie As sind daher Bestandteil von Grund- und Oberflächengewässern sowie der Böden geworden. Das ländliche Gebiet wird intensiv landwirtschaftlich genutzt, weshalb die As-Konzentrationen von staatlichen Institutionen seit langer Zeit überwacht werden. Beispielsweise hat das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) über 20.000 Bodenstandorte untersucht, die As-Konzentrationen von bis zu mehreren hundert mg/kg im Bo-

den aufwiesen. Verschiedene Elutionstests wurden durchgeführt, um die Aufnahmewege von As zwischen Boden-Mensch und Boden-Pflanze-Mensch zu untersuchen. Als Ergebnis wurde das "Freiberger Bodenplanungsgebiet" geschaffen, in dem Bewertungsrichtlinien für die Freisetzung in Bezug auf die Bodennutzung (Landwirtschaft, Kindergarten, usw.) existieren<sup>1</sup>. Beispielsweise dürfen Produkte von As-belasteten Pflanzen bestimmte Grenzwerte für Lebens- oder Futtermittel nicht überschreiten.

In Europa lieferte das FOREGS-Programm das erste Gesamtbild der As-Konzentrationen in europäischen Böden, Sedimenten und Fließgewässern (Reimann et al. 2003). Im Jahr 2008 hat EuroGeoSurveys in Zusammenarbeit mit Eurometaux das GEMAS-Geochemical-Kartierungsprojekt für landwirtschaftliche Böden (Reimann 2014) eingerichtet, um europaweit geochemische Daten gemäß den REACH-Anforderungen zu sammeln. GEMAS zeigte, dass der Medianwert von As für landwirtschaftliche Boden- und Weidelandproben in Europa (5,7 mg/kg im Königswasseraufschluss) knapp unter dem globalen Medianwert (6 mg As/kg) lag (Tarvainen et al. 2013). Die Ergebnisse der GEMAS zeigen eine markante, fast gerade Grenze der As-Konzentrationen zwischen Nord- und Südeuropa. Die Konzentrationen in nordeuropäischen Böden (Median 2,5 mg/kg) waren um den Faktor 3 niedriger als in Südeuropa (Median 8 mg/kg)<sup>3</sup>. Die LUCAS-Oberbodenstudie (Toth et al. 2016) zeigte ähnliche Anomalien. Die Mehrzahl der As-Anomalien auf der GEMAS-Karte stimmt mit bekannten Mineralgürteln oder Erzlagerstätten überein, wobei As ein häufiges Nebenprodukt ist. Einige Anomalien können auch auf anthropogene Quellen zurückzuführen sein.

In der alten Bergbauregion im Erzgebirge wurden Arsenkonzentrationen von > 320 mg/kg Trockenmasse im Boden gefunden. LUCAS hat gezeigt, dass As eine der größten Bedrohungen für den Mutterboden in Südsachsen ist (Toth et al. 2016).

Die hohen lokalen Konzentrationen von As im Nord-Osten Frankreichs, dem zweiten in AgriAs bearbeiteten Feldstandort hängen dagegen mit dem Erbe des Ersten Weltkrieges zusammen (Thouin et al. 2016; Kumpiene et al. 2008). Die verschmutzten Böden wurden fast 100 Jahre lang kultiviert, daher stellen die beiden Standorte ein einzigartiges Modell für die langfristigen Auswirkungen landwirtschaftlicher Praktiken auf das As-Verhalten und die Artenbildung dar.

Im Gegensatz zur Entfernung von Arsen aus dem Wasser gibt es keine wirksame Methode zur Bodenbehandlung. Derzeit werden einige Methoden zur Stabilisierung von As in großem Maßstab in Bergbauregionen angewendet. Daher sind für landwirtschaftliche Böden spezielle Methoden zur Vorhersage der As-Bioverfügbarkeit von besonderer Bedeutung. Die Bioverfügbarkeit von As in Böden hängt von vielen Faktoren ab, wie z. B. pH-Wert, Redoxpotential, Konzentrationen von organischen Stoffen und Wassersättigung. Die Mobilisierung und Bioverfügbarkeit hängt also vom Bodentyp ab.

Trotz umfangreicher Forschungsarbeiten zur Thematik der Arsenentfernung in der Vergangenheit bestehen noch erhebliche Wissenslücken zu deren Schließung AgriAs beitragen sollte. So wurden die Auswirkungen von Methoden der Arsenbehandlung auf Pflanzen bisher nicht ausreichend untersucht, was jedoch für den Einsatz auf landwirtschaftlich genutzten Flächen essentiell ist.

#### Stand der Technik hinsichtlich Einbringungen von Eisensalzen und Zusätzen zur Schwermetallimmobilisierung

Hinsichtlich des Zusatzes von eisenbasierten Verbindungen zur Arsenimmobilisierung in Böden existieren bereits zahlreiche Studien z. B. (Kumpiene et al. 2008), allerdings wird eher seltener über die Auswirkung der Zusätze auf die Pflanzen und das Bodenökosystem berichtet. Die wissenschaftliche Veröffentlichung von (Komárek et al. 2013) fasst vorhandene Studien zur Arsen- und Metallimmobilisierung unter Verwendung von Eisenoxiden zusammen einschließlich Labor- und Feldtests und deren Wirkung auf die Pflanzen. Die folgende Tabelle enthält einen Überblick über bisherige Studien, die die Anwendung eisenbasierter Zusätze zur Arsenimmobilisierung und deren Wirkung auf die Kulturen umfassen.

<sup>1</sup> [https://www.lids.sachsen.de/files/43\\_pf\\_bod\\_pfl\\_mensch\\_karte6.5.2Gruenland\\_Blattschnitt.pdf](https://www.lids.sachsen.de/files/43_pf_bod_pfl_mensch_karte6.5.2Gruenland_Blattschnitt.pdf). 25.09.2016

**Tabelle 1:** Studien zu eisenbasierten Bodenzusätzen und deren Einfluss auf den Wirkungspfad Boden-Pflanze

Studie	Zusatz	Wirkung	Zugegebene Konz. [% w/w]	As-Konz. im Boden [mg/kg]	Kulturpflanze	Setup
(Neu et al. 2017)	WTS*, eisenbasiert	+ ++	0,5 1,0	868	Winterweizen	Gefäßversuch
(Nejad et al. 2017)	Fe(II)-modifizierter Zeolit, Goethit, Eisenkies, Eisen (II) und (III)	++ ++			Spinat	
(Marschner et al. 2010)	Eisenkies Eisenoxid (techn.) Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Rotschlamm WWTS	+ 0 + + +	1,0	20-40	Kopfsalat, Lauch, Spinat, Endivie, Chinakohl, Sellerie	Feldversuch
(Hartley und Lepp 2007)	Kalk Goethit Eisenkies FeSO <sub>4</sub> + Kalk Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + Kalk	+ ++ + + +	1,0 1,0 1,0 1,0 1,0		Spinat, Tomate	
(Kumpiene et al. 2006)	Eisenkies		1,0		Kräuter, Gräser	
(Mench et al. 2006)	Eisenkies Beringit Eisenkies + Beringit		1,0 5,0 1,0 + 5,0		Kopfsalat, Kohl, Buschbohne	
(Lombi et al. 2004)	WTS Rotschlamm Fe-Gips	+  	2,0		Weidelgras, Kopfsalat	
(Warren et al. 2003)	Eisensulfat + Kalk	+ + +	0,2 0,5 1,0	748	Rote Beete, Blumenkohl, Kopfsalat, Kartoffel, Rettich, Spinat	Feldversuch

\*WWTS- Wasserwerksschlamm

Legende für die Wirkung des Zusatzes: 0 kein Einfluss, + gute As-Entfernung, ++ sehr gute As-Entfernung

Im Europäischen Projekt GREENLAND wurde an unterschiedlichen europäischen Standorten mit erhöhten Metallgehalten im Boden die Effizienz verschiedener Bewirtschaftungs- und Anbaustrategien untersucht. Unter anderem fanden innerhalb des Projektes im „Bodenplanungsgebiet Freiberg“ Versuche mit Bodenzusätzen (Phosphat- und Kalkdüngung) statt, die nach mehreren Anbauperioden nachweisbar einen Einfluss auf die Schwermetallanreicherung in den Pflanzen hatten. Im Projekt GREENLAND wurden Eisengrieß und eisenhaltige Schlämme als Bodenzusätze getestet, wodurch Schwermetalle im Boden erfolgreich immobilisiert werden konnten. Aus der Literatur geht weiterhin hervor, dass die Zufuhr stabiler Sorbenten zur Schwermetallimmobilisierung beitragen kann. Diese zeigten Studien zu Eisenoxiden, Schichtsilikaten, z. B. Tonmineralen, Phosphaten und Wasserwerksschlämmen (Marschner et al. 2010), Müller & Pluquet 1999, Lin et al. 2005, Gebelen et al. 2006).

Wissenschaftliche Studien zur Verwendung von Eisenhydroxysulfaten als Bodenzusatzstoff zeigten, dass in Abhängigkeit der eingesetzten Menge des Eisensalzes eine nahezu vollständige Immobilisierung von Arsen erfolgen kann (Yang et al. 2015). Eisensulfate werden bereits kommerziell als Bodenzusatz vertrieben, allerdings zur Beseitigung von Eisenmangel und Unterdrückung des Moos- und Unkrautwachstums und nicht zur Immobilisierung von Schwermetallen.

Im Bodenplanungsgebiet Freiberg (Sachsen) wurden bereits verschiedene Versuche im Gewächshaus mit Stickstoff- und Phosphatdünger unter Verwendung von Winterweizen als Kultur durchgeführt (Brackhage et al. 2014), die zeigten dass die Düngemittelzufuhr einen Einfluss auf die Arsenaufnahme der Pflanzen hat. So zeigte die Studie, dass eine Phosphatdüngung die Arsenaufnahme in der Pflanze erhöhte, während die Stickstoffdüngung dieser eher entgegenwirkte. In Feldversuchen erwies sich die Phosphatdüngung allerdings eher als positiv. Weiterhin wurde erkannt, dass der Transfer von Arsen vom Boden in die Pflanze sehr stark von den Bodeneigenschaften und anderen Faktoren abhängig ist und demnach eine statistische Auswertung unterschiedlicher Parameter für eine Gesamtbeurteilung des Erfolges einer Technologie notwendig ist.

Die durch G.E.O.S. entwickelten Schwertmannit-basierten Adsorbentien bestehen zu 100% aus biogen hergestelltem Eisenhydroxysulfat (Schlömann 2012b) und sind bisher noch nie als Bodenzusatz getestet wurden. Durch die gelungene Agglomeration des Schwertmannit (EP 17163980.0 „An adsorbent comprising schwertmannite, a method of preparing the adsorbent and the use of the adsorbent for purifying water or gas“). können sie als feinkörniges Agglomerat leicht im Boden verteilt werden und bieten den Vorteil, keine weiteren Verunreinigungen (wie z. B. bei der Verwendung von Rotschlamm oder Wasserwerksschlamm) in den Boden einzubringen.

### 3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

AgriAs wurde zusammen mit folgenden Projektpartnern durchgeführt:

- *Geological Survey of Finland (Espoo, Finnland)*
- *University of Oulu (Oulu, Finnland)*
- *Bureau de recherches géologiques et minières (Paris, Frankreich)*
- *LEB Aquitaine Transfert – ADERA (Pessac-Cedex, Frankreich)*
- *Kungliga Tekniska Högskolan (Stockholm, Schweden)*

Außerdem arbeitete G.E.O.S. mit der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) (Nossen, Deutschland), mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (Dresden, Deutschland) und mit den entsprechenden Landwirten und Flächeneignern am Standort Sachsen/Freiberg zusammen.

## II. Ergebnisse

### AP 1: Arsenkonzentration in Wasser, Boden und Nutzpflanzen in Europa

Aufgabe 1: Bewertung der Datenverfügbarkeit zu As-Konzentration in Wasser, Boden, Pflanzen

Es wurden bestehende Datenbanken, Berichte und sonstige Informationsquellen zur As-Belastung in Deutschland, insbesondere in Sachsen, recherchiert und die Ergebnisse als Beitrag zum Ergebnisbericht D1.1 an den Projektpartner GTK übermittelt. Unter anderem wurde dazu der vom GTK entwickelte online-Fragebogen genutzt. Der Bericht D1.1 wurde im Oktober 2017 durch den Projektpartner GTK fertiggestellt. Aus den Recherchen wurde deutlich, dass insbesondere für Grundwasser und Oberflächengewässer für viele europäische Staaten keine oder nur wenige Daten vorliegen. Für Deutschland sind viele Werte für As in Gewässern und Böden verfügbar, die in Regionen mit erhöhten Belastungen zusätzlich kleinräumig aufgelöst sind. Allerdings werden die Daten jeweils durch die einzelnen Bundesländer erhoben und veröffentlicht, eine (entsprechend fein aufgelöste) gemeinsame Übersicht für ganz Deutschland, die Schwermetallkonzentrationen von Böden, Oberflächenwässern, Grundwässern und Getreide enthält, existiert nicht. Diese wäre für den Vergleich mit anderen europäischen Staaten jedoch durchaus sinnvoll. Hinsichtlich der Böden listet die bundesländerübergreifend agierende Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) in online verfügbaren Berichten organische und anorganische Bodenverunreinigungen für Gesamtdeutschland auf. Arsenkonzentrationen in Fließgewässern wurden für Deutschland von 2002 bis 2006 innerhalb eines Monitoringprojektes mit einer Probedichte von 1/380 km<sup>2</sup> (944 Proben) erfasst (Birke et al. 2006 und 2015).

Für Sachsen und andere Bundesländer gibt es Datenbanken, die Arsengehalte von Oberflächen- und Grundwässern aufzeigen:

(Beispiel Sachsen: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/7112.htm> for surface water; <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/6198.htm#article15124> for groundwater) und online verfügbare Karten zu Arsen und Schwermetallkonzentrationen in Ober- und Unterböden (<https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/23273.htm>).

Für die Region Freiberg, als Bodenschutzgebiet, sind ebenfalls Informationen zu Arsengehalten im Getreide verfügbar. Die höchste in Sachsen gemessene Arsenkonzentration im Oberboden lag bei 2.300 mg/kg (Rank et al. 2001).

#### Aufgabe 2: Bewertung der As-Kontamination in europäischen landwirtschaftlich genutzten Böden

Innerhalb dieser Aufgabe wurden geogene Hintergrundbelastungen und lokale Anomalien in landwirtschaftlich genutzten Gebieten in Europa aufgezeigt, wofür G.E.O.S. die entsprechenden Informationen für Deutschland lieferte. Der Bericht D1.2 wurde im März 2018 durch das GTK fertiggestellt. Die Recherchen ergaben, dass die As-Belastungen in den meisten europäischen Staaten unter Beachtung der toxikologischen Relevanz bewertet werden, wenngleich Unterschiede in den gesetzlichen Regelungen zur Herangehensweise bestehen.

Weiterhin wurde ein Sachbericht für den Standort Freiberg/ Sachsen durch G.E.O.S. erarbeitet, der als Anhang im Ergebnisbericht D1.2 beigefügt wurde und als besondere Fallbeispiele As-Hintergrundwerte und Anomalien behandelt (siehe Anhang 2).

#### Aufgabe 3: Ermittlung von Methoden zu Ökotoxizitätstests, Reinigung, Risikobewertung

G.E.O.S. hat eine Recherche zu den verfügbaren Technologien zur Bodensanierung As-belasteter Böden und insbesondere möglicher Verfahren zur Behandlung landwirtschaftlicher Flächen durchgeführt. Die Erkenntnisse daraus sind Teil des Ergebnisberichts D1.3. Dieser diente als Einführungsmaterial für den Stakeholder-Workshop, der im Juli 2018 durchgeführt wurde.

**Tabelle 2:** Technologien zur Bodensanierung Arsen belasteter Böden

<b>Technologien zur Schadstoffentfernung</b>				
Technologie	Anwendung	Vorteile	Nachteile	Nachhaltigkeit
<b>Bodenwaschung/ Säureextraktion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hauptsächlich großtechnisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gründliche Entfernung von Schadstoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auskoffierung notwendig</li> <li>Korngrößenverteilung ändert sich</li> <li>erfordert Abwasserbehandlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auskoffierung und Waschung verändert Bodenökosystem</li> </ul>
<b>In situ Boden- spülung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pilotmaßstab und großtechnisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Auskoffierung notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Validierung möglich, da nur sehr wenig für As-kontaminierte Böden angewendet</li> <li>Behandlung der Spülwässer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>abhängig vom Grad der Entfernung der Spülwässer</li> </ul>
<b>Elektrokinetische Behandlung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>meist Pilotmaßstab oder kleintechnisch; großtechnisch möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>direkt anwendbar bei feinkörnigen Böden (z. B. Ton,..)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Energieverbrauch</li> <li>schwierig für heterogene Böden</li> <li>Wassersättigung erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>möglich</li> </ul>



<b>Technologien zur Schadstoffentfernung</b>				
Technologie	Anwendung	Vorteile	Nachteile	Nachhaltigkeit
<b>Phyto-remediation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• meist Labormaßstab; pilot- und großtechnischer Maßstab möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• umweltfreundlich</li> <li>• anwendbar für landwirtschaftliche Nutzflächen, geringe Betriebskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lange Dauer</li> <li>• empfindliches System</li> <li>• geringe Akzeptanz</li> <li>• Entsorgung des Pflanzenmaterials</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ja</li> </ul>
<b>Biologische Behandlung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• meist Pilotmaßstab, Labormaßstab und großtechnisch möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Kosten</li> <li>• umweltfreundlich</li> <li>• gut untersucht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lange Dauer</li> <li>• Nährstoffzufuhr</li> <li>• geringe Akzeptanz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ja</li> </ul>
<b>Verfestigung/Stabilisierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• am häufigsten genutzte Technologie</li> <li>• kommerziell verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• effektiv</li> <li>• erreicht vorgeschriebene Grenzwerte</li> <li>• kein Anfall von Reststoffen/Abfällen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• verändert die Bodeneigenschaften</li> <li>• Flächenversiegelung (Eingrenzen der Nutzfläche)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderung der Bodenporosität</li> </ul>
<b>Vitrifikation</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• dauerhafte Reduzierung der Schadstoffmobilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auskoffnung notwendig oder Elektroden zur in situ Erwärmung</li> <li>• hoher Energieverbrauch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• negative für Bodenökosystem</li> </ul>
<b>Bodenzusätze</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur experimentell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Anwendung wie bei Düngemitteln,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH-stabilisierende Zusätze erforderlich</li> <li>• basierend auf Adsorptionsprozess, so dass Gefahr der Schadstofffreisetzung bei veränderten Bedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mögliche Änderung von Bodeneigenschaften (z. B. Bodenporosität, ...)</li> </ul>

Die Behandlungsverfahren von As-belasteten Böden lassen sich in Methoden zur Entfernung von Schadstoffen und Methoden zur Immobilisierung von Schadstoffen unterteilen. Der Entwicklungsstand der Behandlungsprozesse ist sehr unterschiedlich, wobei es für jeden Prozess verschiedene Vor- und Nachteile gibt. Bei der Anwendung von Methoden auf landwirtschaftlich genutzten Flächen muss besonderes Augenmerk auf die ökologische Nachhaltigkeit der Methode sowie auf ökonomische Aspekte gelegt werden. In den meisten Fällen ist die großflächige Bodensanierung von landwirtschaftlich genutzten Standorten auf herkömmliche Art und Weise nicht anwendbar, da die erforderlichen Ausgaben unverhältnismäßig zu den erzielten Ergebnissen wären. Daher müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, um Personen zu schützen und den Transport von Schadstoffen zu kontrollieren. Eine solide Risikobewertung bildet dabei die Grundlage für die Auswahl solcher Maßnahmen.

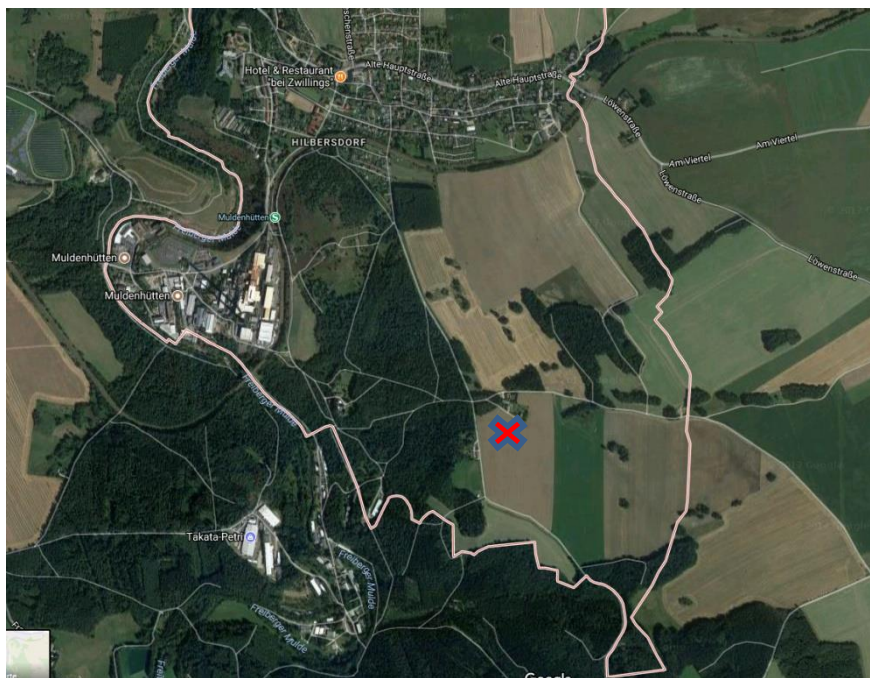
## AP 2: Wirkung der landwirtschaftlichen Praxis an arsenkontaminierten Standorten

### Aufgabe 1: Charakterisierung der As-Bioverfügbarkeit und Mobilität an Zielstandorten

Für die Untersuchungen in AP 2 wurde die Probenahme für Boden und Wasser an den Zielstandorten zwischen dem deutschen (G.E.O.S.) und dem französischen Partner (BRGM) abgestimmt und eine gemeinsame Vorgehensweise erarbeitet. Die Probenahme von Wasser und Boden wurde anschließend an den beiden Zielstandorten durch die jeweiligen Partner durchgeführt. Das Probenmaterial vom deutschen Standort wurde am 17.08.2017 entnommen und an die französischen Projektpartner BRGM und LEB Aquitaine zur weiteren Bearbeitung versendet.

### Feldstandort in Deutschland

Der Probenahmestandort in Deutschland befindet sich in Sachsen, in der Nähe von Freiberg am Nordhang des Erzgebirges. In der Region wurde bis 1969 aktiv Bergbau betrieben. Aufgrund der Geologie des Erzgebirges, der dadurch bedingten hohen geogenen Schwermetallkonzentrationen im Boden, und der Bergbau- und Hüttenindustrie weisen ca. 1000 km<sup>2</sup> der Agrarnutzfläche in Sachsen erhöhte Metallkonzentrationen im Boden auf. Im Erz vorhandener Arsenopyrit, der wiederum verhüttet wurde, ist unter anderem die Ursache für hohe Arsenkonzentrationen im Boden. Aus diesem Grund wurde durch das Sächsische Landesamt für Umwelt- und Geologie langjährige Monitoringkampagnen durchgeführt, um die Kontaminationen durch regelmäßige Probenahmen (Wasser und Boden) zu erfassen. Permanente Probenahmestandorte wurden in Gebieten mit den höchsten Schwermetallkonzentrationen im Boden eingerichtet, um Änderungen in der Bodencharakteristik und Schwermetallmobilität rechtzeitig zu erfassen. Einer dieser insgesamt 55 permanenten Beobachtungsstandorte des Sächsischen Bodenmonitoringprogrammes befindet sich in Hilbersdorf bei Freiberg (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Standort der Probenahme: Hilbersdorf bei Freiberg

Der Standort ist mit Instrumenten zur Messung meteorologischer, chemischer und physikalischer Parameter. Die erhaltenen Daten werden kontinuierlich ausgewertet. Sensible Messinstrumente befinden sich in einer Einhausung (Abbildung 2)



**Abbildung 2:** Permanenter Bodenbeobachtungsstandort in der Nähe von Freiberg (Foto: H. Forberg, LfULG)

Aufgabe 2: Einfluss von landwirtschaftlichen Bodenzusätzen auf As-Bioverfügbarkeit und Mobilität

Hintergrundinformationen sowie Landnutzungsdaten zu Kultur und Düngung am deutschen Standort wurden in enger Kooperation mit dem sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) zusammengestellt und dem französischen Partner übergeben. Darauf basierend erfolgte die Auswahl der Bodenzusätze für die Untersuchung der As-Mobilität, die durch BRGM anhand von Mikrokosmenstudien durchgeführt wurden.

**AP 3: Arsenentfernungstechnologien und Innovation**

Aufgabe 2: Laboruntersuchungen zur As-Entfernung in Böden

Der Rückhalt von Arsen im Boden durch Adsorption an Eisenverbindungen ist abhängig vom Vorliegen der Arsen- und Eisenspezies. Unter oxidativen Bedingungen (hohes Redoxpotenzial,  $As^{5+}$ ) und bei pH-Werten zwischen 3 und 7 ist eine Immobilisierung des Arsens eher gegeben, als unter sauren oder alkalischen Bedingungen und niedrigem Redoxpotenzial ( $As^{3+}$ ) (Moreno-Jiménez et al. 2012).

Das von G.E.O.S. für die Herstellung der eisenbasierten Adsorbentien verwendete Rohmaterial Schwertmannit stammt aus einer Pilotanlage im Tagebau (Nochten) in der Lausitz, in der die Eisenverbindungen durch mikrobielle Oxidation abgeschieden werden. Die mikrobiologische Schwertmannitproduktion und Agglomeratherstellung war Schwerpunkt der vom BMBF geförderten Forschungsprojekte SURFTRAP I (Schlömann 2012a), SURFTRAP II (Schlömann 2012b) und SAWA (Janneck et al. 2017). Das in AgriAs verwendete Produkt *SorpP* wird durch Pressung und Siebung aus dem Rohmaterial Schwertmannit hergestellt. Weiterhin wurden gepufferte Varianten des Sorptionsmittels durch Einmischen von 17% Kalk (*SorpP+chalk*) bzw. 27% Filterasche (*SorpP+ash*) innerhalb dieses Arbeitspaketes verwendet. Die Adsorbentien wurden bisher in unterschiedlichen Studien zur Adsorption von Oxyanionen aus Wässern untersucht (Reichel et al. 2017; Burghardt et al. 2016; Janneck et al. 2011; Simon et al. 2016; Burghardt 2012; Janneck et al. 2011; Schlömann 2012b). Die Agglomerate erreichten im Filterbett eine Arsen-Beladung von bis zu 40 mg/g (unveröffentlichte Ergebnisse)

Der für die experimentellen Versuche verwendete Boden stammt wie in AP2 bereits beschrieben vom Feldstandort Hilbersdorf bei Freiberg und wurde nach dem entsprechend mit BRGM vereinbarten Protokoll (siehe AP2) entnommen.

Tabelle 3 zeigt die in den AR- und AN-Extrakten gemessenen Schwermetallkonzentrationen.

**Tabelle 3:** Konzentrationen von As, Cd und Pb gemessen in AR- und AN-Extrakten des verwendeten Bodens vom Feldstandort Hilbersdorf

	As	Cd	Pb
MW AR <sup>2</sup> [µg/kg]	244000	6200	541000
MW AN <sup>3</sup> [µg/kg]	90	380	660

Für die Untersuchungen zum Einsatz der Schwertmannit-basierten Adsorbentien als Bodenzusatz wurden Laborversuche durchgeführt, um den Effekt auf pH-Wert und Arsen- sowie Phosphatkonzentration im Eluat für unterschiedliche Dosierungen einschätzen zu können. Dafür wurden Schüttelversuche im Verhältnis 1:10 und 1:2 (Boden zu Wasser) unter Zugabe unterschiedlicher Adsorbentkonzentration sowie eine Versuchsreihe mit zusätzlicher Phosphatzugabe angesetzt. Da die Adsorbentien neben Arsenit/Arsenat auch andere Oxyanionen wie Phosphat sorbieren, sollte die Phosphatzugabe als Referenz ohne Phosphatlimitierung dienen. Aus den Ergebnissen wurde deutlich, dass bei einer Adsorbentdosierung von 0,5 Ma-% bereits kein As mehr im Eluat nachweisbar war. Für die Gefäßversuche mit Pflanzen wurden daher Dosierungen  $\leq 0,5$  Ma-% eingesetzt. Die Gefäßversuche wurden geplant und die Zusammenarbeit mit der staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) organisiert, die freundlicherweise ihre moderne Ausrüstung und ihr Gewächshaus für die Gefäßversuche zur Verfügung stellte. Durch Zusatz eines Basisdüngers wurde sichergestellt, dass der in den Topfversuchen verwendete Boden eine für die Pflanzen optimale Nährstoffzusammensetzung aufwies. Die Planung zu den Laborarbeiten wurden mit dem Versuchsprogramm der Partner BRGM und LEB Aquitaine (aus AP 2) abgestimmt, um möglichst umfassende Erkenntnisse aus den Untersuchungsergebnissen zu erhalten. Aus den Gefäßversuchen wurde Probenmaterial der kultivierten Pflanzen im 3-4-Blattstadium und zur Erntezeit zur Untersuchung des Omega-3 Index an den Partner LEB Aquitaine versendet.

### Ergebnisse der Gefäßversuche

Die Gefäßversuche wurden nach dreieinhalb Monaten, wenn das Getreide erntereif war, beendet. Die Pflanzen wurden geerntet und für die Analyse durch das BfUL vorbereitet. Weiterhin wurden Bodenproben für Analysen und zur Untersuchung der Bioverfügbarkeit des Arsens entnommen. Tabelle 4 enthält einen Überblick über die Grundbedingungen der Gefäßversuche.

**Tabelle 4:** Parameter der Gefäßversuche beim BfUL mit Sommergerste

Parameter	
Bodenmasse	5,5 kg/Topf
As-Konz. im Boden	260 mg/kg
Testkultur	Sommergerste ( <i>Hordeum vulgare</i> ), "Soloist" mit hoher As-Aufnahme
Bewässerung	Feldkapazität
Replikate	3 pro Bedingung
Nährstoffe	Basisdünger
Zugegebenes Eisenagglomerat	<i>SorpP</i> , <i>SorpP</i> +chalk, <i>SorpP</i> +ash
Weitere Testbedingungen	Kontrolle ohne Adsorbent zusätzliche Phosphatzufuhr 0,25 % w/w <i>SorpP</i> + double P

**Abbildung 3:** Wachstum der Sommergerste im Gefäßversuch

<sup>2</sup> Königssäureextrakt

<sup>3</sup> Extrakt mit Ammoniumnitrat als Indikator für den Übergang vom Boden in die Pflanze

Die pH-Messungen im Boden zu Beginn und am Ende der Gefäßexperimente und die anschließende statistische Auswertung zeigten, dass die Zugabe des Adsorbent keinen signifikanten Einfluss auf den Boden-pH hatte. Der gemessene pH-Wert lag zwischen 5,4 und 5,7. Die höchsten pH-Werte wurden dabei allerdings in den Ansätzen mit *SorpP+chalk* gemessen.

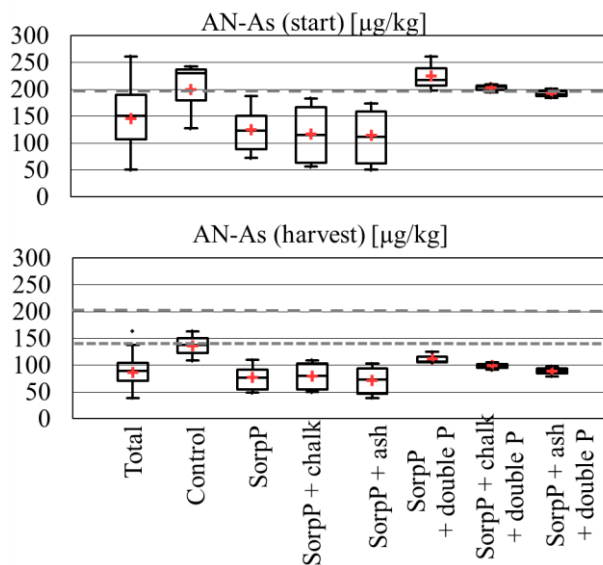
Die gemessenen Mittelwerte der Anfangskonzentrationen von Arsen, Blei und Cadmium im Boden wurden bereits in

Tabelle 3 wiedergegeben. Die geringeren Konzentrationen der AN-Extrakte gegenüber den AR-Extrakten zeigen an, dass eher ein geringer Übergang der Schwermetalle vom Boden in die Pflanzen zu erwarten ist. Für Phosphat wurden Mittelwerte von 13 mg/100 g Boden zu Beginn der Experimente und 9 mg/100 g Boden am Ende der Experimente gemessen.

### Einfluss von Adsorbent und Phosphatdüngung auf die Arsenmobilität im Boden

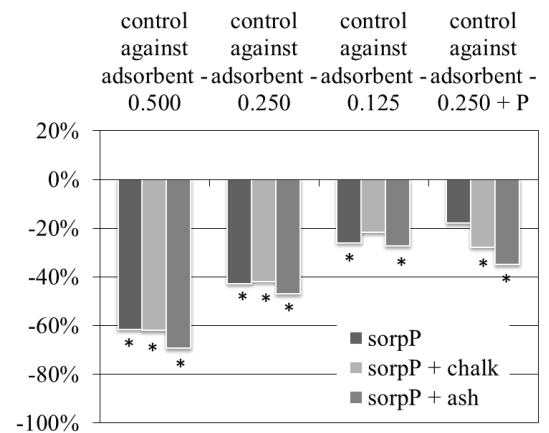
Die statistische Auswertung der Ergebnisse der Arsenkonzentrationen im Boden am Ende der Gefäßexperimente zeigte, dass die Zugabe des Adsorbent, egal in welcher Form einen signifikanten Einfluss auf die Arsenmobilität im Boden hat. Dies verdeutlichen auch die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4 und Abbildung 5). So wurde bei der höchsten Dosierung des Adsorbent gegenüber der Kontrolle bis zu 70% Arsen weniger Arsen im AN-Extrakt gemessen. Die lineare Regression machte deutlich, dass die zugegebene Adsorbentkonzentration mit der Arsenmobilität korrelierte.

Gleichzeitig zeigen die Werte, dass Phosphat ebenfalls vom Adsorbent aufgenommen wird und damit z. B. bei einer zusätzlichen Phosphatdüngung (+ double P) weniger Arsen durch den Adsorbent immobilisiert werden kann. Allerdings konnten für Phosphat keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrolle und den Gefäßen mit Adsorbentzugabe nachgewiesen werden, was bedeutet, dass der mobilisierbare Phosphatgehalt im Boden durch die Adsorbentzugabe nicht negativ beeinflusst wird und somit immer ausreichend Phosphat für die Pflanzen zur Verfügung steht.



**Abbildung 4:** Boxplots der mobilen Arsenkonzentration (AN-As) gemessen zu Beginn und am Ende der Experimente in Abhängigkeit der verschiedenen Zusätze

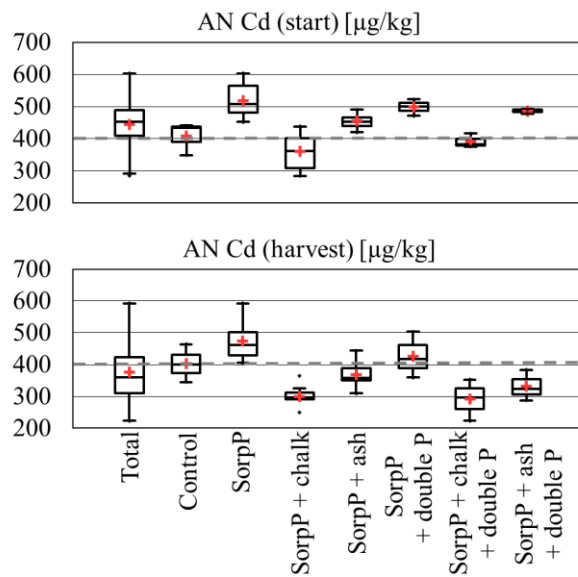
+ Mittelwerte - Median



**Abbildung 5:** Änderungen der am Ende gemessenen Arsenkonzentration gegenüber der Kontrolle in Abhängigkeit der verschiedenen Zusätze

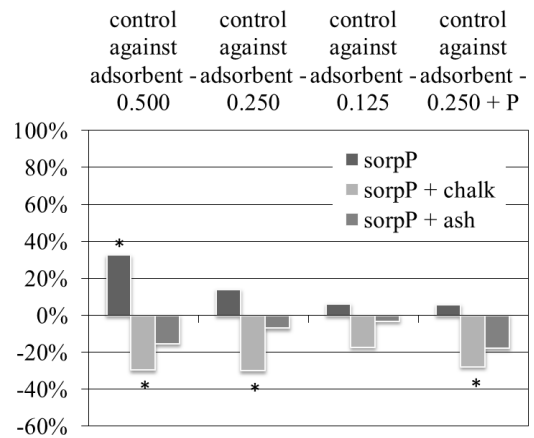
\*signifikante Ergebnisse

Für Cadmium wurde ein statistisch signifikanter Unterschied nur bei den Experimenten, in denen *SorpP+chalk* verwendet wurde festgestellt (Abbildung 6 und Abbildung 7). Hier konnte durch die Zugabe von *SorpP+chalk* eine Cd-Immobilisierung erreicht werden. Die Zugabe des Adsorbent (*SorpP*) ohne puffernden Zusatz hatte eher eine Cd-mobilisierung zur Folge, im Vergleich zur Kontrolle. Die zusätzliche Phosphatdüngung hatte kaum Einfluss auf die mobilisierbare Cd-Konzentration im Boden.



**Abbildung 6:** Boxplots der mobile Cadmiumkonzentration (An-Cd) gemessen zu Beginn und am Ende der Experimente in Abhängigkeit der verschiedenen Zusätze

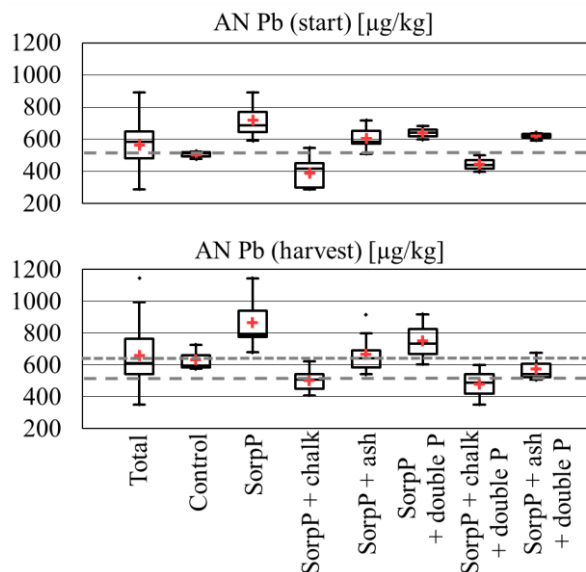
+ Mittelwerte - Median



**Abbildung 7:** Änderungen der am Ende gemessenen Cadmiumkonzentration gegenüber der Kontrolle in Abhängigkeit der verschiedenen Zusätze

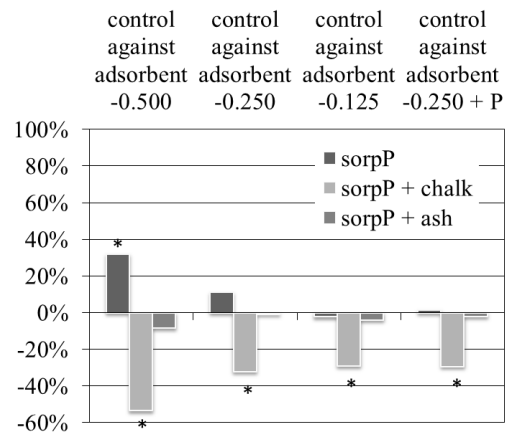
\*signifikante Ergebnisse

Auch für Blei konnten nur in den gepufferten Ansätzen mit *SorpP+chalk* gegenüber der Kontrolle am Ende deutliche niedrigere Bleikonzentrationen in den Extrakten festgestellt werden (Abbildung 8 und Abbildung 9). Hier wurde die Bleiverfügbarkeit im Boden um 53% bzw. 29% gesenkt.



**Abbildung 8:** Boxplots der mobilen Bleikonzentration (AN-As) gemessen zu Beginn und am Ende der Experimente in Abhängigkeit der verschiedenen Zusätze

+ Mittelwerte, - Median



**Abbildung 9:** Änderungen der am Ende gemessenen Bleikonzentration gegenüber der Kontrolle in Abhängigkeit der verschiedenen Zusätze

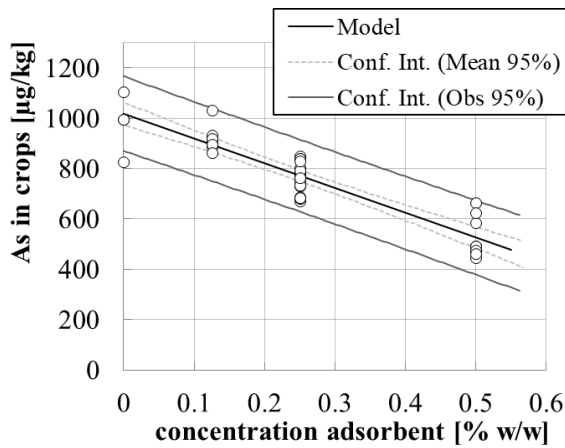
\*signifikante Ergebnisse

Ähnlich wie beim Cadmium hatte der Zusatz des ungepufferten Adsorbent eher eine Bleimobilisierung im Boden zur Folge. Für die zusätzlich mit Phosphat gedüngten Ansätze ließen sich keine signifikanten Unterschiede zur Kontrolle feststellen.

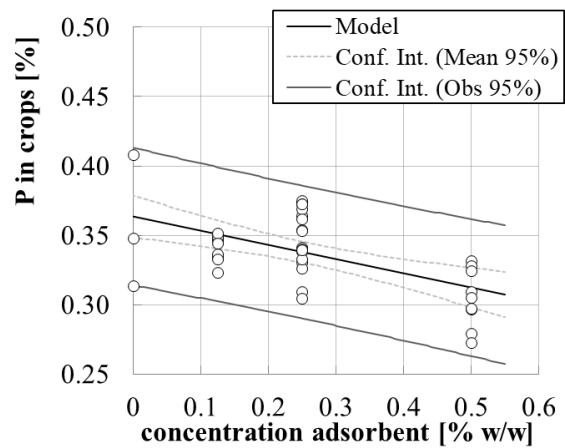
Ebenfalls wie beim Cadmium wurde eine höhere Mobilität gleich zu Beginn der Experimente nach Einmischen des Adsorbents bei Ansätzen mit *SorpP* und *SorpP+ash* beobachtet.

### Betrachtung der Aufnahme der Schadstoffe in die Pflanze

Eine lineare Regression zeigte, dass die angewendete Konzentration des Adsorbent deutlich mit dem Arsengehalt in der Pflanze korrelierte (Abbildung 10). Mit steigender Konzentration des Adsorbent (unabhängig vom Typ des Adsorbent) im Boden, sank somit die Arsenkonzentration in der Pflanze. Für Phosphat schien eine schwache Korrelation zwischen Adsorbentkonzentration und Phosphatanreicherung in der Pflanze vorhanden zu sein (Abbildung 11).



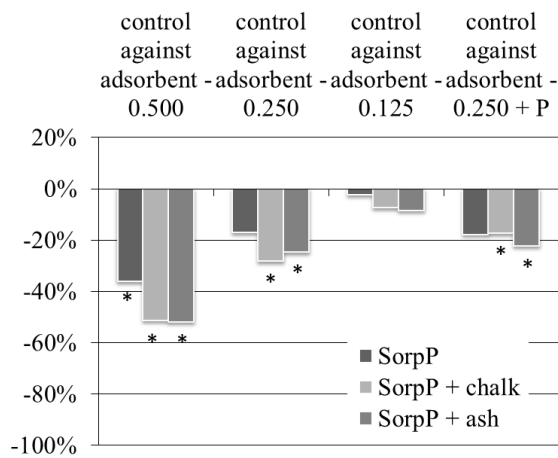
**Abbildung 10:** Lineare Regression: As im Getreide in Abhängigkeit von der Adsorbentkonzentration



**Abbildung 11:** Lineare Regression: P im Getreide in Abhängigkeit von der Adsorbentkonzentration

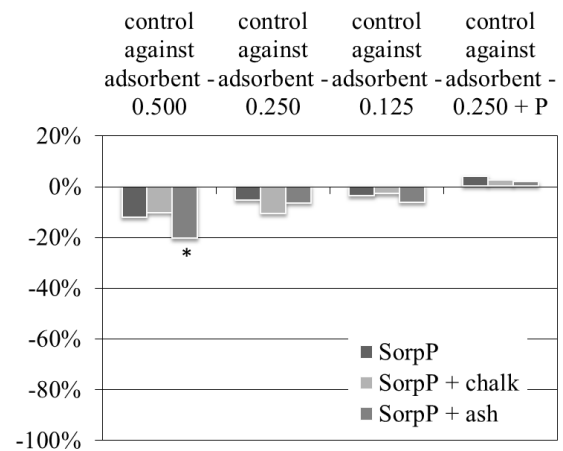
Laut statistischen Tests wurden allerdings keine signifikanten Unterschiede im Phosphatgehalt der Pflanzen nach der Ernte zwischen den verschiedenen Versuchsansätzen festgestellt.

Für eine detaillierte statistische Auswertung mittels eines ANOVA Tests wurden im weiteren Verlauf die Elementkonzentrationen im Getreide unter Berücksichtigung der verschiedenen Testbedingungen (*SorpP*, *SorpP+chalk*, *SorpP+ash*) herangezogen. Die Ergebnisse sind für jedes Element in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15).



**Abbildung 12:** Arsenkonzentration im Getreide in Abhängigkeit des Adsorbentzusatzes

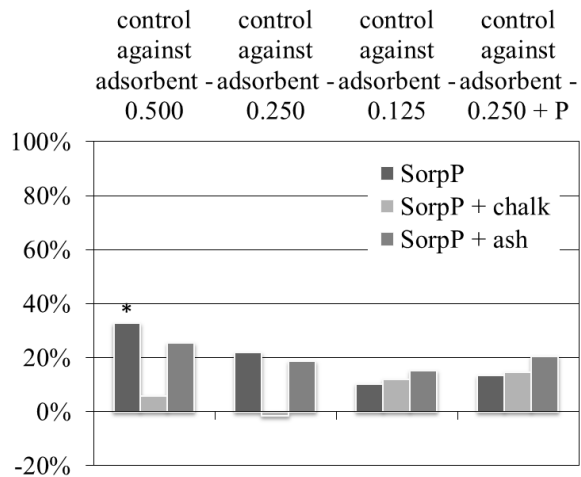
\* *signifikante Ergebnisse*



**Abbildung 13:** Phosphatkonzentration im Getreide in Abhängigkeit des Adsorbentzusatzes

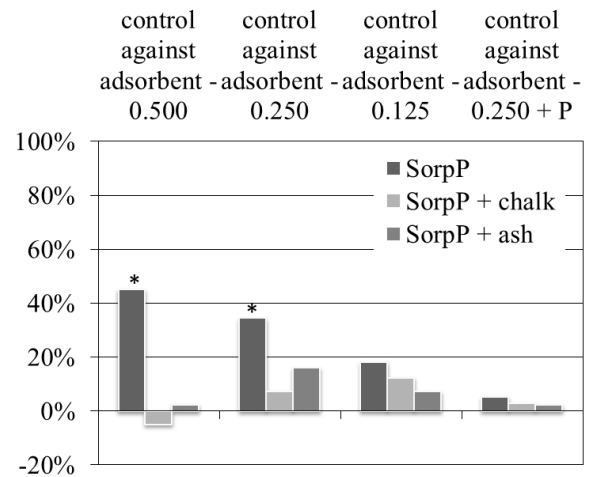
\* *signifikante Ergebnisse*





**Abbildung 14:** Cadmiumkonzentration im Getreide in Abhängigkeit des Adsorbent-zusatzes

\*signifikante Ergebnisse



**Abbildung 15:** Bleikonzentration im Getreide in Abhängigkeit des Adsorbent-zusatzes

\*signifikante Ergebnisse

Wie in Abbildung 12 zu sehen, wurden unabhängig vom Testansatz unter allen Bedingungen geringere Arsenkonzentrationen im Getreide gemessen. Die Ergebnisse bestätigen damit die im vorangegangenen Abschnitt berichtete Arsenimmobilisierung im Boden durch Zugabe der Schwertmannitadsorbentien. Die höchste Arsenreduktion gegenüber der Kontrolle wurde dabei bei der höchsten eingesetzten Adsorbentdosierung unter Verwendung der gepufferten Adsorbentien (*SorpP+chalk*, *SorpP+ash*) gemessen.

Für Phosphat wurden kaum Unterschiede gegenüber der Kontrolle festgestellt. Lediglich im Ansatz *SorpP+ash* und der höchsten Adsorbentkonzentration konnte signifikant weniger Phosphat im Getreide gegenüber der Kontrolle nachgewiesen werden.

Für Cadmium und Blei konnte in den meisten Ansätzen keine Verringerung der im Getreide gemessenen Konzentration im Vergleich zur Kontrolle festgestellt werden. Im Gegenteil wurde durch die Zugabe von *SorpP* in ungepuffert Form und bei höchster Konzentration sogar eine signifikante Zunahme von Cadmium in der Pflanze gemessen. Lediglich die Testansätze mit *SorpP+chalk* wiesen ähnliche Cd-Konzentrationen in der Pflanze auf wie der Kontrollansatz.

Für Blei wurden ähnliche Resultate wie für Cadmium erzielt. Besonders Ansätze mit ungepuffertem Adsorbent (*SorpP*) zeigten deutlich erhöhte Bleikonzentrationen im Getreide im Vergleich zur Kontrolle. Bei Ansätzen mit *SorpP+chalk* wurde mit zunehmender Dosierung immer weniger Blei im Getreide angereichert. Hier scheint aber der mit zunehmender Dosierung ebenfalls zunehmende Kalkgehalt Auswirkungen auf die Blei- und Cadmiumkonzentration im Getreide zu haben.

Die zusätzliche Phosphatdüngung führte zu den geringsten Bleianreicherungen im Getreide im Vergleich zur Kontrolle. Eventuell wurde durch die Phosphatzugabe Blei als schwer bioverfügbares Bleiphosphat im Boden gebunden und damit festgelegt.

Um den allgemeinen Gesundheitszustand der Pflanze zu erfassen, wurde durch den Partner LEB-Aquitaine der Omega-3-Index bestimmt. Den Ergebnissen zur Folge zeigten nur die Pflanzen ein besseres Wachstum bzw. waren gesünder, die mit den gepufferten Adsorbentien (*SorpP+chalk*, *SorpP+ash*) gedüngt wurden. Hier wurden auch deutlich geringere Arsen- und Bleikonzentrationen in den Blättern gefunden. Dagegen waren die Cadmiumkonzentrationen in den Pflanzen bei allen Bodenzusätzen im Vergleich zur Kontrolle erhöht. Die Zugabe von ungepuffertem *SorpP* trug eher nicht zu einem höheren Omega-3-Index und damit verbessertem Pflanzenwachstum bei. Im Gegenteil, mit zunehmender Konzentration an ungepuffertem *SorpP* im Boden, stieg zum Beispiel der Cadmiumgehalt in den Blättern der Pflanzen an.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Anwendung von gepufferten eisenhaltigen Adsorbentien im Boden zur Immobilisierung von Schwermetallen führte. Am positivsten war der Effekt für Arsen. Auch die Anwendung des ungepufferten Adsorbent führte zu einer Arsenimmobilisierung und geringeren Anreicherung im Getreide. Für die gepufferten Zusätze konnten nicht nur geringere Konzentrationen in den AN-Extrakten und im Bodenwasser, sondern auch im vegetativen Teil der Pflanze und in der Frucht (Getreidekörner) gegenüber der Kontrolle (unbehandelter Boden) nachgewiesen werden. Positive Effekte zeigten sich auch für Blei und Cadmium hinsichtlich der Immobilisierung im Boden, wobei hier vermutlich eher der Einfluss des Kalkanteils im gepufferten Adsorbent eine Rolle spielt. Leider hatte dies kaum Auswirkungen auf die Anreicherung dieser Schwermetalle in den Getreidekörnern. Die zusätzliche Phosphatdüngung hatte kaum Einfluss auf die Schwermetallanreicherung im Getreide.

Die Ergebnisse wurden im Bericht D3.2 zusammengefasst, welcher im November 2018 fertiggestellt wurde.

#### AP 4: Risikobewertung an ausgewählten Standorten

##### Aufgabe 1: Zusammenstellung von Bewertungskriterien für die Risikobewertung arsenbelasteter Standorte

Für diese Aufgabe wurden durch G.E.O.S. Kriterien zur Risikobewertung und den in Deutschland geltenden Regelungen hinsichtlich bestehender Richt- und Grenzwerte recherchiert und in den Ergebnisbericht D 4.1 integriert, der durch die Partner KTH und Kemakta erstellt wurde.

Hinsichtlich toxikologischer Referenzwerte (z. B. tolerierbare tägliche Aufnahme von Arsen) orientiert sich Deutschland an den Empfehlungen der EU und setzt keine eigenen Richtwerte an. Einen Grenzwert für Arsen in Nahrungsmitteln (z. B. Getreide) gibt es in Deutschland nicht, lediglich einen Futtermittelgrenzwert basierend auf der EU-Richtlinie 2002/32/EG. Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TVO) liegt bei 10 µg/l.

Für Böden enthält die Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) bestimmte Regelungen

Sie listet bestimmte Grenz- und Richtwerte entsprechend der Nutzungsart des Bodens auf. Für die landwirtschaftliche Nutzung und die Grünlandnutzung existieren die folgenden Vorgaben (Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Gesetzlich vorgeschriebene Schwellenwerte für As, Cd und Pb im Boden, in Nahrungsmitteln und Futterpflanzen

	As	Cd	Pb
<b>Boden:</b> Schwellenwerte für Agrarland			
Triggerwert[µg/kg] (BBodSchV)	200000 (AR)	-	100 (AN)
Maßnahmewert [µg/kg] (BBodSchV)	-	100 (AN)	-
<b>Feldfrüchte</b>			
Nahrungsmittel [µg/kg] (European Commission 2001)	-	100-200 *	200
Futterpflanzen [µg/kg] (2002/32 EC)	2000	1000	10000

\* 200 µg/kg für Kleie, Sprossen, Weizen, Reis, 100µg/kg für andere

Bei Erreichen oder Überschreitung der Triggerwerte sind laut BBodSchV weitere Untersuchungen des Standortes vorgeschrieben, um eventuell gefährliche Bodenkontaminationen zu erfassen. Die Maßnahmewerte spiegeln die Konzentrationen wieder, bei deren Erreichen Präventionsmaßnahmen vorgeschrieben sind.

Ansonsten gibt es für das Bundesland Sachsen bestimmte Empfehlungen (z. B. Tabelle 6)

**Tabelle 6:** Empfehlungen für die Getreideproduktion (Weizen, Gerste, Roggen) (Klose 2017)

Konzentration im Boden* [µg/kg]		Bewertung
<b>As</b>	-	Keine
<b>Cd</b>	< 1000	Höchstgehalt nach Lebensmittelverordnung wird mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten.
	1000-2000	Anpassungsmaßnahmen können die Einhaltung des Höchstgehaltes noch ermöglichen.
	>2000-7000	Höchstgehalte nach Lebensmittelverordnung werden mit hoher Wahrscheinlichkeit überschritten.
	>7000	Höchstgehalt nach Futtermittelverordnung wird mit hoher Wahrscheinlichkeit überschritten.
<b>Pb</b>	Geprüft bis 250000	Höchstgehalt nach Lebensmittelverordnung wird mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten.

\* gemessen in Königswasserextrakten aus Böden entsprechend DIN ISO 11466

#### Aufgabe 2: Bewertung von Risiken für Gesundheit und Umwelt

Die für die Modellierung der Exposition und der Risikobewertung durch die Projektpartner KTH und Kemakta benötigten Daten und Informationen zum deutschen Zielstandort wurden für die Partner zusammengestellt und übermittelt. Dazu zählen u.a. vorhandene Studien zum Arsen-transfer in Getreidesorten sowie an Grünlandstandorten, Daten zur Staubexposition, lokale Hintergrundkonzentrationen, hydrogeologische Charakterisierung.

### **AP 5: Nachhaltiges Management von Arsenrisikoregionen und Empfehlungen**

#### Aufgabe 1: Prüfung und Bewertung bestehender Empfehlungen und Richtlinien zu Arsen in Umweltsystemen

Für diese Aufgabe wurde eine Zusammenstellung von nationalen Richtlinien und Empfehlungen zur Risikobewertung am deutschen Zielstandort erarbeitet und an den verantwortlichen schwedischen Partner KTH übermittelt. Der entsprechende Ergebnisbericht D 5.1 wurde im September 2018 fertiggestellt.

#### Aufgabe 2: Managementrahmen für die Einhaltung der Richtlinien

Ziel dieser Aufgabe war es den Rahmen für die in Aufgabe 3 zu gebenden Empfehlungen zu definieren. Zu diesem Zweck wurde von G.E.O.S. Zuarbeit zum Ergebnisbericht D.5.2 an den Projektpartner GTK geliefert. Der Rahmen basiert auf der Arbeit der vorherigen Arbeitspakete und den anerkannten Pfaden, Risiken und Kriterien, die darin erarbeitet wurden.

#### Aufgabe 3: Handlungsempfehlungen für das nachhaltige Management arsenkontaminierter Standorte

Es wurden nationale und europäische Datenbanken zusammengefasst, um die Empfehlungen und Richtlinien für das nachhaltige Management von As-Risiken in landwirtschaftlichen Gebieten zu entwickeln. Diese beinhalten Arsenentfernungstechnologien und biologische Instrumente, mit denen die ökologischen und für den Menschen bestehenden Risiken zu bewältigen sind. Es wurden sowohl allgemeine Richtlinien als auch auf die zwei konkreten Standorte angepasste Maßnahmen entwickelt. In Freiberg werden die Empfehlungen zum Umgang mit kontaminierten Böden für Landwirtschaft und Gartenbau jährlich von den lokalen Behörden aktualisiert. Diese Handlungsempfehlungen enthalten einen Überblick über die Quellen und Pfade von As sowie eine Zusammenfassung der europäischen Gesetzgebung mit nationalen Richtwerten. Es werden Empfehlungen zur Standortcharakterisierung, Risikobewertung und zum Risikomanagement vorgelegt, einschließlich geeigneter landwirtschaftlicher Verfahren und Wasserbewirt-

schaftung. Außerdem wurden Empfehlungen für die weitere Forschung und Politikentwicklung zusammengefasst. Die gesamten Ergebnisse wurden im Bericht D5.3 dargestellt.

## **AP 6: Ergebnisverwertung und Öffentlichkeitsarbeit**

Im Rahmen des AP 6 wurde durch G.E.O.S. in Zusammenarbeit mit dem LfULG der erste Stakeholder-Workshop organisiert und durchgeführt, der im September 2017 in Freiberg stattfand. Die Veranstaltung wurde sehr positiv durch die Teilnehmer angenommen und ermöglichte den Austausch zur Thematik aus verschiedenen Blickwinkeln.

Im Anschluss an den Workshop fand auch das erste Projekttreffen der Projektpartner und Vertreter des Advisory Board statt, dessen Agenda durch das GTK geplant wurde. G.E.O.S. und das LfULG haben die Organisation und Durchführung des Meetings übernommen. Der Arbeitsstand in den einzelnen Arbeitspaketen wurde durch die jeweiligen Partner präsentiert und diskutiert, sowie das weitere Vorgehen abgestimmt. Die Ergebnisse des Stakeholderworkshop wurden im Laymans-Report (D6.4) zusammengefasst.

Weiterhin wirkte G.E.O.S. durch Fachbeiträge an unterschiedlichen Veröffentlichungen des Projektverbundes mit (siehe Kapitel 4: Veröffentlichungen) und veröffentlichte eigene Beiträge (z. B. zur Goldschmidt-Konferenz 2018). Auch nach Projektende verfolgte G.E.O.S. aktiv die Veröffentlichung der Ergebnisse weiter und nahm zum Beispiel an der SETAC-Konferenz in Helsinki im Mai 2019 teil.

## **AP 7: Management**

Im Rahmen des AP7 erfolgte die Zuarbeit zu den Aktivitäten von G.E.O.S. zur Erstellung der internen Berichte, die den Bearbeitungsstand des gesamten Projektes nach einer bestimmten Projektlaufzeit (6, 12, 18 Monate) abbilden.

Auf das erste Projekttreffen im September 2017 in Freiberg folgten weitere im April, Juni und September 2018 in Orleans und Tampere. Das Abschlusstreffen des Projektes fand im März 2019 in Oulanka statt. Bei allen Treffen waren Vertreter des Projektpartner G.E.O.S. anwesend und gaben Auskunft über ihren aktuellen Arbeitsstand im Projekt und stimmten sich über das gemeinsame weitere Vorgehen ab.

## **2. Verwertung**

Die Forschungsziele des Vorhabens bestanden in der:

- *Weiterentwicklung eigener Arsenentfernungstechnologien (Sorptionstechnologien)*
- *Identifizierung potenzieller neuer Anwendungspartner und Anwendungsbereiche in Europa (zur Technologievermarktung)*
- *besseren Vermarktung des eigenen Know How bzgl. Arsenentfernung (Vermarktung von Ingenieurdienstleistungen)*
- *Veröffentlichung von Informationen zu innovativen Arsenbehandlungsmethoden in Fachzeitschriften und auf Tagungen*
- *Verbreitung der Erfahrungen aus der Bodenplanungsregion Freiberg*
- *Erweiterung der Reputation des Ingenieurunternehmens hinsichtlich der Sanierung schwermetallbelasteter Standorte*
- *Veröffentlichung der Ergebnisse auf Fachkonferenzen und Tagungen.*

Alle aufgeführten Forschungsziele wurden erreicht. Nach der Recherche der verfügbaren Daten zur Arsenbelastung von Böden und Wässern in Deutschland wurden Wirkungspfad und Pflanzenverfügbarkeit am Standort Bodenplanungsgebiet Freiberg untersucht. Nach der Zusammenstellung der technologisch verfügbaren Bodensanierungsmöglichkeiten As-belasteter, landwirtschaftlich genutzter Böden, stand insbesondere die Bioverfügbarkeit von Arsen in Abhängigkeit von landwirtschaftlichen Bodenzusätzen im Vordergrund. Diese wurde begleitet durch Laborun-

tersuchungen. Verglichen wurde der Effekt der Anreicherung von Arsen in der Kulturpflanze in mit durch eisenhaltigen Adsorbentien (Schwermannit) versehenen Böden mit unbehandelten Böden. Als herausragendes Ergebnis konnte aufgezeigt werden, dass eine Mischung von Kalk bzw. Asche und Schwermannit eine Reduzierung der Arsenaufnahme in die Pflanze bewirkte und damit deren Eignung als Nahrung- bzw. Futtermittel verbesserte.

Neben den Projekttreffen und Veröffentlichungen sei an dieser Stelle exemplarisch auf die Teilnahme an einer der wichtigsten Tagung mit Bezug auf neue Anwendungsbereiche und –partner verwiesen. Vom 26.-30.05.2019 fand in Helsinki/Finnland die 29. Tagung der SETAC Europe statt. Dieses Netzwerktreffen unter dem Motto „One Environment. One Health. Sustainable Societies“ führte etwa 2.500 Beteiligte aus Wissenschaft, Wirtschaft, Regierungen aus 60 Ländern zusammen. Das Konsortium AgriAs war mit einem eigenen Workshop (Recommendations and guidelines for arsenic in agricultural soil and water) vertreten, an dem sich eine G.E.O.S. – Mitarbeiterin aktiv einbrachte. Eine große Anzahl, vor allem auch jugendlicher Tagungsteilnehmer diskutierten in diesem Zusammenhang über die Nachhaltigkeitsziele der UN, insbesondere zum Thema „Nachhaltige Lebensmittelsicherung“.

Eine vollständige Übersicht über Veröffentlichungen und Tagungsteilnahmen und damit dem Beitrag von G.E.O.S. zur wissenschaftlichen Verwertung der Ergebnisse ist dem Bericht angefügt.

Daraus wird ersichtlich, dass das Bodenplanungsgebiet im Projekt eine bedeutende Rolle spielt, da es in Europa das bisher einzige administrative Handeln darstellt, um den Pfad arsenkontaminierter Böden – Pflanze – Mensch zu managen. Es wurde im Projektverlauf aufgezeigt, dass es aber noch Entwicklungsmöglichkeiten, eben durch den Einsatz von eisenhaltigen Düngemitteln geben kann, damit in Zukunft auch auf kontaminierten Flächen arsenunbelastete Kulturpflanzen geerntet werden können. Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem in der Interaktion verschiedener Schwermetalle, in Freiberg exemplarisch für Blei und Cadmium, die mit Arsen im Boden aufgrund geogener Gegebenheiten vorkommen.

Zu den Forschungsergebnissen wurden zudem Anregungen in Richtung Europäisches Parlament, Europäischer Rat und Europäische Kommission geäußert. Die Projektpartner waren sich einig, dass es adäquat zur Europäischen Wasserrahmenrichtlinie perspektivisch eine Bodenschutzrahmenrichtlinie geben muss. Die ist einerseits aus der Zunahme an kontaminierten Böden in Europa begründet, aber auch aus dem Klimawandel, verstärkten Erosionsereignissen, Versalzungsprozessen etc..

### 3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Erkenntnisse von Dritten, welche für die Durchführung des Vorhabens relevant sind, bekannt geworden.

### 4. Veröffentlichungen

G.E.O.S. hat während der Projektlaufzeit an verschiedenen Veröffentlichungen zu AgriAs im Allgemeinen und zu einzelnen Arbeitsthemen mitgewirkt:

#### - Projektvorstellung mit Fokus auf die betrachteten Zielstandorte:

- *K. Loukola-Ruskeeniemi, J. Kaija, I. Jordan, J. Pinka, I. Müller, F. Battaglia-Brunet, J. Hellal, D. Hube, M. Le Guédard, C. Jones, T. Tarvainen, T. Hatakka, R. Keiski., A. Turkki, P. Bhattacharya (2018). Arsenic contamination in European agricultural soils inherited from mining activities and World War. 4th World Congress on New Technologies (NewTech'18). Madrid, Spanien 19.-21.08.2018*

#### - Vorstellung des Zielstandortes Verdun, Frankreich:

- *F. Battaglia-Brunet, J. Lions, C. Joulian, N. Devau, M. Charron, D. Hube, J. Hellal, M. Le Guédard, I. Jordan, P. Bhattacharya, K. Loukola-Ruskeeniemi, T. Tarvainen, J. Kaija (2018). Characterization of an agricultural site historically polluted by the destruction of arsenic-containing chemical weapons. As2018 - The 7th International Congress & Exhibition on „Arsenic in the Environment“. Peking, China 01.-06.07.2018*

- **Risiko der Arsenfreisetzung durch die Landwirtschaft:**
  - *K. Loukola-Ruskeeniemi, J. Kaija, T. Tarvainen, T. Hatakka, R. Keiski, A. Turkki, J. Pinka, I. Jordan, F. Battaglia, M. Le-Guedard, C. Jones, P. Bhattacharya, S. Kurppa, I. Müller, G. Siebielec, J. Solis Veliz, (2018). Risks of arsenic exposure through agriculture. Nordic Geological Winter Meeting. Kopenhagen, Dänemark 10.-12.01.2018*
- **Allgemeine Projektvorstellung:**
  - *F. Battaglia-Brunet, P. Bhattacharya, M. Le Guédard, I. Jordan, J. Kaija, R. Keiski, K. Loukola-Ruskeeniemi, I. Müller, T. Tarvainen (2017). AgriAs- Evaluation and Managment of arsenic contamination in agricultural soil and water. 9th International Workshop on Chemical Bioavailability in the Terrestrial Environment. Warschau, Polen 05.-08.11.17*
- **Einsatz des von G.E.O.S. entwickeltem neuartigen Schwertmannit-basierten Adsorbens:**
  - *I. Jordan, S. Reichel, E. Janneck, A. Abbenseth, A. Patzig (2018). Safe water systems in arsenic polluted agricultural areas using a novel Schwertmannite-based adsorbent. 2nd Water-JPI Conference: Emerging pollutants in freshwater ecosystems. Helsinki, Finnland 06.-07.06.2018*
  - *H. Valkama, E. Turpeinen, K. Kursula, B. Rathnayake, K. Ainassaari, I. Jordan, E. Muurinen, R. L. Keiski (2019). Removal of arsenic from natural waters by membrane technologies and adsorption. SETAC EUROPE 29th Annual Meeting. Helsinki, Finnland 26.-30.05.2018*
- **Vorstellung des Zielstandortes Sachsen:**
  - *I. Müller, K. Kardel, I. Jordan (2018). Assessment of large-scale metal contaminated soils in Saxony (Germany) - is there an impact on the soil-to-water pathway? 2nd Water-JPI Conference: Emerging pollutants in freshwater ecosystems. Helsinki, Finnland 06.-07.06.2018*
- **Vorstellung Zielstandort Freiberg als Fallbeispiel Bergbau- beeinträchtigtger Regionen:**
  - *I. Jordan, S. Reichel, E. Janneck, J. Hellal, N. Devau, M. Le Guedard, R. Klose (2018). Agriculture in mining-impacted regions- Investigations on the influence of soil amendments on As mobility. Goldschmidt-Conference. Boston, USA 12.-17.08.2018*
- **Risikobewertung von Arsen in landwirtschaftlich genutzten Böden:**
  - *C. Jones-Johansson, M. Elert, S. Vijayakumar, P. Bhattacharya, I. Jordan, I. Mueller, F. Battaglia-Brunet, M. Le Guédard (2018). Assessment of environmental and health risks of arsenic in agricultural soils. As2018 - The 7th International Congress & Exhibition on „Arsenic in the Environment“. Peking, China 01.-06.07.2018*
  - *K. Loukola-Ruskeeniemi, J. Pinka, I. Müller, I. Jordan, F. Battaglia-Brunet, J. Hellal, D. Hube, M. Le Guedard, T. Tarvainen, T. Hatakka, C. Jones, R. L. Keiski, A. Turkki, S. Kurppa, A. Ahmad, P. Bhattacharya, J. Kaija (2018). Risk management and recommendations for arsenic in agricultural soil of europe. XENOWAC II Conference. Limassol, Cyprus 10.-12.10.2018.*

## Literaturverzeichnis

- Brackhage, Carsten; Huang, Jen-How; Schaller, Jörg; Elzinga, Evert J.; Dudel, E. Gert (2014): Readily available phosphorous and nitrogen counteract for arsenic uptake and distribution in wheat (*Triticum aestivum* L.). In: *Scientific reports* 4, S. 4944. DOI: 10.1038/srep04944.
- BBodSchV (2017): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv/>.
- Birke, M., Rauch, U., Raschka, H., Wehner, H., Kringel, R., Gäbler, H.-E., Kriete, C., Siewers, U., Kantor, W., (2006): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland - Verteilung anorganischer und organischer Parameter in Oberflächenwässern und Bachsedimenten. Vorabexemplar, 641 pp. (unveröffentlicht).
- Birke, M., Rauch, U. & Stummeyer, J. (2015): How robust are geochemical patterns? A comparison of low and high sample density geochemical mapping in Germany. *Journal of Geochemical Exploration* 154, 105-128.

- Burghardt, D. (2012): Ferstigmstellung von Verfahren zur biotechnologischen Schwertmannit-Synthese und zur passiven Aufbereitung durch Herstellung eines Schwertmannit-Agglomerates. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A836090721/>, zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- Burghardt, D.; Richter, J.; Simon, E.; Reichel, S.; Janneck, E.; Laubrich, J. (2016): Treatment of Seepage Water from a Tailings Pond of Uranium Mining: Column Tests with a Novel Schwertmannite Adsorbent. In: Carsten Drebenstedt und Michael Paul (Hg.): Mining meets water - conflicts and solutions. Proceedings : IMWA 2016 in Leipzig, Germany, July 11-15, 2016. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage. Freiberg: Technische Universität Bergakademie.
- 2002/32 EC (2002): Directive on undesirable substances in animal food. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0032>.
- European Commission (2001): Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. 2001/466 EC. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32001R0466>.
- Geebelen, W., Sappin-Didier, V., Ruttens, A., Carleer, R., Yperman, J., Bongue-Boma, K., Mench, M., Van der Lelie, N., Vangronsveld, J. (2006): Evaluation of cyclonic ash, commercial Na-silicates, lime and phosphoric acid for metal immobilisation purposes in contaminated soils in Flanders (Belgium), *Environmental Pollution* 144. S. 32-39.
- Hartley, W.; Lepp, N. W. (2007): Remediation of arsenic contaminated soils by iron-oxide application, evaluated in terms of plant productivity, arsenic and phytotoxic metal uptake. In: *The Science of the total environment* 390 (1), S. 35-44. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.021.
- Janneck, E.; Burghardt, D.; Martin, M.; Damian, C.; Schöne, G.; Meyer, J.; Peiffer, S. (2011): From Waste to Valuable Substance: Utilization of Schwertmannite and Lignite Filter Ash for Removal of Arsenic and Uranium from Mine Drainage. In: Christian Wolkersdorfer (Hg.): Mine Water - Managing the Challenges. Proceedings of the 11th Congress of the International Mine Water Association IMWA Symposium ; 04-11.September 2011, Aachen, Germany.
- Janneck, Eberhard; Reichel, Susan; Burghardt, Diana; Simon, Elisabeth; Kießig, Gunter; Peiffer, Stefan; Klug, Maria A. (2017): Verwertung von Schwertmannit für Adsorbenzien zur energieneutralen, passiven Wasseraufbereitung. Schlussbericht zum KMU-innovativ Verbundprojekt SAWA. Final report of the KMU-innovativ joint project "Utilization of schwertmannite as adsorbents for application in passive watertreatment". Hg. v. TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek und G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft. Online verfügbar unter [https://www.tib.eu/suchen/download/?tx\\_tibsearch\\_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1005020957&cHash=71ba412db8e5ca08278492ddd30ef8bd#download-mark](https://www.tib.eu/suchen/download/?tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1005020957&cHash=71ba412db8e5ca08278492ddd30ef8bd#download-mark), zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- Klose, R. (2017): Hinweise und Empfehlungen zum Umgang mit arsen- und schwermetallbelasteten landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Hg. v. Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft. Nossen. Online verfügbar unter [http://www.bful.sachsen.de/download/Faltblatt\\_2017\\_C.pdf](http://www.bful.sachsen.de/download/Faltblatt_2017_C.pdf).
- Komárek, Michael; Vaněk, Aleš; Ettler, Vojtěch (2013): Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 172, S. 9-22. DOI: 10.1016/j.envpol.2012.07.045.
- Kumpiene, J.; Ore, S.; Renella, G.; Mench, M.; Lagerkvist, A.; Maurice, C. (2006): Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper, and arsenic in soil. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 144 (1), S. 62-69. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.01.010.
- Kumpiene, Jurate; Lagerkvist, Anders; Maurice, Christian (2008): Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments--a review. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 28 (1), S. 215-225. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.12.012.
- Lin, C.-W., Lian, J. und Fang, H.-H. (2005): Soil lead immobilization using phosphate rock, *Water Air and Soil Pollution* 161, S. 113-123.
- Lombi, E.; Hamon, R. E.; Wieshammer, G.; McLaughlin, M. J.; McGrath, S. P. (2004): Assessment of the use of industrial by-products to remediate a copper- and arsenic-contaminated soil. In: *Journal of environmental quality* 33 (3), S. 902-910.
- Marschner, B.; Müller, I.; Stolz, R.; Stempelmann, I. (2010): Immobilisierung von Schwermetallen in Gartenböden. Ergebnisse eines 5-jährigen Praxisversuchs. In: *Bodenschutz* (2), S. 34-41.
- Mench, M.; Vangronsveld, J.; Beckx, C.; Ruttens, A. (2006): Progress in assisted natural remediation of an arsenic contaminated agricultural soil. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 144 (1), S. 51-61. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.01.011.
- Moreno-Jiménez, Eduardo; Esteban, Elvira; Peñalosa, Jesús M. (2012): The fate of arsenic in soil-plant systems. In: *Reviews of environmental contamination and toxicology* 215, S. 1-37.
- Müller, I. und Pluquet, E. (1999): Verminderung der Schwermetallmobilität in belasteten Böden. Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 91, S. 1301-1304.

- Nejad, Z. D.; Jung, M. C.; Kim, K.-H. (2017): Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. In: *Environmental geochemistry and health*. DOI: 10.1007/s10653-017-9964-z.
- Neu, Silke; Müller, Ingo; Brackhage, Carsten; Gałazka, Rafał; Siebielec, Grzegorz; Puschenreiter, Markus; Dudel, E. Gert (2017): Trace elements bioavailability to *Triticum aestivum* and *Dendrobaena veneta* in a multielement-contaminated agricultural soil amended with drinking water treatment residues. In: *Journal of Soils and Sediments*, S. 1–12. DOI: 10.1007/s11368-017-1741-1.
- Rank, G.; Kardel, K.; Weidensdorfer, H. (2001): Die Schwermetallgehalte der Böden des Freiburger Raumes für die Bewertung der Gefährdungspfade Boden -> Mensch, Boden -> Nutzpflanze und Boden -> Grundwasser nach Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodschV). Hg. v. LfUG.
- Reichel, Susan; Janneck, Eberhard; Burghardt, Diana; Peiffer, Stefan; Kießig, Gunter; Koch, Thomas et al. (2017): Microbial Production of Schwertmannite. Development from Microbial Fundamentals to Marketable Products. In: *SSP 262*, S. 568–572. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.262.568.
- <sup>1</sup>Reimann et al. 2003. Agricultural Soils in Northern Europe. A Geochemical Atlas. Geol. Jb., Heft 5. 279 p. Stuttgart
- Reimann, Clemens (Hg.) (2014): Methodology and interpretation of the GEMAS data set. With 86 tables. Hannover, Stuttgart: Bundesanst. für Geowiss. und Rohstoffe (BGR); Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch Reihe B, Regionale Geologie Ausland und Angewandte Geowissenschaften, 102).
- Schlömann, Michael (2012a): Entwicklung und Optimierung eines Verfahrens zur Biosynthese reaktiver Eisenmineraloberflächen zur Wasseraufbereitung. Akronym: SURFTRAP. Hg. v. TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek und Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften. Online verfügbar unter [https://www.tib.eu/suchen/download/?tx\\_tibsearch\\_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A729578674&cHash=00ce49f2545d4c53c953b775b1ec1b3b#download-mark](https://www.tib.eu/suchen/download/?tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A729578674&cHash=00ce49f2545d4c53c953b775b1ec1b3b#download-mark), zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- Schlömann, Michael (2012b): Fertigstellung von Verfahren zur biotechnologischen Schwertmannit-Synthese und zur passiven Wasseraufbereitung durch Herstellung eines Schwertmannit-Agglomerates. Akronym: SURFTRAPII. Hg. v. TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek und Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A836090721/>, zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- Simon, E.; Burghardt, D.; Richter, J.; Reichel, S.; Janneck, E. (2016): Removal of Oxoanions From Water: Comparison of a Novel Schwertmannite Adsorbent and an Iron Hydroxide Adsorbent. In: Carsten Drebenstedt und Michael Paul (Hg.): Mining meets water - conflicts and solutions. Proceedings : IMWA 2016 in Leipzig, Germany, July 11-15, 2016. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage. Freiberg: Technische Universität Bergakademie, S. 1004–1007.
- Tarvainen, T. & GEMAS project team. (2013). Arsenic in agricultural and grazing land soils of Europe. *Applied Geochemistry* 28.
- Thouin, Hugues; Le Forestier, Lydie; Gautret, Pascale; Hube, Daniel; Laperche, Valérie; Dupraz, Sebastian; Battaglia-Brunet, Fabienne (2016): Characterization and mobility of arsenic and heavy metals in soils polluted by the destruction of arsenic-containing shells from the Great War. In: *The Science of the total environment* 550, S. 658–669. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.111.
- Toth, G.; Hermann, T.; Szatmari, G.; Pasztor, L. (2016): Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. In: *The Science of the total environment* 565, S. 1054–1062. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.115.
- Warren, G. P.; Alloway, B. J.; Lepp, N. W.; Singh, B.; Bochereau, F. J. M.; Penny, C. (2003): Field trials to assess the uptake of arsenic by vegetables from contaminated soils and soil remediation with iron oxides. In: *The Science of the total environment* 311 (1–3), S. 19–33. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969703000962>.
- Yang, Zhihui; Liu, Lin; Chai, Liyuan; Liao, Yingping; Yao, Wenbin; Xiao, Ruiyang (2015): Arsenic immobilization in the contaminated soil using poorly crystalline Fe-oxyhydroxy sulfate. In: *Environmental Science and Pollution Research* 22 (16), S. 12624–12632. DOI: 10.1007/s11356-015-4455-1.



AP/Aufgaben	2017												2019											
	April 1	Mai 2	Juni 3	Juli 4	Aug. 5	Sept. 6	Okt. 7	Nov. 8	Dez. 9	Jan. 10	Feb. 11	März 12	April 13	Mai 14	Juni 15	Juli 16	Aug. 17	Sept. 18	Okt. 19	Nov. 20	Dez. 21	Jan. 22	Feb. 23	März 24
<b>AP1</b>	<b>Arsenkonzentrationen in Wasser, Boden und Nutzpflanzen</b>																							
TA 1.1	Erfassung der Datengrundlage zu As-Konzentrationen in Wasser, Boden und Nutzpflanzen in Europa																							
TA 1.2	Erfassung des Ausmaßes der Arsenkontamination in landwirtschaftlich genutzten Böden und Wässern in Europa																							
TA 1.3	Bewertung von Methoden zur Wirkung von Arsen und zur Dekontamination																							
TA 1.4	Marktanalyse von Arsen-Entfernungstechnologien																							
<b>AP2</b>	<b>Wirkung der aktuellen landwirtschaftlichen Praxis an arsenkontaminierten Standorten</b>																							
TA 2.1	Charakterisierung der Arsenbioverfügbarkeit und Arsenmobilisierung an bestimmten Zielstandorten																							
TA 2.2	Wirkung von Bodenzusätzen auf die Bioverfügbarkeit und Mobilität des Arsens (Mikrokosmen)																							
TA 2.3	Wirkung der Zusatzstoffe auf die Arsenoxizität																							
TA 2.4	Massenbilanzen und hydrogeochemische Modellierung																							
<b>AP3</b>	<b>Arsenentfernungstechnologien und Innovation</b>																							
TA 3.1	Laboruntersuchungen zur Arsenentfernung aus Wässern																							
TA 3.2	Laboruntersuchungen zur Arsenentfernung aus Böden																							
TA 3.3	Nachhaltigkeitsanalyse																							
<b>AP4</b>	<b>Risikobewertung an ausgewählten Standorten</b>																							
TA 4.1	Zusammenstellung von Bewertungskriterien für die Risikobewertung arsenbelasteter Standorte																							
TA 4.2	Risiken für Gesundheit und Umwelt																							
TA 4.3	Risikobewertung von Standorten nach Anwendung von Behandlungsmethoden																							
<b>AP5</b>	<b>Nachhaltiges Management von Arsenrisikoregionen und Empfehlungen</b>																							
TA 5.1	Analyse und Zusammentragen von Informationen auf nationaler Ebene																							
TA 5.2	Erarbeiten eines Rahmenprogrammes zum Management arsenbelasteter Standorte																							
TA 5.3	Abgestimmte Zusammenstellung von Handlungsempfehlungen																							
<b>AP6</b>	<b>Ergebnisverwertung und Öffentlichkeitsarbeit</b>																							
TA 6.1	Entwicklung des Konzeptes für die Öffentlichkeitsarbeit, Kommunikation zwischen den Partnern und Ergebnisverwertung																							
TA 6.2	Planung von Veranstaltungen, Instrumenten zur Kommunikation, Ergebnisverbreitung und -verwertung																							
TA 6.3	Business-Plan zur Ergebnisverwertung																							
TA 6.4	Layman's Bericht																							
<b>AP7*</b>	<b>Management</b>																							
TA 7.4	Projekttreffen																							
<b>Meilensteine</b>	M3 <sup>1</sup>												M1											
<b>MS GEOS</b>	M2-G												M3-G											
<b>DELIVERABLES/ Berichte</b>	D6.2 D7.1												D6.3 D7.2											
	D6.1												D1.4 D6.4 D7.3 D7.4											
	D1.1 D4.1												D5.1 D7.6											
	D1.2 D6.4 D7.4												D2.1											
	D1.3												D3.2 D4.2 D5.2 D7.4											
	D6.4												D3.1 D3.2 D3.3											
	D2.2												D2.3 D3.2 D4.3 D7.6											
	D5.3 D6.4												D6.5 D6.6											

**Milestones:**

- M1. Identifikation von Datenlücken** M1-G Informationen zum aktuellen Stand der Bodensanierung zusammengefasst
- M2. Feedback des Beirates und der europ. Kommission** M2-G Informationen, Grenzwerte zur Risikobewertung geliefert
- M3. Stakeholder Workshops organisiert und Feedback erhalten** M3-G Informationen zu nationalen Regelungen, Handlungsempfehlungen für As-kontaminierte Standorte
- M4. Experimentelle Arbeiten zu Arsenentfernungstechnologien erfolgreich beendet**

\* Aus Vereinfachungsgründen wurden in AP7 nur die für den deutschen Projektpartner relevanten Teilaufgaben dargestellt.

\*\* Die für G.E.O.S. relevanten Meilensteine wurden orange markiert. Weitere Erläuterungen dazu befinden sich im Projektantrag

## Erfolgskontrollbericht<sup>4</sup>

Zuwendungsempfänger: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH	Förderkennzeichen: 2816ERA02W
Vorhabenbezeichnung: Bewertung und Management der Arsenbelastung in landwirtschaftlich genutzten Böden und Wässern	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 – 31.03.2019	
Berichtszeitraum: 01.04.2017 – 31.03.2019	

### 1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Schwerpunkt des Förderprogrammes Water JPI 2015 ist das nachhaltige Management von Wasserressourcen in Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Süßwasseraquakulturen. In verschiedenen Regionen Europas unter anderem in Sachsen/Deutschland beeinträchtigen hohe Schwermetallkonzentrationen (z. B. Arsen) im Boden die landwirtschaftliche Nutzung und führen zu erhöhten Konzentrationen im Grund- und Oberflächenwasser. Mit Projektpartnern aus 4 EU-Staaten unter Beteiligung von Universitäten, KMU und nationalen Forschungsinstituten der Länder ist AriAs ein interdisziplinäres, transnationales Verbundvorhaben mit dem Ziel die existierenden Risiken der Arsenfreisetzung durch die Landwirtschaft aufzuzeigen und mögliche Methoden zur Sanierung arsenbelasteter Standorte und zur Erfassung des ökotoxikologischen Potentials zusammenzustellen. AgriAs baut auf verschiedenen nationalen und europäischen Datenbanken auf, beinhaltet die Testung und Entwicklung neuer Technologien und eine effiziente Risikobewertung. Besonderes Augenmerk wird auf die Demonstration innovativer Technologien und die Verbreitung der erworbenen Kenntnisse in Zusammenarbeit mit Stakeholdern gelegt, um am Ende nachhaltige Bewirtschaftungsstrategien für die landwirtschaftlich genutzten Böden und Wässer abzuleiten. Damit wird u. a. der Call-Schwerpunkt: Monitoring und Reduktion von Boden- und Wasserverschmutzung des Förderprogrammes adressiert. Die Ergebnisse können z. B. Grundlage für zukünftige Überwachungssysteme sein, um einen effizienten und schonenden Umgang mit den Ressourcen Wasser und Boden in Zukunft zu ermöglichen. Hauptschwerpunkt der durch G.E.O.S. im Projekt durchgeführten Forschungsleistung war die Anwendung natürlicher eisenbasierter Agglomerate in schwermetallkontaminierten Böden, um eine Arsenimmobilisierung zu erreichen und eine umfangreiche statistische Auswertung der erhaltenen Ergebnisse unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen im Wirkungspfad Boden-Pflanze. Damit soll eine nachhaltige Bewirtschaftung von Böden und eine Verbesserung der Bodenqualität erreicht werden, denn bisher sind die mit Arsen kontaminierten Böden teilweise nur eingeschränkt nutzbar und Sicker- und Oberflächenwässer weisen erhöhte Schwermetallgehalte auf.

## 2. Erzielte Ergebnisse

Im Sinne des Gesamtziels von AgriAs die existierenden Risiken der Arsenfreisetzung durch die Landwirtschaft aufzuzeigen, Wissenslücken im Zusammenhang mit Arsenkontaminationen zu schließen und mögliche Methoden zur Sanierung arsenbelasteter Standorte sowie zur Erfassung des ökotoxikologischen Potentials zusammenzustellen, enthielt das Teilprojekt von G.E.O.S. folgende Arbeitsschwerpunkte:

- Recherche nationaler und Landes-Datenbanken zu vorhandenen Daten nach Arsenkontaminationen in Wasser (Grund- und Oberflächenwasser), in Böden und Pflanzen

Die Recherche zeigte, dass deutschlandweit Daten für Arsen in Gewässern und Böden verfügbar sind, teilweise in Gebieten mit höherer Belastung auch kleinräumig aufgelöst. Da die Daten allerdings häufig durch die einzelnen Bundesländer erhoben und veröffentlicht werden, fehlt eine entsprechend gemeinsame fein aufgelöste Übersicht für Gesamtdeutschland. Daten zu Arsenanreicherungen in Futtermitteln und Getreide sind nur für wenige Bundesländer bzw. Regionen verfügbar.

- Zusammenstellung von Daten, Berichten und Ergebnissen für das Bodenplanungsgebiet Freiberg  
Für den Standort Freiberg wurde ein Sachbericht mit allen relevanten Informationen durch G.E.O.S. erstellt, der als Anhang 1 dem Schlussbericht angefügt wurde.

- Recherche von verfügbaren Technologien zur Bodensanierung Arsen-belasteter Böden (siehe Tabelle 2 des Schlussberichtes)
- Unterstützung der französischen Projektpartner bei der Probenahme von Wasser und Boden am Feldstandort bei Freiberg, sowie Recherche und Übergabe von standortbezogenen Daten und Hintergrundinformationen (z. B. Landnutzung, Kulturanbau und Düngung)

- Entwicklung und Testung innovativer Arsenentfernungstechnologien  
Verschiedene internationale Veröffentlichungen berichteten über positive Wirkungen von Eisenzusätzen im Boden zur Immobilisierung von Arsen, bei denen den Böden in Labor- oder Pilotstudien verschiedene Eisensulfate, Wasserwerksschlämme oder Eisenkies zugesetzt wurden.

Die von G.E.O.S. entwickelten eisenbasierten Adsorbentien, deren Rohmaterial Schwertmannit als Reststoff in einer natürlichen mikrobiellen Wasserbehandlungsanlage anfällt, wurden in diesem Zusammenhang noch nie getestet, ebenfalls nicht die von G.E.O.S. hergestellten neuartigen gepufferten Varianten, die durch Einmischung von Filterasche oder Kalk hergestellt wurden.

Daher führte G.E.O.S. mit Unterstützung des BfUL, im Gewächshaus der BfUL Gefäßversuche durch, bei denen die eisenbasierten Adsorbentien im Boden eingemischt wurden. Zusätzlich wurden Testansätze mit extra Phosphatdünger versehen, um den Pflanzen ausreichend Phosphat zur Verfügung zu stellen und eine eventuell vorliegende Konkurrenzadsorption von Phosphat an den Eisenagglomeraten zu kompensieren. Anschließend erfolgte die Kultivierung von Sommergerste in den Töpfen im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle (Boden ohne Zusatz). Es wurden sowohl Analysen der unbehandelten und behandelten Bodenproben sowie der Böden nach Versuchsende durchgeführt, um den bioverfügbaren Anteil an Schwermetallen in den Böden zu bestimmen.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Anwendung von gepufferten eisenhaltigen Adsorbentien im Boden zur Immobilisierung von Schwermetallen führte. Am positivsten war der Effekt für Arsen. Hier führte die Anwendung der eisenbasierten Adsorbentien (gepuffert und ungepuffert) in allen Testansätzen zu einer statistisch bestätigten signifikanten Arsenimmobilisierung im Boden und geringeren Anreicherung im Getreide. Für die gepufferten Zusätze konnten nicht nur geringe-

re Konzentrationen in den AN-Extrakten (Bioverfügbarkeit) und im Bodenwasser, sondern auch im vegetativen Teil der Pflanze und in der Frucht (Getreidekörner) gegenüber der Kontrolle (unbehandelter Boden) nachgewiesen werden. Positive Effekte zeigten sich bei der Anwendung der gepufferten Adsorbentien auch für Blei und Cadmium hinsichtlich der Immobilisierung im Boden, wobei hier vermutlich eher der Einfluss des Kalkanteils im gepufferten Adsorbent eine Rolle spielte. Leider hatte dies keine positiven Auswirkungen auf die Anreicherung dieser Schwermetalle in den Getreidekörnern. Die zusätzliche Phosphatdüngung hatte kaum Einfluss auf die Schwermetallanreicherung im Getreide. Eine signifikante Phosphatlimitierung durch den Adsorbentienzusatz konnte nicht nachgewiesen werden. Detaillierte Ergebnisse sind im Abschlussbericht, Kapitel II AP3 dargestellt.

Insgesamt waren die Ergebnisse aber sehr erfolgversprechend und sollten nun möglichst in Feldversuchen verifiziert werden.

Ein weiterer entscheidender Erkenntnisgewinn lag vor, da im Vergleich zu bisherigen Studien eine ganzheitliche Betrachtung erfolgte, indem nicht nur die Ergebnisse der AN-Extrakte (Bioverfügbarkeit) sondern auch die Konzentrationen in Blättern und Getreide, der Omega-3-Index als Parameter für die Pflanzengesundheit, die Konzentrationen im Eluat und die mikrobielle Aktivität untersucht wurden. Damit konnte eine sehr detaillierte Auswertung erfolgen. Die Einbeziehung verschiedener Schwermetalle und Phosphat ermöglichte auch die Analyse verschiedener Wechselwirkungen, so dass auch komplexe Zusammenhänge erkannt und beschrieben werden konnten. Das sollte in zukünftigen Studien auf jeden Fall berücksichtigt werden.

- Zusammenstellung von Bewertungskriterien für die Risikobewertung arsenbelasteter Standorte. Informationen über die in Deutschland geltenden gesetzlichen Regelungen und Grenzwerte (z. B. BBodSchV, TVO, LMIV) und Empfehlungen wurden zusammengefasst und den Projektpartnern für die Risikobewertung bzw. für AP5 zur Ableitung von allgemeinen Handlungsempfehlungen zur Verfügung gestellt.

- Recherche der für die Risikobewertung notwendigen Informationen zum deutschen Feldstandort. Vorhandene Studien und Informationen zum Arsentransfer in Getreidesorten sowie an Grünlandstandorten, Daten zur Staubexposition, lokale Hintergrundkonzentrationen und hydrogeologische Daten wurden gesammelt und dem Projektpartner KEMAKTA für ein Modell zur Risikobewertung zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen des AP 6 wurde durch G.E.O.S. in Zusammenarbeit mit dem LfULG der erste Stakeholder-Workshop innerhalb des Projektes organisiert und durchgeführt, der im September 2017 in Freiberg stattfand. Die Veranstaltung wurde sehr positiv durch die Teilnehmer angenommen und ermöglichte den Austausch zur Thematik aus verschiedenen Blickwinkeln. Die Ergebnisse des Workshop wurden im Laymans-Report veröffentlicht.

G.E.O.S. wirkte an zahlreichen Veröffentlichungen des Projektverbundes mit und veröffentlichte eigene Beiträge zur Technologieentwicklung bei der Goldschmidt-Konferenz in Boston, USA und bei der 2nd Water JPI Konferenz in Helsinki, Finnland.

I. Jordan, S. Reichel, E. Janneck, J. Hellal, N. Devau, M. Le Guedard, R. Klose (2018). Agriculture in mining-impacted regions- Investigations on the influence of soil amendments on As mobility. *Goldschmidt-Conference*. Boston, USA 12.-17.08.2018

I. Jordan, S. Reichel, E. Janneck, A. Abbenseth, A. Patzig (2018). Safe water systems in arsenic polluted agricultural areas using a novel Schwertmannite-based adsorbent. *2<sup>nd</sup> Water-JPI Conference: Emerging pollutants in freshwater ecosystems*. Helsinki, Finnland 06.-07.06.2018

Eine Liste der Veröffentlichungen ist im Abschlussbericht (Kapitel 4: Veröffentlichungen) enthalten.

### **3. Fortschreibung des Verwertungsplans**

#### **3.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte**

G.E.O.S. verwendete im Projekt ein natürliches eisenbasiertes Agglomerat, für das im Jahr 2012 ein Patent angemeldet wurde (EP 17163980.0 „An adsorbent comprising schwertmannite, a method of preparing the adsorbent and the use of the adsorbent for purifying water or gas“). Das Patent wurde bisher noch nicht erteilt. Innerhalb des Projektes wurden basierend auf diesem Patent neue Mischungen gepufferter Sorptionsmittel entwickelt und hergestellt, die erstmalig in AgriAs getestet wurden. Weitere Schutzrechtsanmeldungen aufgrund der in AgriAs erzielten Ergebnisse sind derzeit nicht geplant.

#### **3.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)**

Die Ergebnisse des AgriAs-Projektes haben gezeigt, dass die durch G.E.O.S. entwickelten, gepuffer-ten Adsorbenzien auf Schwertmannitbasis ein hohes Potenzial zur Anwendung als Bodenzusätze in der Landwirtschaft zur Schwermetallmobilisierung und damit Verbesserung der Bodenqualität haben. Dadurch eröffnen sich neue Verwertungswege für den durch G.E.O.S. im Pilotmaßstab in einer mikrobiellen Wasserbehandlungsanlage gewonnenen Schwertmannit (Eisenhydroxysulfat). Bisher war die schwierige Verwertung dieses anfallenden Reststoffes der Hauptgrund, weshalb das natürliche durch G.E.O.S. entwickelte und implementierte Verfahren zur mikrobiellen Wasserbehandlung eisenhaltiger Grubenwässer nicht in den Industriemaßstab überführt werden konnte. Die Sanierungsgesellschaft LMBV und die Bergbauunternehmen (z. B. LEAG, MIBRAG) setzen bisher nach wie vor auf konventionelle Wasserbehandlungsverfahren (Kalkmilchdosierung) zur Entfernung von Eisen(II) aus Grubenwässern. Je mehr potenzielle Verwertungswege für den bei der mikrobiellen Behandlung anfallenden Reststoff Schwertmannit aufgezeigt werden können, desto größer die Chance für eine Umstellung des chemischen auf ein nachhaltiges mikrobiologisches Verfahren. In diesem Bereich verfügt G.E.O.S. auch durch vorangegangene Forschungsprojekte (SURFTRAP, SAWA) über große Expertise und kann hierfür Planungs- und Consultingleistungen anbieten. Dies wiederum würde zum Ausbau des Dienstleistungsportfolios von G.E.O.S. beitragen. Gelingt die Vermarktung der mikrobiellen Eisenentfernungstechnologie und die Verwertung des anfallenden Eisenrohstoffes, hätte dies erhebliche Umsatzsteigerungen für die Firma zur Folge.

Das bisherige Know-How von G.E.O.S. lag hinsichtlich der Arsenentfernungstechnologien auf der Arsenentfernung aus Wässern und konnte durch die Beteiligung und Arbeit im AgriAs-Projekt auf den Bereich der Böden ausgedehnt werden. Die umfangreiche statistische Ergebnisauswertung der Gefäßversuche und die Recherche von Datenbanken und Hintergrundinformationen trug weiterhin erheblich zum Ausbau des Know-How auf dem Gebiet Bodensanierung bei. Dies ermöglicht in Zukunft eine bessere Vermarktung von Ingenieurdienstleistungen und erweitert die Referenzen und damit Reputa-

tion des Ingenieurunternehmens hinsichtlich der Sanierung schwermetallbelasteter Standorte. Dies ist wiederum wäre von Vorteil für die Akquise von Beratungsleistungen z. B. bei den Landesämtern.

### **3.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)**

Die in diesem Projekt getesteten neuen Schwertmannitadsorbentien führten zur erfolgreichen Immobilisierung von Schwermetallen im Boden, so dass demnach eine Verbesserung der technischen Eigenschaften der durch G.E.O.S. entwickelten Adsorbentien erreicht wurde. Durch die erstmalige erfolgreiche Anwendung der Adsorbentien in Böden konnten neue Anwendungsbereiche und Anwendungspartner identifiziert werden. Die internationale Zusammenarbeit ergab weitere Anknüpfungspunkte für die Anwendung außerhalb Deutschlands.

Die herkömmliche Strategie des Kalkens von Böden zur Schwermetallimmobilisierung hatte meist weniger Einfluss auf die Arsenimmobilisierung. Durch die Kombination von Eisenagglomerat und Puffer in einem Produkt können nun bessere Ergebnisse hinsichtlich der Immobilisierung eines breiteren Spektrums an Kontaminanten (As, Cd, Pb) erzielt werden. Bestätigen sich die Ergebnisse in weiteren Feldversuchen, wird durch diese Technologie auch eine nachhaltige Bewirtschaftung von Flächen möglich sein, die bisher nur eingeschränkt landwirtschaftlich genutzt werden können.

Durch die Durchführung eines Stakeholderworkshops in Deutschland, die Teilnahme am Workshop in Verdun und an Fachkonferenzen und Tagungen wurden die neuen Erkenntnisse und Informationen zur Technologieentwicklung veröffentlicht und einem breiten potentiellen Anwenderkreis vorgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse mit Bodenproben vom Freiburger Standort wurden in enger Zusammenarbeit mit dem LfULG und der BfUL ausgewertet und ermöglichen deren Anwendung als Basis für weitere Studien oder zur Entwicklung von Handlungsempfehlungen. Ergebnisse aus dem Projekt wurden zum Beispiel durch das LfULG nach Projektende bei den Sächsischen Bodenschutztagen und unter Beteiligung von G.E.O.S. auf der SETAC-Konferenz in Helsinki vorgestellt und damit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Gelingt es weiterhin durch eine erfolgreiche Verwertung der Schwertmannitadsorbentien das mikrobielle Verfahren zur Wasserbehandlung Eisen(II)haltiger Gruben- und Sickerwässer zur Anwendung zu bringen, könnten die Ergebnisse des AgriAs-Projektes indirekt einen Beitrag zur Ressourcenschonung (Einsparung von Kalk und Energie im Vergleich zur konventionellen Wasserbehandlung) leisten.

### **3.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Gefäßversuche wurden unter homogenen Grundbedingungen durchgeführt, die im Feldversuch durch kleinräumige Änderungen der Bodeneigenschaften und des Mikroklimas nicht gegeben sind. Die guten Ergebnisse der Technologieanwendung in Gefäßversuchen sollten daher unbedingt in Feldversuchen verifiziert werden. Ein wichtiger Aspekt ist dabei zu untersuchen, wie sich die Eisenagglomerate im Boden über längere Zeit verhalten, um eine spätere Elution der gebundenen Schwermetalle zu vermeiden. Daher wird mit dem LfULG über eine Übertragung der Versuche in den Feldmaßstab diskutiert.

Weiterhin wurde durch die ganzheitliche statistische Auswertung einer Vielzahl von Parametern bereits deutlich, welche große Rolle geo- und biochemische Wechselwirkungen bei der Technologieanwendung einnehmen. Für zukünftige durch die Landesämter geplante Untersuchungen und Studien

werden aufgrund von G.E.O.S. Beratungsleistungen angeboten, um die in AgriAs erlangten Erkenntnisse einzubringen und eventuelle Wissenslücken auszufüllen.

G.E.O.S. ist derzeit aktiv involviert im Vita-Min-Projekt, Teilprojekt 2.1 zur Nutzung der Abprodukte aus Wasserreinigungsanlagen als Wertstoffe, um Möglichkeiten zur Verwertung von Wasserwerkschlamm auf Eisenhydroxidbasis zu finden. Hier soll das in AgriAs erlangte Wissen eingebracht werden, um gemeinsam mit dem LfULG neue Wege zur Verwertung solcher Reststoffe abzustimmen.

Die wissenschaftliche Ergebnisverwertung nach Projektende wird fortgeführt, indem G.E.O.S. sich aktiv an den im Projektverbund geplanten Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften beteiligt.

#### **4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Es gab keine Arbeiten im Teilprojekt von G.E.O.S. die zu keiner Lösung geführt haben.

#### **5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

Durch Beteiligung an der SETAC-Konferenz, die AgriAs-Website und geplante Fachbeiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften, können sich mögliche Nutzer auch nach Projektende über Projektinhalte und –ergebnisse informieren.