

Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell

Schriftenreihe, Heft 30/2013



Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell

Kati Kardel, Heiko Ihling, Christina Illgen, Sabine Gruhne, Dr. Arnd Bräunig, Ron Tannert, Ruth Hoffmann,
Aline Kästner
Sabine Wilscher, Verena Enzner, Denise Kühn, Doreen Knippert, Peggy Schuster, Thomas Fichtner
Henry Schlönvoigt
Ivo Paffrath
Claus Nitsche, Norbert Hüasers, Stephan Klotzsch, Theresa Albert
Thomas Vienken, Peter Dietrich, Denise Umoh, Kay Knöller, Christina Jeschke
Tilo Vogel

1	Aktualisierte Erosionsgefährdungskarten Freistaat Sachsen.....	5
2	Stoffliche Untersuchungen von Hochflutsedimenten und Auenböden nach dem Hochwasser 2013	12
3	Bodenwasserhaushaltsmodellierung im Rahmen der Analyse von Stoffkreisläufen auf Bodendauerbeobachtungsflächen.....	14
3.1	Einleitung und Zielstellung.....	14
3.2	Modellierung des Bodenwasserhaushalts der BDF zur Ermittlung von Sickerwassermengen	14
3.3	Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung	15
3.4	Zusammenfassung	16
3.5	Literatur	16
4	Sächsisches Altlastenkataster – Statistische Auswertung 2013	17
5	Tracerversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens MNA/ENA in Wülknitz	23
5.1	Einleitung.....	23
5.2	Errichtung einer Feldversuchsanlage	24
5.3	Tracerversuche	26
5.3.1	Tracerversuch 1	26
5.3.2	Tracerversuch 2	26
5.3.3	Tracerversuch 3	27
5.4	Zusammenfassung	29
6	Untersuchung des Elutionsverhaltens organischer und anorganischer Stoffe aus organischen Düngemitteln mit Hilfe von Perkolationsversuchen.....	31
7	Projekt „Qualifizierung Bodenschätzung“	43
7.1	Ausgangssituation	43
7.2	Zuständigkeiten bei der Umsetzung des Bodenschätzungsgesetzes.....	43
7.2.1	Datenerhebung (Finanzverwaltung)	43
7.2.2	Datendigitalisierung (Vermessungsverwaltung)	44
7.2.3	Datenbestand, Datenformate, Datenaustausch.....	44
7.2.4	Datenauswertung (Umweltverwaltung).....	44
7.3	Nutzerkreis der digitalen Bodenschätzungsdaten innerhalb des LfULG.....	45
7.4	Projekt Qualifizierung Bodenschätzung.....	46
7.5	Arbeitsstand November 2013	47
7.6	Testergebnisse	48
7.7	Ausblick 2014	49
7.8	Nutzerkreis der digitalen Bodenschätzungsdaten außerhalb des LfULG	49
8	Bewertung der Schwermetallbelastung im Grundwasser gemäß Grundwasserverordnung am Beispiel des als diffus belastet eingestuften GWK FM 1	50
8.1	Einleitung.....	50
8.2	Aufgaben- und Zielstellungen der Auswertung der vorliegenden Daten.....	51
8.3	Durchgeführte Arbeiten zur Realisierung der Zielstellungen	52
8.4	Grundwasserstandsmessung und Hydrodynamik	53
8.5	Ergebnisse der Datenrecherche, der Trendbewertung und der Regionalisierung der Grundwasserbeschaffenheit.....	55
8.5.1	Standorte mit relevantem Schadstoffpotenzial für die Schwermetallbelastung im Grundwasser	55
8.5.2	Trendbewertung der GWM im GWK FM 1.....	62
8.5.3	Regionalisierung.....	63
8.6	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick.....	65
8.7	Literaturverzeichnis	67
9	Methoden zur Bestimmung der Aquifer- und Kippsubstrateigenschaften in einer Bergbauregion – Fallbeispiel Braunkohlentagebau Nochten	68
9.1	Einleitung.....	68
9.2	Aufgaben- und Zielstellung.....	69

9.3	Hydrogeologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet innerhalb des Tagebaus Nochten	69
9.3.1	Hydrogeologischer Profilschnitt 1	70
9.3.2	Hydrogeologischer Profilschnitt 2	72
9.4	Physikochemische Untersuchungen	73
9.5	Mikrobiologische Untersuchungen	74
9.6	Isotopenhydrologische Untersuchungen	77
9.6.1	Anwendungsbereich und Bewertung	78
9.7	Bodenkundliche Untersuchungen	82
9.8	Resümee	83
9.9	Literatur	85

1 Aktualisierte Erosionsgefährdungskarten Freistaat Sachsen

Dr. Arnd Bräunig – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Der Freistaat Sachsen hat aufgrund seiner Naturraumausstattung (Relief, Böden und Regenerosivität) ein hohes Gefährdungspotenzial bezüglich Bodenerosion durch Wasser. Flächen, die eine dauerhafte Vegetationsbedeckung aufweisen (Dauergrünland, Wald) sind gewöhnlich gut vor Bodenerosion geschützt. Dagegen weisen rund 60 % der Ackerfläche Sachsens ein hohes bis sehr hohes Erosionsgefährdungspotenzial auf.

In den letzten Jahren wurden neue Datengrundlagen erarbeitet, die eine aktuelle Bewertung der Erosionsgefährdung erforderte. Gegenüber den bisher vorliegenden Erosionsgefährdungskarten liegen nun räumlich differenziertere und aktualisierte Erosionsgefährdungskarten vor.

Bodenerosion kann eine schädliche Bodenveränderung hervorrufen, die nach § 4 Bundesbodenschutzgesetz abzuwehren oder zu sanieren ist. Auf die Frage, ob eine schädliche Bodenveränderung vorliegt, gibt die aktuell vom LfULG herausgegebene Arbeitshilfe „Gefahrenabwehr bei Bodenerosion“ Hinweise.

Übersicht Erosionsgefährdungskarten

- Karte der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hangneigung und Regenerosivität (KSR-Karte)
- Karte der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hanglänge, Hangneigung und Regenerosivität (KLSR-Karte)
- Karte der besonders erosionsgefährdeten Steillagen
- Karte der besonders erosionsgefährdeten Abflussbahnen

Die Karten und auch die Arbeitshilfe stehen unter <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/26160.htm> zur Verfügung.

Folgende Datengrundlagen gingen in das vorliegende Kartenwerk ein:

- Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (BK50)
Quelle: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) 2012
- Digitales Geländemodell im 5 m-Raster (DGM5), generalisiert aus DGM2
Quelle: Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) 2012
- Niederschlagsreihen von 1993 bis 2012
Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD) 2013

Karte der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hangneigung und Regenerosivität (KSR-Karte)

Die **KSR-Karte** zur potenziellen Bodenerosionsgefährdung durch Wasser basiert auf der „Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung“ (ABAG). Diese wird im gesamten Bundesgebiet angewendet und ist in der DIN 19708 dokumentiert. Die Karte beschreibt die standörtliche flächenhafte potenzielle Erosionsgefährdung unabhängig von den aktuellen Landnutzungen und der erosiven Hanglänge. Lineare Erosionsformen wie Erosionsrinnen und -gräben werden bei dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

Die Berechnung erfolgt durch die Verknüpfung von Bodenart (unter Heranziehung des K-Faktors als Kenngröße für die Erosionsanfälligkeit einer Bodenart), Hangneigung (S-Faktor) und der langjährig durchschnittlichen Regenerosivität (R-Faktor). Die KSR-Karte zur Erosionsgefährdung liegt flächendeckend für Sachsen im 5-m-Raster als GRID vor.

Die Einstufung der potenziellen Erosionsgefährdung beruht auf der DIN 19708 (Tabelle 1). Die Erosionsgefährdungsstufen $CC_{\text{Wasser}1}$ und $CC_{\text{Wasser}2}$ werden im Rahmen der Cross Compliance-Regelungen vorgenommen (DirektZahlVerpflV vom 27.02.2009). Für die administrative CC-Abwicklung wird jeder Feldblock hinsichtlich seiner durchschnittlichen Erosionsgefährdung bewertet (flächengewichteter Mittelwert der Erosionsgefährdung eines Feldblockes). Mit der CC-Einstufung sind Mindestanforderungen an die ackerbauliche Bewirtschaftung verknüpft.

Tabelle 1: Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hangneigung und Regenerosivität (K*S*R-Faktor)

Stufe Code	Wert aus K*S*R	% von Sachsen	% von LN	% von AL	Einstufung DIN 19708	Einstufung Cross Compliance
1	<2,5	16	15	15	1 = sehr geringe	
2	2,5 - <5	12	12	13	2 = geringe	
3	5 - <7,5	8	8	8	3 = mittlere	
4	7,5 - <15	15	16	18	4 = hohe	
5	15 - <27,5	18	20	21	5 = sehr hohe	$CC_{\text{Wasser}1}$
6	27,5 - <65	21	22	21		$CC_{\text{Wasser}2}$
7	>=65	10	7	4		

% = Flächenanteile (5-m-Rasterzellen) bezogen auf Sachsen, landwirtschaftlich genutzte Fläche und Ackerland nach Feldblockgrenzen Dezember 2012

Karte der Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hanglänge, Hangneigung und Regenerosivität (KLSR-Karte)

Die **KLSR-Karte** berücksichtigt zusätzlich zu den K-, S-, R-Faktoren die erosiven Hanglängen (L-Faktor) bezogen auf den jeweiligen Feldblock. Für die Berechnung des L-Faktors wird angenommen, dass einerseits die Feldblockgrenzen die erosionswirksame Hanglänge unterbrechen (d. h. als Barriere für den Oberflächenabfluss wirken) und andererseits innerhalb des Feldblocks keine weiteren Barrieren vorhanden sind, die die erosionswirksame Hanglänge verkürzen. Der Berechnungswert aus den Faktoren KLSR steht für den Bodenabtrag eines dauerhaft unbedeckten Bodens (Schwarzbrache). Auf Grundlage dieser Auswertungskarte kann durch die Berücksichtigung des C-Faktors der Bodenabtrag für die tatsächlichen Bedingungen kalkuliert werden.

Die ABAG-Ergebnisse stehen für den langjährigen mittleren flächenhaften Bodenabtrag in Tonnen pro Hektar und Jahr. Die KLSR-Karte zur Erosionsgefährdung liegt für die landwirtschaftlich genutzte Fläche (Feldblockgrenzen) im 5-m-Raster als GRID vor.

Tabelle 2: Erosionsgefährdung in Abhängigkeit von Bodenart, Hanglänge, Hangneigung und Regenerosivität (K*L*S*R-Faktor)

Stufe Code	Wert aus K*L*S*R t ha ⁻¹ a ⁻¹	% von LN	% von AL
1	<5	24	25
2	5 - <10	12	12
3	10 - <15	8	8
4	15 - <30	16	17
5	30 - <55	16	16
6	55 - <130	17	17
7	>=130	7	5

% = Flächenanteile (5-m-Rasterzellen) bezogen auf landwirtschaftlich genutzte Fläche und Ackerland nach Feldblockgrenzen
Dezember 2012

Karte der besonders erosionsgefährdeten Steillagen

Die Auswertungskarte der Steillagen grenzt auf der Grundlage der ABAG in Abhängigkeit von der Hangneigung (S-Faktor) und der Bodenart (K-Faktor) besonders erosionsgefährdete Steillagen ab.

Das Shape zu den Steillagen grenzt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Standorte ab, die einen Wert aus K*S >= 1 haben und zusammenhängend mindestens 0,3 ha groß sind.

Ein Wert aus K*S >= 1 ergibt sich z. B. aus

- einer Hangneigung von 15 % und einer hoch erosionsanfälligen Bodenart (Ut3 mit K-Faktor 0,56), die in den sächsischen Lösshügelländern weit verbreitet ist,
- einer Hangneigung von 21 % und einer mittel erosionsgefährdeten Bodenart (Slu, Gr2 mit K-Faktor 0,36), die im sächsischen Mittelgebirge verbreitet ist.

Nach diesen Kriterien gibt es auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Sachsen rund 20.000 ha Steillagen, wovon der größte Anteil durch Dauergrünland gut vor Erosion geschützt ist. Etwa 5.200 ha der Steillagen liegen innerhalb von Ackerland-Feldblöcken und haben eine zusammenhängende Fläche von mindestens 0,3 ha. Diese Standorte sollten zukünftig durch eine dauerhafte Vegetationsdecke vor Bodenerosion geschützt werden. Eine nachhaltige ackerbauliche Nutzung dieser Standorte ist nur durch sehr umfassende Erosionsschutzmaßnahmen möglich (z. B. Direktsaatverfahren).



Abbildung 1: Ackerbaulich genutzte Steillage mit Bodenerosion

Karte der besonders erosionsgefährdeten Abflussbahnen

Nach einem Starkregenereignis konzentriert sich das an der Bodenoberfläche ablaufende Regenwasser temporär in natürlich vorhandenen Abflussbahnen (Tiefenlinien) des Reliefs und führt bei einem ungeschützten Boden zu Tiefenerosion.

Die Karte der erosionsgefährdeten Abflussbahnen hebt Standorte hervor, die aufgrund einer reliefbedingten Abflusskonzentration einer besonders hohen Erosionsgefährdung unterliegen. Das Shape zu den Abflussbahnen grenzt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Abflussbahnen ab, die zusammenhängend mindestens 0,3 ha groß sind. Rund 10.000 ha der Abflussbahnen befinden sich auf landwirtschaftlich genutzter Fläche, wovon 5.100 ha ackerbaulich genutzt werden.

Die Ableitung der Standorte basiert auf den Auswertungen der ABAG und des Reliefparameters „rasterbezogene Einzugsgebietsgröße“. Durch die Verknüpfung beider Sachverhalte kann die erosive Wirkung der Abflusskonzentration qualitativ abgeleitet werden.

Besonders erosionsgefährdete Abflussbahnen sollten durch eine dauerhafte Vegetationsdecke vor Erosion geschützt werden.



Abbildung 2: Linienhafte Bodenerosion entlang von reliefbedingten Abflussbahnen in einem Acker-schlag (Foto: Fred Franzke)

Anhang: Beispiele zu Erosionsgefährdungskarten

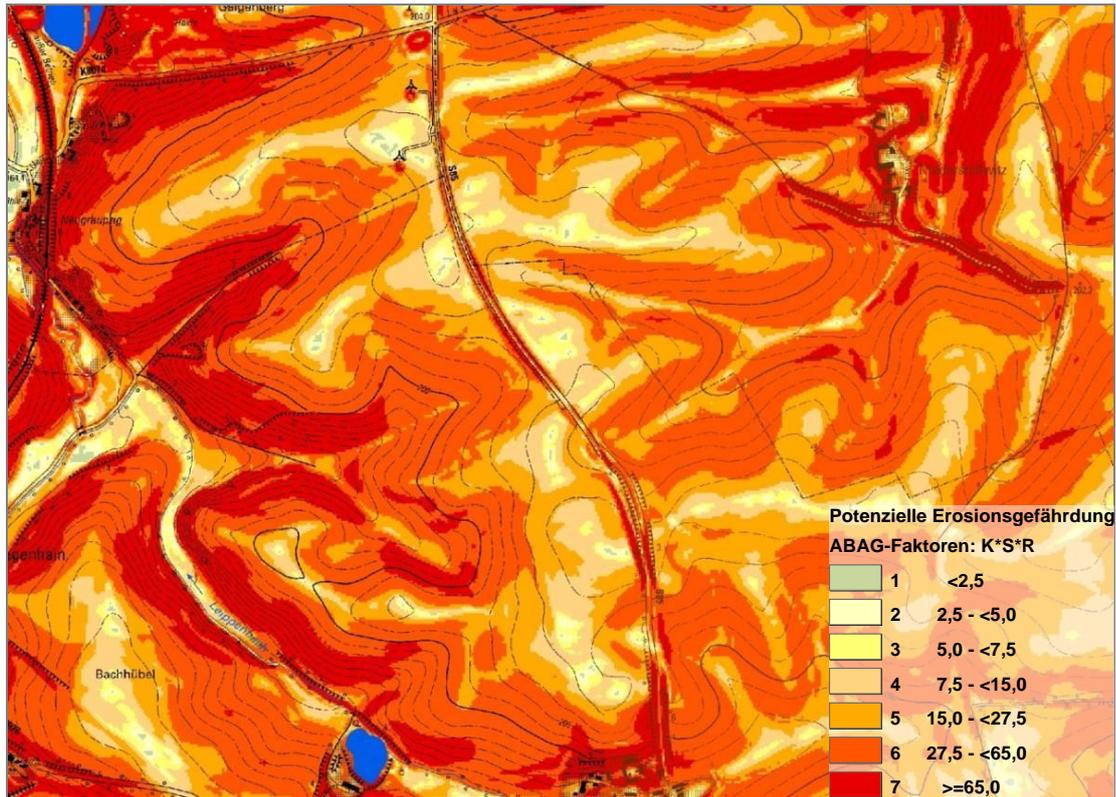


Abbildung 3: Potenzielle Erosionsgefährdung: KSR-Karte mit topografischem Hintergrund (TK10 GeoSN)

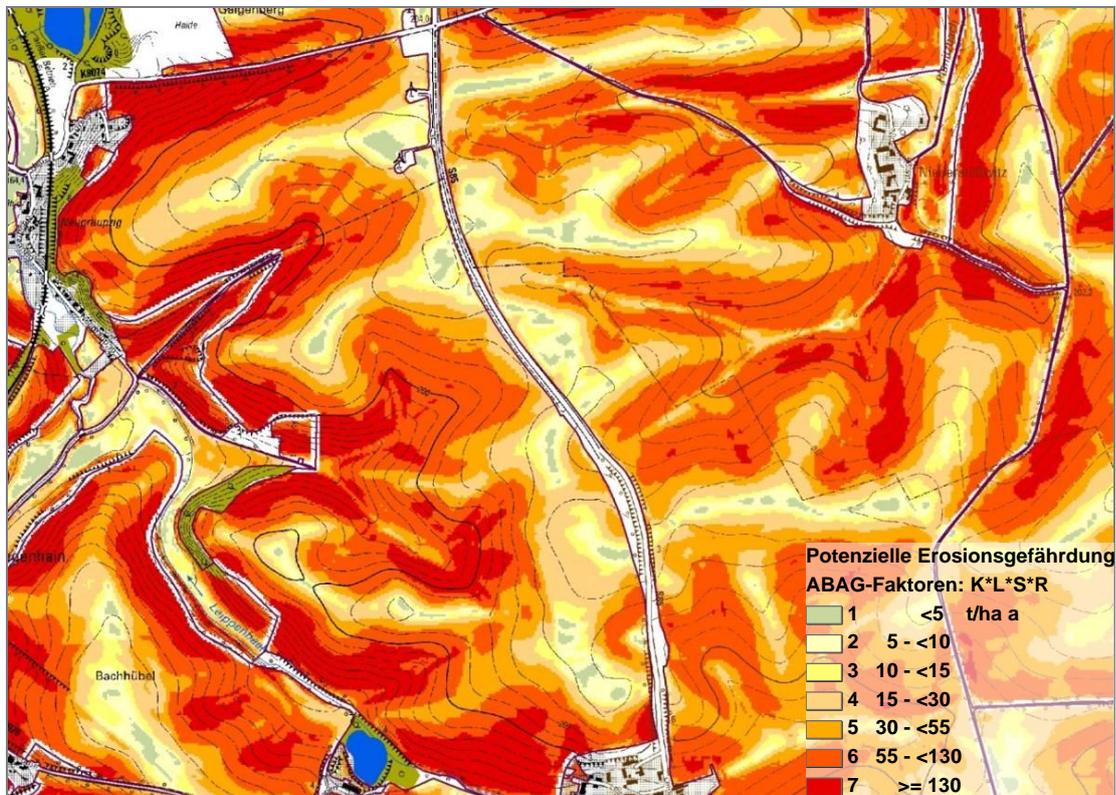


Abbildung 4: Potenzielle Erosionsgefährdung aller landwirtschaftlich genutzten Flächen unter Berücksichtigung der erosiven Hanglänge: KLSR-Karte mit topografischem Hintergrund (TK10 GeoSN)

Anhang: Beispiele zu Erosionsgefährdungskarten

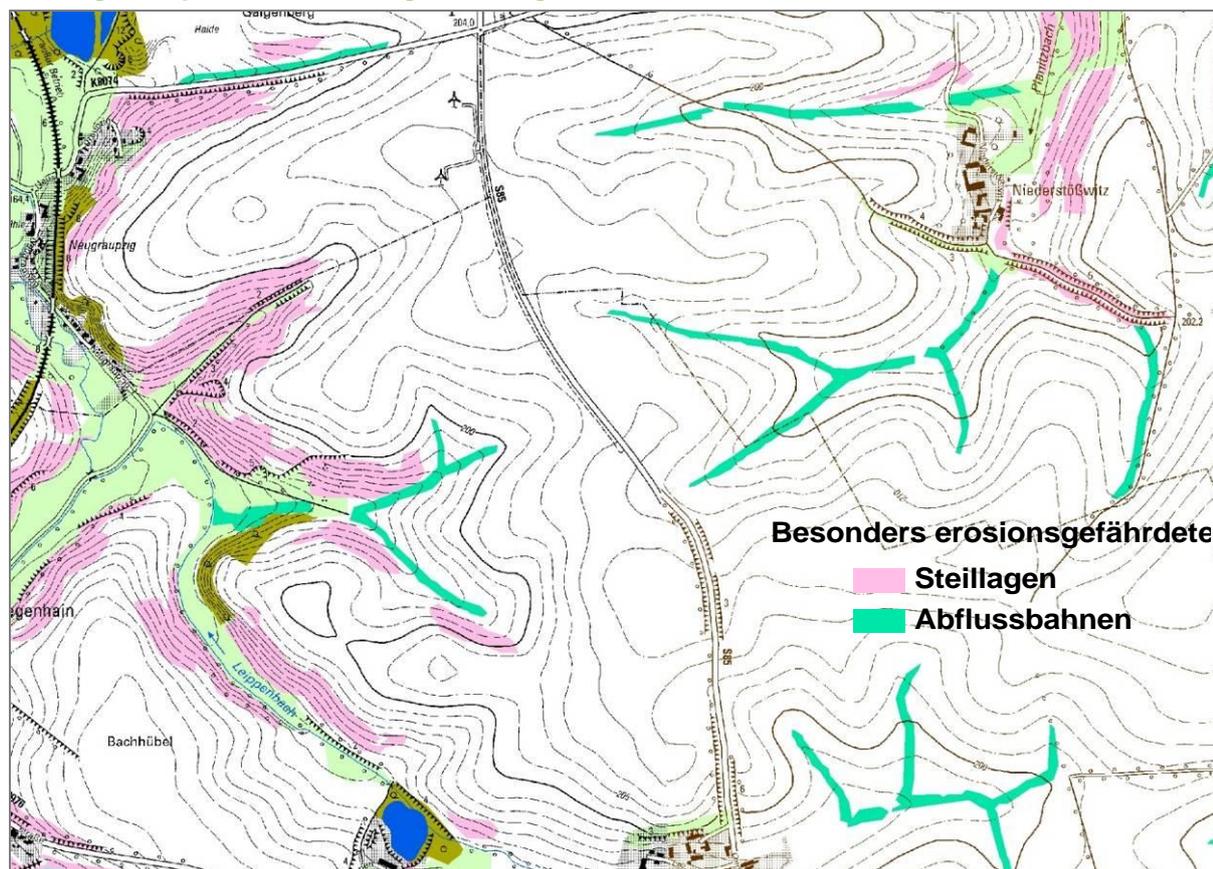


Abbildung 5: Karte der besonders erosionsgefährdeten Abflussbahnen und Steillagen mit topografischem Hintergrund (TK10 GeoSN)

Alle landwirtschaftlich genutzten Flächen sind bewertet (Feldblockgrenzen).

Hinweis

In der Karte können die erosionsgefährdeten Abflussbahnen teilweise unterbrochen sein. In der Realität ist dies meist nicht der Fall. Bei der Detailplanung und Umsetzung von Maßnahmen gegen Bodenerosion ist eine Geländebegehung erforderlich, um die besonderen örtlichen Gegebenheiten (Gräben, Straßendurchlässe etc.) berücksichtigen zu können.

2 Stoffliche Untersuchungen von Hochflutsedimenten und Auenböden nach dem Hochwasser 2013

Kati Kardel – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Vom 30.05. bis 03.06.2013 gingen über Südostdeutschland, Tschechien, Nordösterreich und der Nordostschweiz ergiebige Starkregenfälle nieder und verursachten an vielen Flüssen Hochwasser. Auch im Freistaat Sachsen waren in diesem Jahr wieder mehrere Flussgebiete von ausgedehnten Überschwemmungen betroffen, u. a. bereits im August 2002 überflutete Flächen an der Elbe, dem Muldensystem und ihren Nebenflüssen. Zusätzlich traten in diesem Jahr auch Überflutungen an der Weißen Elster, Pleiße, Parthe und an Flüssen der Lausitz auf.

Unmittelbar nach Rückgang des Hochwassers wurden neben den Schäden an Gebäuden und der Infrastruktur auch die Ablagerungen von Sedimenten erkennbar. Mit Blick auf die Erfahrungen vom Hochwasser 2002 bestand der Verdacht, dass für die hochwasserbedingten Ablagerungen von Sedimenten ein schadstoffbedingtes Risiko nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann.

Im LfULG wurde am 03.06.2013 ein Krisenstab zum Hochwasserereignis eingerichtet und das Referat Boden, Altlasten mit der Untersuchung der Hochflutsedimente beauftragt. Die Untersuchung erfolgte nach ihrer Dringlichkeit in zwei Etappen.

Erste Etappe

Die erste Etappe war ein schnelles Screening mit dem Ziel, erste Hinweise auf den stofflichen Zustand der Hochwassersedimente in Abhängigkeit vom Flusseinzugsgebiet zu erhalten. Dazu wurden an den vom Hochwasser betroffenen Flüssen 30 Standorte festgelegt (3 je Fluss) und diese umgehend nach Rückgang des Hochwassers von zwei externen Probenehmern beprobt und bodenkundlich angesprochen (KA 5).

Die Probenahmestandorte lagen an der Vereinigten, Zwickauer und Freiburger Mulde, an der Zschopau, Chemnitz, Weißen Elster, Pleiße, Parthe, Elbe und Neiße. An jedem Standort wurden eine Sedimentprobe und je eine Bodenprobe aus dem Ober- und Unterboden gewonnen.

Die Sediment- und Oberbodenproben wurden von der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) auf die Elemente Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Molybdän, Nickel, Blei, Antimon, Selen, Thallium und Zink im Königswasserextrakt und von der EUROFINS Umwelt Ost GmbH auf polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Cyanide und polychlorierte Biphenyle (PCB) untersucht.

Am 21.06. 2013 erfolgte die Veröffentlichung und Bewertung der Analysendaten der ersten Etappe im Internet.

Zweite Etappe

Die zweite Untersuchungsetappe schloss sich unmittelbar an. Sie umfasste stichprobenhafte verdichtende Untersuchungen an den o. g. Flüssen und ihren Zuflüssen nach Auswertung von Erkenntnissen aus der ersten Etappe auf Anforderung der unteren Bodenschutzbehörden in ihrem Zuständigkeitsbereich, im Abstrom von Altlasten und auf Flächen sensibler Nutzung.

In dieser Etappe wurden von den beiden Probenehmern 96 Standorte analog der ersten Etappe (Sediment, Ober- und Unterboden) beprobt und 192 Sediment- und Oberbodenproben an die o. g. Labore zur Analytik übergeben.

Die Analysenpalette in der zweiten Etappe umfasste zusätzlich die Elemente Uran und Kobalt und an wenigen Proben erfolgten Analysen auf Arsen und Metalle im Ammoniumnitratextrakt und auf PCDD/F und dl-PCB. Cyanide und PCB(7) wurden nach einem unauffälligen Befund in der ersten Etappe aus dem Analysenprogramm gestrichen.

Ende August lagen alle Analysen der Sedimente und Oberböden von den insgesamt 126 beprobten Standorten der ersten und zweiten Etappe im LfULG vor. Die Analytik der Unterbodenproben erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigten, dass die Gehalte von Arsen und Schwermetallen in den Sedimenten von 2013 deutlich niedriger waren als die nach dem Hochwasser von 2002. Die Gehalte in den Sedimenten lagen bis auf wenige Ausnahmen unter denen der Oberböden am gleichen Standort. Es erfolgte i. d. R. keine Verschlechterung der stofflichen Situation am Sedimentationsort.

Die MKW-, Benzo(a)pyren(BaP)- und PCB-Gehalte waren in den Sedimenten häufig unterhalb der Bestimmungsgrenzen, die Cyanide unauffällig.

Überschreitungen von Wertekategorien der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) für landwirtschaftliche Nutzungen in den Gehalten der Sedimente traten hauptsächlich im Muldensystem für Arsen, Cadmium und Blei durch Verlagerung der bereits belasteten Auenböden auf.

Proben im Abstrom von Altlasten hatten bis auf zwei Ausnahmen gebietstypische Elementgehalte in Sedimenten und Oberböden. Durch Sicherungsmaßnahmen der im Bereich der Freiburger Mulde liegenden Schlackenhalde der Saxonia Freiberg am Standort Muldenhütten wurden in diesem Jahr deutlich weniger Schadstoffe aus den Halden ausgefragt und entlang des Flusslaufes sowie bis in die Vereinigte Mulde verlagert als beim Hochwasser 2002.

Die Sedimente der Pleiße, Parthe, Weißen Elster und Neiße wiesen vereinzelt Überschreitungen von industriell eingetragenen Stoffen in Verdichtungsräumen auf.

Insgesamt ist die Belastung der Hochflutsedimente mit anorganischen und organischen Schadstoffen in diesem Jahr und damit auch die Betroffenheit von Schutzgütern in dieser Hinsicht geringer als beim Hochwasser von 2002 einzuschätzen. Belastete Sedimente traten fast ausschließlich über den belasteten Auenböden der entwässernden Flüsse der sächsischen Bergbau- und Mineralisationsgebiete (Muldensystem) auf und sind durch Verlagerung derselben entstanden.

3 Bodenwasserhaushaltsmodellierung im Rahmen der Analyse von Stoffkreisläufen auf Bodendauerbeobachtungsflächen

Ron Tannert – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

3.1 Einleitung und Zielstellung

Ziel des FuE-Projektes „Analyse von Kohlenstoff- und Stickstoffkreisläufen an repräsentativen Standorten (BDF) Sachsens“ ist es, Bilanzsalden für Kohlen- und Stickstoff zu erstellen, die sowohl als wichtige Indikatoren für die Bodenfruchtbarkeit eines Standortes als auch für zurzeit stattfindende oder zukünftige Stoffausträge (EU-WRRL) aus dem Boden in die Umwelt dienen. Beste Voraussetzung hierfür bieten die seit 15 Jahren mit Messreihen zahlreicher Parameter detailliert hinterlegten 55 Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) Sachsens (vgl. LfULG 2013). Der flächendeckend vorhandene BDF-Datenpool gestattet gute Bilanzierungsmöglichkeiten der Eintrags- (Düngung, Deposition) und Austragspfade (Sickerwasser, Ernteentzug) und bildet somit die Grundlage für das vorliegende Forschungsprojekt.

Für das Projektziel wurden folgende Arbeitsschritte definiert:

- Probenahme (Pflanze und Boden) auf den BDF
- Erfassung der jeweiligen Bewirtschaftungs- und Wetterdaten der BDF
- Auswertung der erhobenen Kohlen- und Stickstoffdaten der Böden, Pflanzen und Sickerwässer der BDF
- Modellierung des Bodenwasserhaushalts der BDF anhand der erfassten Daten
- Bilanzierung der Kohlen- und Stickstoffkreisläufe verschiedener Anbausysteme anhand der erfassten Daten

3.2 Modellierung des Bodenwasserhaushalts der BDF zur Ermittlung von Sickerwassermengen

Stoffausträge aus dem Boden finden auf vielfältigste Weise statt. Sie resultieren jedoch vorwiegend aus dem Entzug der Pflanzen bei Abfuhr der Ernteprodukte und aus der Auswaschung mit dem Sickerwasser. Für die Ermittlung der Sickerwassermenge an den BDF als eine der Voraussetzungen zur Berechnung des Stoffaustrages, erfolgte eine Quantifizierung des Bodenwasserhaushalts auf Grundlage von Modellberechnungen. Diese wurden mit dem Modell BOWAM durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein zweidimensionales konzeptionelles Boxmodell, welches entwickelt wurde, um die wesentlichen in der Aerationzone ablaufenden hydrologischen Prozesse zu modellieren (vgl. DUNGER 2002).

Für die Validierung der Modellergebnisse war es notwendig, die simulierten Wassergehalte der Böden mit realen, also gemessenen, Wassergehalten zu vergleichen. Daher wurden auf den 55 BDF an drei Terminen im Jahr (Frühjahr, Sommer, Herbst) Proben aus dem Ober- (0 bis 30 cm) und Unterboden (30 bis 60 cm) entnommen und anschließend der Wassergehalt im Labor bestimmt. Im Folgenden sind einige Beispiele der Modellergebnisse für das Jahr 2012 dargestellt.

3.3 Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung

Abbildung 1 zeigt die gemessenen und berechneten Wassergehalte (WG) des Oberbodens am Beispiel der BDF 5 (Lampersdorf) im Jahresverlauf. Der Vergleich zwischen den Wassergehalten zeigt dabei eine sehr hohe Kongruenz der Werte.

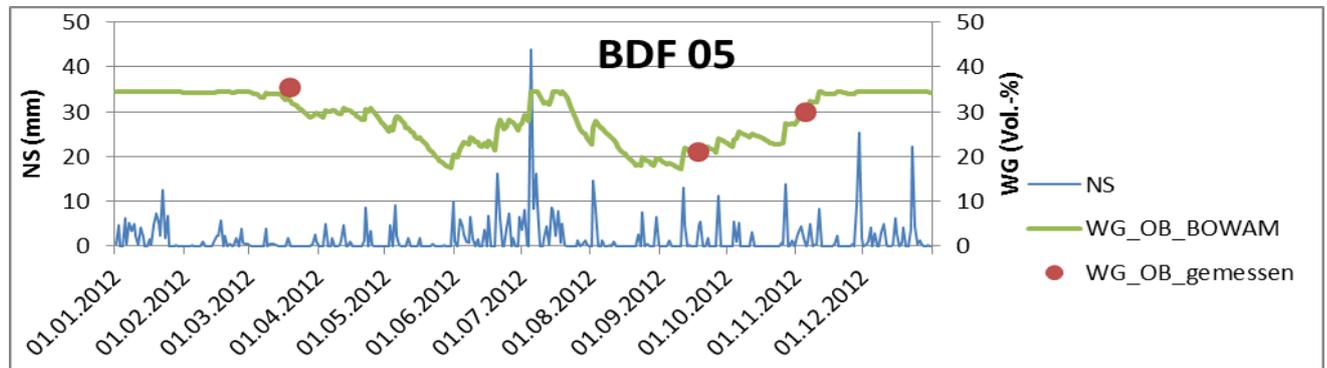


Abbildung 1: Gemessene und berechnete Wassergehalte der BDF 5 im Jahresverlauf

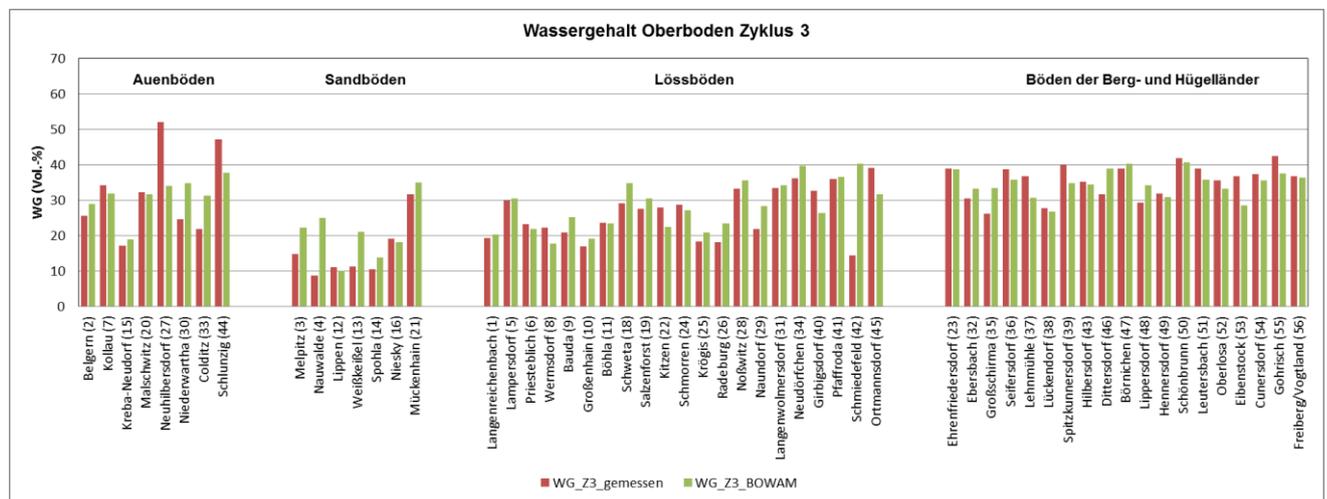


Abbildung 2: Gemessene und berechnete Wassergehalte aller BDF im Herbst 2012

Werden die gemessenen und berechneten Wassergehalte der Oberböden (im Herbst) aller BDF miteinander verglichen (Abbildung 2), so ist hier ebenfalls eine hohe Übereinstimmung der Werte festzustellen. Lediglich 7 % der modellierten Werte weichen um über 10 Vol.-% von den gemessenen Wassergehalten ab. Der Vergleich der Wassergehalte zu den verschiedenen Zeiträumen (Frühjahr, Sommer, Herbst) zeigt ein analoges Bild und somit ebenfalls hohe Übereinstimmungen. Größere Unsicherheiten bzw. Wassergehaltsabweichungen treten hingegen bei den Unterböden der BDF auf. Insgesamt weist hier im Durchschnitt ca. ein Viertel aller modellierten Wassergehalte Abweichungen von über 10 Vol.-% auf.

Dennoch hat sich gezeigt, dass die simulierten Wassergehalte die realen Wassergehalte gut abbilden und daher auch die modellierten Sickerwassermengen der jeweiligen Standorte den tatsächlichen Mengen näherungsweise entsprechen. So weisen erwartungsgemäß vor allem sandige Standorte sowie Böden der Berg- und Hügelländer die höchsten Sickerwasserraten auf. Die geringsten Sickerwassermengen hingegen werden in niederschlagsarmen Regionen und auf Lössstandorten gebildet (Abbildung 3).

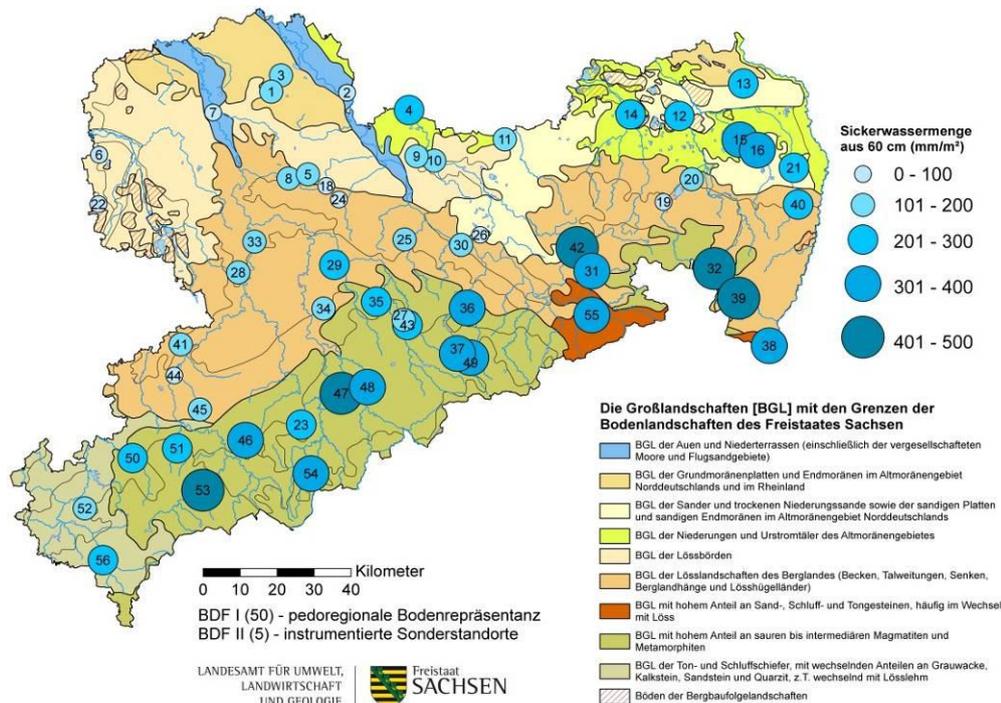


Abbildung 3: Modellierte Sickerwassermengen aus 60 cm im Jahr 2012

3.4 Zusammenfassung

Die ersten Ergebnisse des Bodenwasserhaushaltsmodells BOWAM zeigen, dass es für alle sächsischen Bodendauerbeobachtungsflächen möglich ist, den Bodenwasserhaushalt realitätsnah abzubilden. Insbesondere der Vergleich der Wassergehalte hat gezeigt, dass ein hoher Grad an Übereinstimmung vorliegt. Folglich können die projektrelevanten Sickerwasserraten genutzt werden, um die Stoffausträge durch Auswaschung unter definierten Bedingungen zu bestimmen.

3.5 Literatur

DUNGER, V. (2002): Dokumentation des Modells BOWAM (Version 2002) zur Simulation des Wasserhaushalts in der wasserungesättigten Bodenzone (Aerationszone). Freiberg.

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2013): Fachinformationssystem Boden – Bodenmonitoring. Dresden.

<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/bola_bdf_2013.pdf>

4 Sächsisches Altlastenkataster – Statistische Auswertung 2013

Sabine Gruhne – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Auswertung Sachsen

Im Sächsischen Altlastenkataster sind mit Stand Mai 2013 22.356 Altablagerungen, Altstandorte und Militärische Altlasten enthalten, die in 31.164 Teilflächen untergliedert sind. Im Archiv zum Sächsischen Altlastenkataster befinden sich 6.144 Flächen mit insgesamt 7.894 Teilflächen. Nach den einzelnen Flächenarten verteilt sich der Anzahl wie folgt:

Tabelle 1: Anzahl der SALKA-Flächen und Teilflächen in Sachsen (Stand Mai 2013)

Flächenart	Anzahl Flächen/Teilfläche	Anzahl Flächen/Teilflächen (Archiv)
Altstandort (AS)	14.005 / 21.090	4.756 / 5.811
Altablagerung (AA)	7.921 / 8.368	1.304 / 1.347
Militärische Altlasten (MR)	430 / 1.706	84 / 736

Nach der Erfassung der Standorte erfolgt eine stufenweise Bearbeitung entsprechend Bundesbodenschutzgesetz. Die Bearbeitung wird unterteilt in die Stufen

- Erfassung – Formale Erstbewertung (FEB) und Historische Erkundung (HE),
- Orientierende Untersuchung (OU),
- Detailuntersuchung (DU),
- Sanierungsuntersuchung (SU),
- Sanierung (San).

Im Ergebnis jeder Stufe wird ein Handlungsbedarf festgelegt, der den weiteren Umgang mit der Fläche bestimmt.

- Ausscheiden (A): Im Rahmen der Erkundung wurde kein Handlungsbedarf mehr festgestellt oder im Rahmen der Sanierung erfolgte die vollständige Dekontamination, die Fläche wird nur noch im Archiv des SALKA geführt.
- Belassen (B): Im Rahmen der Erkundung wurde bei der derzeitigen Nutzung kein Handlungsbedarf festgestellt oder trotz Sanierung der Altlast ist die Fläche noch nicht uneingeschränkt nutzbar.
- Erkunden/Sanierungsuntersuchung/Sanierung (E): Es sind weitere Maßnahmen nach BBodSchG erforderlich.
- Überwachen (C): Die Entwicklung der Schadstoffsituation bleibt unter Beobachtung oder nach der Sanierung ist eine weitere Überwachung der Fläche notwendig.
- Keine Angabe (k. A.): nach der Formalen Erstbewertung erfolgt noch keine Angabe zum Handlungsbedarf; bei höheren Stufen liegt die Information teilweise nicht vor.

Insbesondere bei der Bearbeitung großer Altstandorte ergeben sich unterschiedliche Gefährdungssituationen in abgrenzbaren Bereichen der Gesamtfläche, sodass diese für die weitere Bearbeitung in Teilflächen untergliedert werden. Auf den gebildeten Teilflächen eines Standorts können Bearbeitungsstand und Handlungsbedarf variieren. Die Abbildung 1 zeigt deren aktuellen Bearbeitungsstand und Handlungsbedarf.

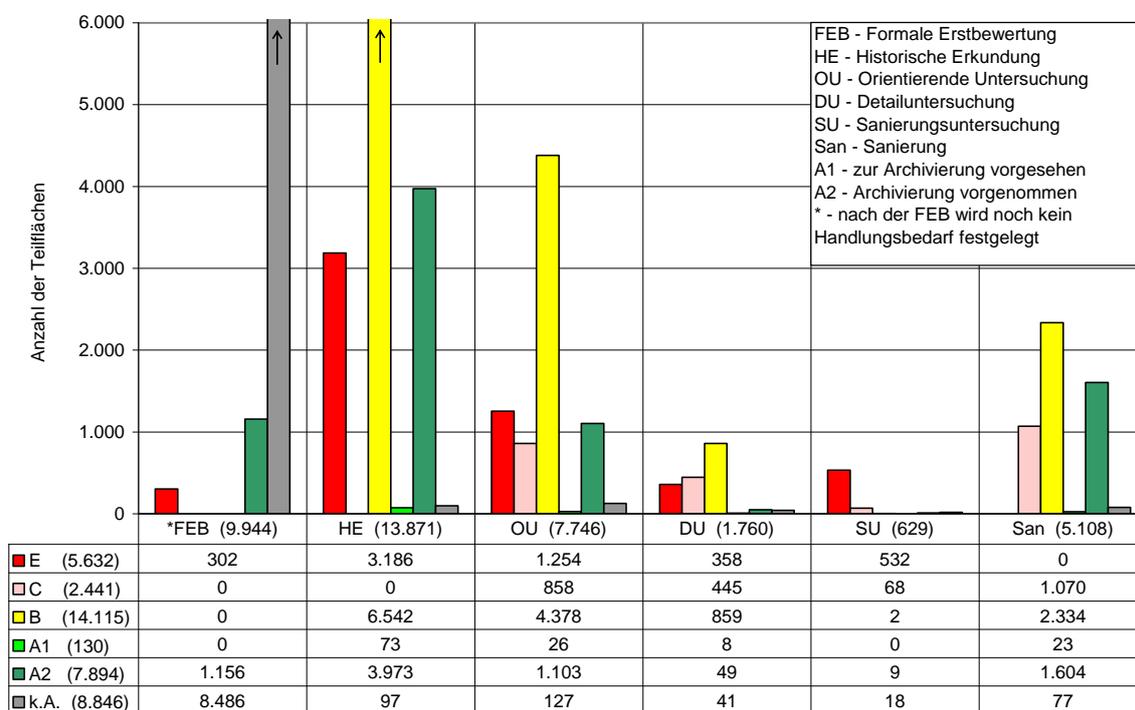


Abbildung 1: Bearbeitungsstand und Handlungsbedarf aller Teilflächen in Sachsen (LfULG, Stand Mai 2013)

Die Abbildung verdeutlicht, dass der größte Anteil bei den Flächen mit den Bearbeitungsständen Historische Erkundung, Formale Erstbewertung und Orientierende Untersuchung liegt. Bei diesem Stand der Untersuchung ist die Gefährdungsabschätzung noch nicht abgeschlossen und die Entscheidung, ob eine Altlast vorliegt und saniert werden muss, ist noch nicht gefallen. Anhand des festgelegten Handlungsbedarfs ist aber auch erkennbar, dass von den wenigsten Flächen eine akute Gefährdung für die Umwelt ausgeht. Nur auf Flächen, bei denen die Fortsetzung der Untersuchungen (Erkunden) bzw. die Sanierung notwendig ist, sind tatsächlich Maßnahmen erforderlich. Dazu kommen die Flächen, bei denen noch Überwachungsmaßnahmen laufen. Ergeben die Überwachungen, dass festgelegte Grenzwerte überschritten werden, sind auch hier Maßnahmen zur Abwendung der Gefährdung notwendig.

Zur Darstellung des bereits erreichten Bearbeitungsstandes (Abbildung 2) wurden die Teilflächen anhand des Bearbeitungsstandes und des festgelegten Handlungsbedarfs zu folgenden Gruppen zusammengefasst:

- Altlastverdacht ausgeräumt – die Untersuchungen haben den Verdacht nicht bestätigt; es sind keine Maßnahmen mehr vorzunehmen; Fläche wird nur noch im SALKA-Archiv geführt
- ALVF derzeit ohne Handlungsbedarf – bei der derzeitigen Nutzung besteht kein Handlungs- bzw. Untersuchungsbedarf; bei einer Änderung der Flächennutzung müssen eventuell erneut Maßnahmen ergriffen werden
- ALVF mit Handlungsbedarf – auf der Fläche besteht Handlungs- bzw. weiterer Untersuchungsbedarf zur Gefährdungsabschätzung

- Altlast – der Sanierungsbedarf wurde festgestellt
- Sanierte Altlast – die Sanierung wurde abgeschlossen; ggf. besteht noch Überwachungsbedarf

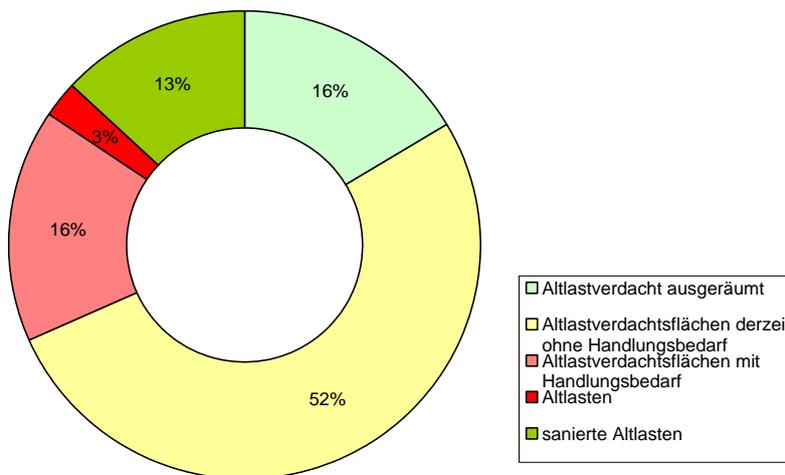


Abbildung 2: Stand der Altlastenbearbeitung (LfULG, Stand Mai 2013)

Bei altlastverdächtigen Flächen mit Handlungsbedarf ist die abschließende Gefährdungsabschätzung durch die zuständige Behörde zu veranlassen. Dies betrifft insgesamt 6.310 Teilflächen. Auf altlastverdächtige Flächen ohne Handlungsbedarf (20.265 Teilflächen) können Maßnahmen zur Gefährdungsabschätzung nötig werden, wenn Baumaßnahmen oder Flächennutzungsänderungen vorgenommen werden. Die Notwendigkeit von Sanierungsmaßnahmen ist derzeit auf 978 Teilflächen festgestellt. Bisher konnten auf 5.108 Teilflächen die Sanierungen abgeschlossen werden.

Auswertung Landkreise

Die im Sächsischen Altlastenkataster enthaltenen Flächen und Teilflächen verteilen sich auf die einzelnen Landkreise und kreisfreien Städte unterschiedlich. Das ist im Wesentlichen auf unterschiedliche wirtschaftliche Entwicklungen in der Vergangenheit zurückzuführen. So sind in den ehemaligen industriellen Zentren verstärkt Altstandorte anzutreffen, während in den ländlich geprägten Regionen der Anteil der Altablagerungen an der Gesamtanzahl der Flächen höher ist. In der Tabelle 2 sind die Summen der pro Landkreis und Flächenart erfassten Anzahl der Flächen/Teilflächen vermerkt. Die Verteilung der Anzahl der Teilflächen auf die einzelnen Landkreise/kreisfreien Städte zeigt außerdem Abbildung 3.

Tabelle 2: Anzahl der Flächen und Teilflächen in den einzelnen Landkreisen/kreisfreien Städten Sachsens (Stand Mai 2013, ohne Archiv)

Landkreis/kreisfreie Stadt	Anzahl der Flächen				Anzahl der Teilflächen			
	AA	AS	MR	Gesamt	AA	AS	MR	gesamt
Bautzen	1.338	898	50	2.286	1.412	2.119	266	3.797
Chemnitz, Stadt	211	608	22	841	303	1.138	52	1.493
Dresden, Stadt	294	1.217	24	1.535	320	1.476	96	1.892
Erzgebirgskreis	583	1.217	30	1.830	613	1.746	53	2.412
Görlitz	830	1.389	29	2.248	848	2.305	136	3.289
Leipzig	667	1.055	39	1.761	714	1.410	135	2.259
Leipzig, Stadt	213	1.587	24	1.824	232	2.639	179	3.050
Meißen	718	1.233	56	2.007	741	1.809	484	3.034
Mittelsachsen	778	1.225	30	2.033	811	1.556	50	2.417
Nordsachsen	581	615	62	1.258	601	949	146	1.696
Sächsische Schweiz-Osterzgebirge	675	861	14	1.550	687	1.210	33	1.930
Vogtlandkreis	503	754	29	1.286	516	1.049	41	1.606
Zwickau	530	1.346	21	1.897	570	1.684	35	2.289
Freistaat Sachsen	7.921	14.005	430	22.356	8.368	21.090	1.706	31.164

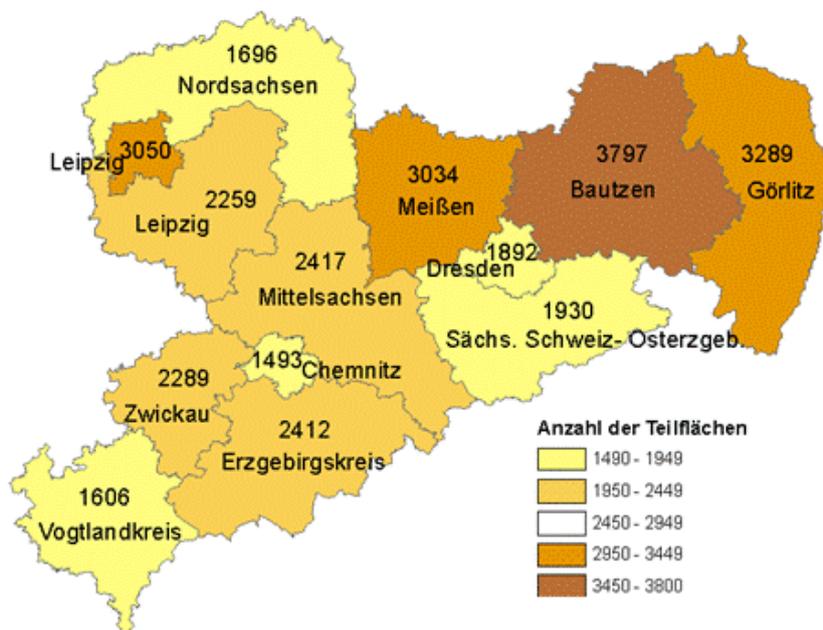


Abbildung 3: Verteilung der Teilflächen in den einzelnen Landkreisen/kreisfreien Städten Sachsens (LfULG, Stand Mai 2013)

Die größte Anzahl besitzt der flächenmäßig größte Landkreis Bautzen, gefolgt von den Landkreisen Görlitz und Meißen sowie der Stadt Leipzig. Berücksichtigt man die zur Verfügung stehende Fläche, treten die kreisfreien Städte mit den höchsten Konzentrationen hervor. Es wurden für die Stadt Leipzig 6,1; für die Stadt Dresden 4,7 und für die Stadt Chemnitz 3,8 Teilflächen pro km² ermittelt.

Bei allen Landkreisen/kreisfreien Städten überwiegt die Anzahl der Altstandorte. In den kreisfreien Städten ist der Anteil der Altstandorte deutlich erhöht. In der Stadt Leipzig sind 87 % aller Teilflächen Altstandorte, in der Stadt Dresden sind es 78 % und in Chemnitz 76%.

Die Landkreise mit dem höchsten Anteil von Altablagerungen auf ihrem Gebiet bezogen auf die Gesamtanzahl ihrer Teilflächen sind Bautzen mit 37 %, Sächsische Schweiz-Osterzgebirge mit 36 % und Nordsachsen mit 35 %.

Die Militärischen Altlasten sind insgesamt von geringerer Anzahl, jedoch ist ihre Bedeutung wegen des Gefährdungspotenzials und der Flächengröße nicht zu vernachlässigen. Den größten Anteil weisen die Landkreise Meißen (16 %), Nordsachsen (9 %) und Bautzen (7 %) auf.

Die Zuordnung zu den Gruppen altlastverdächtige Fläche (ALVF), Altlast (AL) und sanierte Altlast erfolgt entsprechend dem Bearbeitungsstand und dem festgelegten Handlungsbedarf. Tabelle 3 und Abbildung 4 zeigen die Verteilung dieser Gruppen auf die einzelnen Landkreise/kreisfreien Städte.

Tabelle 3: Anzahl der Teilflächen nach Kategorien in den einzelnen Landkreisen/kreisfreien Städten Sachsens (Stand Mai 2013)

Landkreis/kreisfreie Stadt	Ohne Archiv				Archiv ³		Summe
	ALVF	Altlast	Sanierte Altlast ¹	Keine Altlast ²	Keine Altlast	Sanierte Altlast	
Bautzen	3 060	106	631	0	299	79	4.175
Chemnitz, Stadt	1.262	43	188	0	210	86	1.789
Dresden, Stadt	1.593	72	224	3	1.074	320	3.286
Erzgebirgskreis	2.098	77	233	4	581	120	3.113
Görlitz	2.811	91	377	10	359	91	3.739
Leipzig	1.833	144	281	1	799	50	3.108
Leipzig, Stadt	2.747	69	232	2	780	108	3.938
Meißen	2.658	57	317	2	318	516	3.868
Mittelsachsen	2.102	72	242	1	797	61	3.275
Nordsachsen	1.478	32	186	0	350	41	2.087
Sächsische Schweiz-Osterzgebirge	1.637	49	243	1	191	36	2.157
Vogtlandkreis	1.372	39	195	0	236	71	1.913
Zwickau	2.031	95	156	7	287	34	2.610
Freistaat Sachsen	26.682	946	3.505	31	6.281	1.613	39.058

¹ nutzungsabhängige Sanierung, Restrisiko bei Nutzungsänderung

² kein Handlungsbedarf nach Gefährdungsabschätzung; nicht archiviert, weil evtl. noch andere Teilflächen betroffen

³ kein Handlungsbedarf nach Gefährdungsabschätzung oder nutzungsunabhängige Sanierung

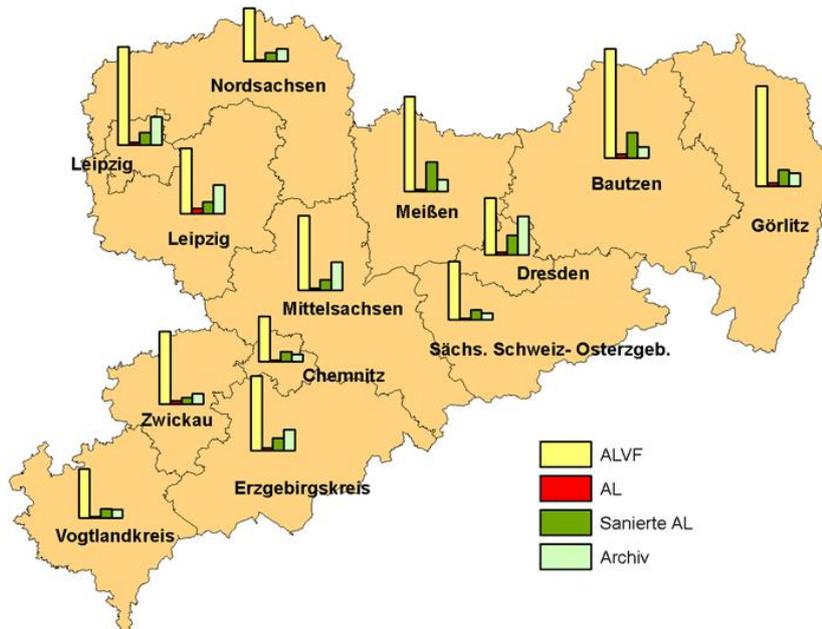


Abbildung 4: Verteilung der altlastverdächtigen Flächen (ALVF), Altlasten AL, sanierten Altlasten und archivierten Altlasten in den einzelnen Landkreisen/kreisfreien Städten Sachsens (LfULG, Stand Mai 2013)

Die Darstellungen zeigen in den Landkreisen Bautzen, Görlitz, Meißen und der Stadt Leipzig die größte Anzahl von altlastverdächtigen Flächen. Auf 76 % dieser Flächen besteht derzeit kein akuter Handlungsbedarf. Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdung sind dagegen auf den Teilflächen notwendig, die bereits als Altlast eingestuft wurden. Davon sind die meisten in den Landkreisen Leipzig (144), Bautzen (106) und Zwickau (95) bzw. Görlitz (91) erfasst. Bereits abgeschlossen wurden Sanierungsmaßnahmen am häufigsten in den Landkreisen Meißen (833) und Bautzen (710) und in der Stadt Dresden (544). Sanierte Altlasten verbleiben häufig auch nach einer Sanierung im aktiven Datenbestand. Nur wenn ein Restrisiko auch bei Nutzungsänderungen ausgeschlossen werden kann, gelangen sie ins Archiv des SALKA. Bei rund 20 % aller sanierten Altlasten ist im Anschluss noch eine Überwachungsmaßnahme notwendig.

Aktuelle statistische Angaben unter http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Altlastenstatistik_2012.pdf

5 Tracerversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens MNA/ENA in Wülknitz

Christina Illgen – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Claus Nitsche, Norbert Hüasers, Stephan Klotzsch, Theresa Albert - GICON GmbH/Boden- und Grundwasserlabor GmbH (BGD)

Thomas Vienken, Peter Dietrich – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

Tilo Vogel – Imprägnierwerk Wülknitz GmbH

5.1 Einleitung

Die langjährige Handhabung von Teerölen zur Behandlung von Hölzern hat am Standort des Imprägnierwerkes Wülknitz zu einer erheblichen Verunreinigung des Bodens und Grundwassers geführt. Die ungesättigte Bodenzone wurde bereits durch Bodenaustausch saniert. In der gesättigten Zone sind aber nachweislich noch erhebliche Mengen an Teerölen verblieben. Bedingt durch die Schadstoffverteilung in der wassergesättigten Zone hat sich eine Schadstofffahne ausgebildet. Die heute bekannte Fahnenlänge beträgt etwa 450 m.

Nach umfangreichen Erkundungsmaßnahmen u. a. im Rahmen von Forschungsprojekten wird heute MNA (Monitored Natural Attenuation) als die bevorzugte Handlungsoption für den zukünftigen Umgang mit dem Schadensfall gesehen, weil nachgewiesenermaßen Abbauprozesse im abstromigen Grundwasser ablaufen. Die Belastung und deren Abbau werden kontinuierlich überwacht (MNA).

EXKURS: MNA (Monitored Natural Attenuation)

Überwachung der natürlichen Schadstoffminderung

Dabei handelt es sich um Überwachungsmaßnahmen zur Kontrolle der Wirksamkeit von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen. Biologische, chemische und physikalische Prozesse, die ohne menschliches Eingreifen zu einer Verringerung der Masse, der Fracht, der Toxizität, der Mobilität, des Volumens oder der Konzentration eines Stoffes im Boden oder Grundwasser führen. Zu diesen Prozessen zählen biologischer Abbau, chemische Transformation, Sorption, Dispersion, Diffusion und Verflüchtigung der Stoffe.

Quelle: Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung, Positionspapier des Ad-hoc-Unterausschusses „Natürliche Schadstoffminderung“ des Altlastenausschusses (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)

Für den Fall, dass MNA nicht ausreichend wirksam ist, wird eine Rückfalloption benötigt. Eine mögliche Variante ist eine ENA-Maßnahme, bei der Sulfat als Elektronenakzeptor in den Untergrund infiltriert wird.

EXKURS: ENA (Enhanced Natural Attenuation)

ENA wird als eine „in situ“-Sanierungsmaßnahme angesehen, weil durch die Initiierung, Stimulierung oder Unterstützung von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen mit dem Einbringen von Substanzen unter Nutzung naturgegebener Reaktionsräume aktiv in das Prozessgeschehen eingegriffen wird.

Quelle: Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung, Positionspapier des Ad-hoc-Unterausschusses „Natürliche Schadstoffminderung“ des Altlastenausschusses (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)

Ziel eines 2011 durch das LfULG in Auftrag gegebenen Forschungsvorhabens war unter anderem ein standortbezogener Test einer ENA-Rückfalloption, falls sich MNA am Standort Imprägnierwerk Wülknitz als nicht ausreichend erweist. Die Großmann Ingenieur Consult GmbH (GICON) wurde vom LfULG für diese Konzeption beauftragt. Weil das Vorhaben bis Ende 2014 läuft, soll im Folgenden zunächst der erfolgreiche Tracerversuch mit seinen besonderen Schwierigkeiten beschrieben werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde in der Abstromfahne eine Feldversuchsanlage installiert, um die Untersuchungen zur ENA-Maßnahme durchzuführen und zu bewerten. Dazu war es zunächst erforderlich, die geohydraulischen Parameter des betroffenen Aquifers zu ermitteln. Im Folgenden werden die dazu durchgeführten Arbeiten dargestellt und die Ergebnisse diskutiert.

Die Arbeiten wurden auf der Basis einer modellgestützten Planung unter Ableitung von Erwartungswerten durchgeführt, die einen anschließenden Soll-Ist-Vergleich ermöglichten. Dabei wurde von den folgenden Rahmen- und Randbedingungen ausgegangen:

- Schadstoffausbreitung erfolgt überwiegend in dem sogenannten mittleren Aquiferbereich bei ca. 15 bis 19 m u. GOK (Modellschicht 4 im Strukturmodell)
- großräumige Grundwasserfließrichtung von Nordost nach Südwest
- mittlere Abstandsgeschwindigkeit von ca. 150 m/a oder 0,41 m/d
- Aquifer ist überwiegend aufgebaut aus Sanden und Kiesen
- der kf-Wert liegt bei etwa 1×10^{-4} m/s

Wesentliche Arbeitsschwerpunkte waren:

- Aufbau eines geologischen Struktur- und Strömungsmodells
- Errichtung des Testfeldes
- Durchführung der Tracerversuche

5.2 Errichtung einer Feldversuchsanlage

Zur Durchführung des ENA-Versuches war eine Feldversuchsanlage zu errichten, die aus einer Infiltrationsmessstelle und aus abstromig gelegenen Beobachtungsmessstellen besteht. Als Infiltrationsmessstelle wurde die GWMS 30/10MP ausgewählt und auf ihre Eignung hinsichtlich der hydraulischen Rahmenbedingungen, der Belastungssituation und des erforderlichen Platzbedarfes geprüft. Bei der räumlichen Planung dieser Anlage wurde davon ausgegangen, dass die örtliche Fließrichtung von der großräumigen abweichen kann. Da-

5.3 Tracerversuche

5.3.1 Tracerversuch 1

Nach Aufbau des Testfeldes erfolgte eine erste Prüfung der im Modell verwendeten k_f -Werte und daraufhin eine Anpassung des Modells. Anschließend wurden Durchbruchkurven des Tracers in der ersten und zweiten Kontrollebene berechnet, wobei die Zugabe jeweils als Impuls erfolgte. Die Berechnung ergab, dass das Konzentrationsmaximum nach 5 d (P4), 9 d (P5) bzw. 12,5 d (P3) erreicht werden sollte. Für die Durchführung wurde Bromid als Tracer gewählt, weil es relativ einfach per Ionenchromatografie analysierbar ist und im Grundwasser nicht nachweisbar war. Die Infiltrationsmenge bzw. Konzentration wurde so gewählt, dass ein sicherer Nachweis auch an der 2. KE gewährleistet war. Zur Infiltration wurde eine Packer an einer MP1-Steigleitung über dem Filterbereich der GWMS zusammen mit einer 12-V-Umwälzpumpe im abgepackerten Filterbereich eingebaut, um eine gleichmäßige Einmischung des Tracerinfiltrats zu gewährleisten.

Ergebnisse

Die auf der Grundlage des Modells abgeleiteten Erwartungswerte wurden nicht erreicht. Der Tracer wurde jeweils nur einmal in zwei Messstellen (KE1 und KE2) mit geringer Konzentration im Bereich der Nachweisgrenze nachgewiesen. Die Beprobung des Infiltrationsbrunnens am 17. Tag nach Start des Tracerversuches zeigte, dass das Bromid aber vollständig abtransportiert worden ist und sich nicht mehr im Infiltrationsbereich befindet.

Hypothesen

- In der Tracerfahne ist v_a höher als 150 m/a; relativ schmaler Abstromlinie, Abfluss zwischen den Kontrollmessstellen
- Das Grundwasser fließt in eine andere Richtung und damit wären die Kontrollmessstellen falsch positioniert.

Konsequenzen

- Ausbau des Messnetzes (Verdichtung des Messnetzes) und Wiederholung des Tracerversuches.
- Prüfung und Einmessen von 10 Grundwassermessstellen nach Lage und Höhe, um bereits im Rahmen der Stichtagsmessung angezeigte Bedenken zur Belastbarkeit der Lagedaten an vereinzelt GWM aufzuklären.

5.3.2 Tracerversuch 2

Als Ergebnis der Vermessungsarbeiten konnten von 10 GWM an vier Abweichungen nach Lage und Höhe festgestellt werden. Im Ergebnis einer durchgeführten Stichtagsmessung wurde folgendes festgestellt: Änderung der Hydroisohypsenpläne: Fließrichtung von Südwest nach West und die Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten im Bereich der Kontaminationsquelle und im Tracerversuchsfeld war wesentlich geringer als vorher ermittelt.

Zusätzlich wurden vier Messstellen mittels Sonic Drill-Verfahren in der bestehenden ersten Kontrollebene installiert. Damit sollte die Gefahr eines Durchlaufens des Tracers zwischen den bestehenden Messstellen minimiert werden. Es wurden Datenlogger mit Drucksensor und elektrischen Leitfähigkeits Elektroden in ausgewählten Messstellen, einschließlich der GWM 30/10 MP (Infiltration des Tracers), verwendet und eine höhere Tracerkonzentration (ca. 40 g/l Bromid, 1. Versuch: ca. 17 g/l), um den Tracerdurchgang mittels Messung der elektrischen Leitfähigkeit kontinuierlich erfassen zu können.

Ergebnisse

Die Erwartungswerte wurden nicht erreicht. Der Tracer wurde weder in der KE1 noch in der KE2 nachgewiesen. Stattdessen war permanent eine hohe elektrische Leitfähigkeit in der Eintragsmessstelle messbar. Nach Packerausbau erfolgte eine schnelle Abnahme der Leitfähigkeit im Infiltrationsbrunnen.

Hypothesen

- Dichteunterschiede führen dazu, dass eine Mobilisierung nicht erfolgte bzw. der Tracer abgesunken ist
- nicht identifizierte Fließwege des Tracers und/oder
- Alterung der GWM 30/10 MP, geringere hydraulische Durchlässigkeit

Konsequenzen

Durchführung folgender Untersuchungen:

- Pumpversuch zur Verifizierung der Hydraulik und Identifizierung von bevorzugten Fließwegen
- Eignungsprüfung der GWM 30/10 MP mittels Pumpversuchsauswertung für die Prüfung des hydraulischen Anschlusses von Filterrohr der GWM 30/10 MP an den Grundwasserbereich
- Kamerabefahrung zur Prüfung des Zustandes des Filterbereiches
- qualitative Untersuchung zum vertikalen und horizontalen Strömungsbild im Filterrohrbereich mit Hilfe eines von NITSCHKE und HILLIG entwickelten Tracerverdünnungsversuches mit Hilfe von Uranin

Ergebnisse

- Aufgrund des Pumpversuches und der Kamerabefahrung waren Alterungserscheinungen in der Messstelle auszuschließen.
- Aus dem Vergleich der Planungswerte des Pumpversuches (welche Messstelle in welcher Kontrollebene reagiert zuerst) und den Messwerten wurde eine bevorzugte Grundwasserströmung in westlicher bis nordwestlicher Richtung identifiziert.
- Der Tracerverdünnungsversuch ergab, dass die vertikale Strömung in der GWM 30/10 MP wesentlich größer ist als deren horizontale Durchströmung, die nicht nachweisbar war.

Zusammenfassend war somit feststellbar, dass sowohl ein Tracerversuch als auch ein ENA-Versuch mit einem nicht signifikant erhöhten hydraulischen Grundwassergradienten durchgeführt werden muss.

5.3.3 Tracerversuch 3

Die Planung des 3. Tracerversuches erfolgt wiederum modellgestützt bei einer erzwungenen Grundwasserströmung, wobei verschiedene Varianten (kontinuierliche Absenkung an einer abstromig gelegenen Grundwassermessstelle und zeitlich begrenzte Infiltration in die GWM 30/10 MP) betrachtet wurden. Als Vorzugsvariante wurde eine zeitlich begrenzte Infiltration in die GWM 30/10MP mit einer Infiltrationsrate von 3,5 l/min abgeleitet.

Weil bei den bisherigen Tracerversuchen ein Salztracer mit relativ hohen Konzentrationen verwendet wurde, war nicht auszuschließen, dass auch jetzt noch ein Hintergrundgehalt vorhanden ist. Aus diesem Grund wurde Uranin als Tracer verwendet.

Ergebnisse

Der 3. Tracerversuch war erfolgreich und konnte vollständig ausgewertet werden.

1. Abstandsgeschwindigkeit

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, konnte der Tracer an drei Messstellen P13, P5 und P14 in der ersten Kontroll-ebene detektiert werden. Ein deutlicher Konzentrationsanstieg ist ab dem 10. Tag erkennbar und das Maximum wird an der Messstelle P14 nach 14 Tagen und an P5 und P13 nach 15 Tagen erreicht. An den drei Messstellen ist ein relativ langes Tailing zu beobachten. Besonders ausgeprägt ist es bei der Messstelle P5, was auf eine Stagnation der Grundwasserfließgeschwindigkeit in diesem Bereich hindeutet. Dies ist möglicherweise auch mit lokalen Grundwasserfließrichtungsänderungen verbunden.

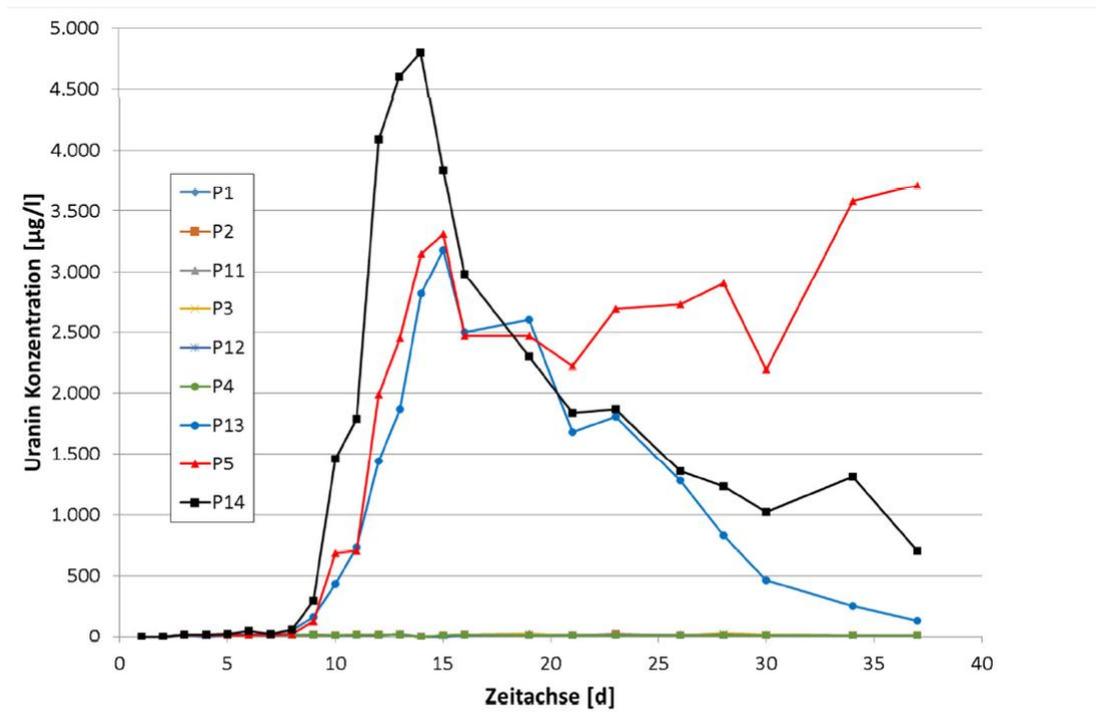


Abbildung 2: Uranin-Konzentration in der KE 1 in Abhängigkeit von der Zeit

Aus den Durchgangskurven des Tracers lassen sich die folgenden Abstandsgeschwindigkeiten ermitteln:

- maximale Abstandsgeschwindigkeit ($v_{a \max}$), ergibt sich aus dem ersten Auftreten des Tracers (t_{\min})
- mittlere Abstandsgeschwindigkeit (v_a), ergibt sich aus Auswertung der gesamten Tracerdurchbruchkurve nach NITSCHKE (wird gegenwärtig aus dem Konzentrationsmaximum $t_{c\max}$ geschätzt)

	P14	P5	P13
t_{\min}	5 d	8 d	7 d
$t_{c\max}$	14 d	15 d	15 d
$V_{a \max}$	0,575 m/d	0,338 m/d	0,517 m/d
v_a	0,205 m/d	0,180 m/d	0,241 m/d

Der Vergleich mit den Erwartungswerten aus dem Modell zeigt, dass der Tracer nicht bereits nach zwei bis drei Tagen die erste KE erreicht, sondern im Unterschied dazu erst nach acht Tagen. Der Einfluss der zeitlich begrenzten Infiltration von Grundwasser in die GWM 30/10 MP und die dabei erzielte Beeinflussung der Grundwasserströmung kann vernachlässigt werden.

2. Fließrichtung

Abbildung 3 verdeutlicht die beobachtete Fließrichtung des Tracers (blaue Pfeile) im Vergleich zur großräumigen Grundwasserfließrichtung (roter Pfeil). Gemäß Modellierung sollte der Tracer nach Südwesten transportiert werden und als erstes in der Messstelle P12 nachweisbar sein. Demgegenüber wurde durch den Tracerversuch eine Fließrichtung ermittelt, die nach Westen bzw. Nordwesten gerichtet ist. Dies bestätigt die aus den Ergebnissen des Pumpversuches abgeleitete bevorzugte Grundwasserströmungsrichtung. Damit weicht die im Bereich der Feldversuchsanlage ermittelte Grundwasserfließrichtung deutlich von der großräumigen ab. Der Tracer wurde zunächst in P14 und anschließend in P5 und P13 analysiert. In der zweiten Kontrollebene konnte ein Nachweis bisher nicht geführt und somit der weitere Fließweg nicht ermittelt werden.

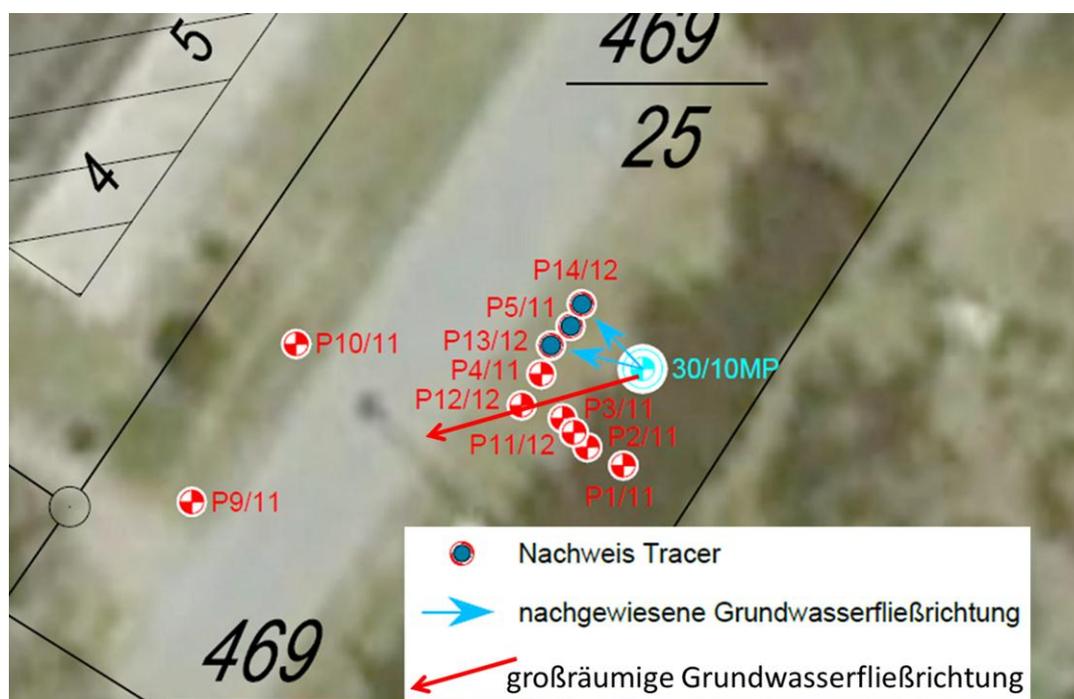


Abbildung 3: Ermittelte Grundwasserfließrichtung (blaue Pfeile) im Vergleich zur großräumigen Grundwasserfließrichtung (roter Pfeil)

5.4 Zusammenfassung

Der durchgeführte Tracerversuch mit marginal erzwungener Grundwasserströmung konnte im Sinne der Zielstellung der Untersuchungen erfolgreich abgeschlossen werden. Damit wurde bestätigt, dass Tracerversuche im Feldbereich vollständig auswertbar sind. Folgende geohydraulische Parameter können bestimmt werden:

- hydraulisch wirksame und hydraulisch gering wirksame Porosität
- Austauschrate zwischen beiden Porositätsanteilen
- hydrodynamische Dispersivität

Voraussetzungen für die im Feldbereich durchzuführenden Tracerversuche sind

- ein detailliertes geohydraulisches Strukturmodell,
- eine modellgestützte Planung von im Bogen um eine GWMS angeordnete Kontrollebene mit in einem Abstand von ca. 1 m voneinander installierten Messstellen,
- Filteranordnung der Kontrollmessstellen im selben geohydraulischen Horizont, in dem auch die GWMS verfiltert ist,
- Prüfung der hydraulischen Bedingungen in der GWMS,
- modellgestützte Planung, Begleitung und Auswertung eines mehrstufigen Pumpversuches,
- modellgestützte Planung, Begleitung und Auswertung des Tracerversuches mit abgepacktem Filterbereich und ggf. erzwungener Strömung,
- Entnahme und Analyse von Mischproben aus den Kontrollmessstellen und
- für die Darstellung von Hydroisohypsen dürfen nur GWMS verwendet werden, deren Ausbau bekannt ist und deren Filterbereiche im selben geohydraulischen Horizont ausgebaut sind und eine vergleichbare Filterlänge haben.

Zur Erfassung des Tracers in der 2. Kontrollebene wurden anschließend Grundwasseruntersuchungen nördlich der P10/11 mit Hilfe des UFZ durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten die nordwestlich gerichtete Grundwasserströmung, wobei der Abfluss des Tracers auf einer relativ schmalen Bahn nachgewiesen wurde. Daraufhin wurde das Messnetz durch die Errichtung von Grundwassermessstellen erweitert. Auf dieser Basis ist im nächsten Schritt die Planung und Durchführung des ENA-Versuches möglich.

6 Untersuchung des Elutionsverhaltens organischer und anorganischer Stoffe aus organischen Düngemitteln mit Hilfe von Perkolationsversuchen

Verena Enzner, Thomas Fichtner - TU Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten
Heiko Ihling - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Einleitung

Ein vorrangiges formuliertes Ziel in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL 2000) ist das Erreichen eines guten Zustandes von Oberflächen- und Grundwässern bis 2015. Bei der letzten Bewertung (Juli 2009) des Zustands der Grundwasserkörper in Sachsen wurden 17 aufgrund ihrer hohen Nitratbelastung (z. B. Wasserschutzgebiet Jahnaue) in den schlechten chemischen Zustand versetzt. Quellen dafür sind die anorganische und organische Düngung, Viehhaltung, Erosion und Auswaschung aus dem Boden sowie Abgase aus dem Verkehr und Rauchgase aus Industrie, Gewerbe und Haushalten. Zur Erreichung des Ziels bis 2015 sind deshalb kosteneffiziente Maßnahmen für die Verringerung der Nitrat- und Ammoniumbelastung zu finden.

Konzept zur Zielerreichung

Bei den geplanten Maßnahmen und in den durchgeführten Experimenten untersuchten Maßnahmen soll durch die Zugabe von humusmehrenden und bodenstrukturverbessernden Düngemitteln in Form von Komposten die Komplexbildung des Stickstoffs in der Humusstruktur und die Denitrifikation gefördert und somit der N-Eintrag in das Grundwasser gemindert werden. Bei der Komplexbildung binden Stickstoffspezies durch Aminogruppenbindungen an die Humusstruktur. Die Denitrifikation dient dem Abbau von Nitrat zu molekularem Stickstoff bzw. Stickoxiden innerhalb des Stickstoffkreislaufes. Organische Masse stellt dabei den notwendigen Elektronenakzeptor während der Denitrifikation dar.

Durchgeführte Arbeiten

Bei den untersuchten Düngemitteln handelte es sich um die organischen Recyclingmaterialien Klärschlamm-, Grünschnitt- und Bioabfallkompost. Bevor diese organischen Düngemittel allerdings zum Einsatz kommen können, war es notwendig, das Elutionsverhalten von enthaltenen umweltrelevanten organischen und anorganischen Inhaltsstoffen zu untersuchen. Die Eluatgewinnung erfolgte mittels Perkolationsversuchen nach DIN 19528. Das Untersuchungsspektrum umfasste dabei die in Tabelle 1 dargestellten Stoffgruppen mit den zugehörigen Einzelstoffen. In erweiterten Versuchen mit Klärschlamm wurde der Einfluss von Kalkung und Kompostierung auf den Schadstoffaustrag untersucht.

Auf Grundlage der ermittelten Resultate und anhand gültiger gesetzlicher Rahmenbedingungen sollte eine Bewertung der untersuchten organischen Düngemittel erfolgen. Dabei war zu prüfen, ob die gemessenen organischen und anorganischen Schadstoffkonzentrationen in den Eluatwasserproben der organischen Düngemittel im tolerablen Bereich im Vergleich zu den bestehenden Schwellen- und Grenzwerten liegen und somit ein Einbau von Düngemitteln in die oberen Bodenhorizonte zur Minderung des N-Eintrages in das Grundwasser in Frage kommt.

Tabelle 1: Analyzierte Stoffgruppen und zugehörige Einzelstoffe

Stoffgruppe	Einzelstoffe
Anionen	Nitrat, Nitrit, Chlorid, Sulfat, Phosphat
Kationen	Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Ammonium
DOC	
Schwermetalle	Arsen, Cadmium, Blei, Quecksilber, Zink, Nickel, Kupfer, Chrom
PAK	Benzo(a)pyren, Anthracen, Phenanthren, Pyren, Chrysen, Benzo(a)anthracen, Naphthalin, Acenaphthen, Fluoren
Phthalate	Bis-(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP)
Tenside	Nonylphenol, lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS), anionische Tenside (MBAS)
Chlorphenole	Triclosan
Organozinnverbindungen	Monobutylzinn (MBT), Dibutylzinn (DBT), Tributylzinn (TBT)
Moschusverbindungen	Moschus-Xylol, Tonalide, Galaxolide
PCB	PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153, PCB 180
Pflanzenschutzmittel	Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT), Hexachlorcyclohexan (HCH)
Pharmaka	Carbamazepin, Sulfomethoxal, Amidotrizoesäure
PFT	Perfluorooctan-1-sulfonsäure (PFOS), Perfluorooctansäure (PFOA)
Estrogene	Estron, 17-alpha-Ethinestradiol, 17-beta-Estradiol

Unter dem Aspekt einer landwirtschaftlichen Verwertung von organischen Düngemitteln müssen dabei sowohl abfallrechtliche (Kreislaufwirtschaftsgesetz [KrWG] 2012), Bioabfallverordnung [BioAbfV] 1998) und Klärschlammverordnung [AbfKlärV] 2012) als auch düngerechtliche (Düngegesetz [DüngG] 2009, Düngeverordnung [DüV] 2006) und die Düngemittelverordnung [DüMV] 2008) Vorschriften eingehalten werden. Aber auch den Wassergesetzen (Wasserhaushaltsgesetz [WHG] 2012), der Nitratrichtlinie (92/676/EWG), den Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2004), der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) und Verordnung zum Schutz des Grundwassers (GrwV 2010) sowie nicht zuletzt dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998) und der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999) ist aufgrund des Eintrages in die Umwelt Beachtung zu schenken.

Tabelle 2 zeigt die zur Bewertung der gewonnenen Eluate herangezogenen aktuellen Grenz-, Schwellen- bzw. Geringfügigkeitsschwellenwerte.

Tabelle 2: Grenz-, Schwellen- bzw. Geringfügigkeitsschwellenwerte nach TrinkwV (2011), GrwV (2010), LAWA (2004) und NRW (2005)

Stoff	Maßeinheit	Grenzwert TrinkwV (2011)	Schwellenwert GrwV (2010)	Geringfügigkeits- schwellenwert LAWA (2004)	Geringfügigkeits- schwellenwert NRW (2005)
Nitrat	mg/l	50			
Nitrit	mg/l	0,5			
Chlorid	mg/l	250	250	250	
Sulfat	mg/l	250	240	240	
Ammonium	mg/l	0,5	0,5		
Natrium	mg/l	200			
Arsen	µg/l	50	10	10	
Cadmium	µg/l	3	0,5	0,5	
Blei	µg/l	10	10	7	
Zink	µg/l			58	
Nickel	µg/l	20		14	
Kupfer	µg/l	2000		14	
Chrom	µg/l	50		7	
Quecksilber	µg/l	1	0,2	0,2	
∑ PAK	µg/l	0,1		0,2	
Naphthalin	µg/l			1	
Acenaphthen	µg/l				5,8
Fluoren	µg/l				3
Phenanthren	µg/l				0,3
Anthracen	µg/l			0,01	
Pyren	µg/l				0,025
Benzo(a)anthracen	µg/l				0,01
Chrysen	µg/l				0,3
Benzo(a)pyren	µg/l			0,01	
Bis-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)	µg/l				0,8
Nonylphenol	µg/l			0,3	
Lineare Alkylbenzolsulfona- te (LAS)	µg/l				250
∑ Chlorphenole	µg/l			1	
Triclosan	µg/l				0,05
Monobutylzinn (MBT)	µg/l				2,6
Dibutylzinn (DBT)	µg/l			0,01	
Tributylzinn (TBT)	µg/l			0,0001	
Moschus-Xylol	µg/l				0,1
Galaxolide	µg/l				2

Stoff	Maßeinheit	Grenzwert TrinkwV (2011)	Schwellenwert GrwV (2010)	Geringfügigkeits- schwellenwert LAWA (2004)	Geringfügigkeits- schwellenwert NRW (2005)
Tonalide	µg/l				3,5
Σ PCB	µg/l			0,01	
Σ PSM	µg/l	0,5		0,5	
PSM - Einzelstoff	µg/l	0,1		0,1	
Hexachlorcyclohexan	µg/l			0,02	
Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT)	µg/l			0,025	

Für den Parameter Perfluorooctan-1-sulfonsäure (PFOS) wurde die zulässige Höchstkonzentration von 7,2 µg/l des Vorschlages für eine Richtlinie in Bezug auf prioritäre Stoffe (Bundesrat 2012) für Vergleichszwecke herangezogen.

Materialien

■ Grünschnittkompost (Humuswirtschaft Kaditz)

Der Grünschnitt stammte aus Sammlungen im Stadtgebiet Dresden sowie von den Wertstoffhöfen Dresden und Radebeul, die sowohl privat als auch gewerblich beliefert werden. Er wurde in der Anlage Großdittmannsdorf in Mietenkompostierung hergestellt.



■ Bioabfallkompost (Humuswirtschaft Kaditz)

Der Bioabfall stammte aus dem Dresdner Stadtgebiet. Es fand eine Intensivrotte in der „Rotte“ und eine Nachrotte in der Tafelmiete mit Brückenumsetzer statt.



■ Klärschlammkompost (LAV Markranstädt)

Der verwendete Klärschlamm stammte aus der Chemnitzer Kläranlage und war wie dort üblich gekalkt. Bei der Kompostierung wurden 50 % Klärschlamm, 20 % pflanzliche Reste (Grünschnitt) und 30 % naturbelassene Holz- und Rindenabfälle benutzt. Die Kompostierung fand in der LAV in der offenen Mietenkompostierung unter Verwendung einer Dreiecksmiete statt. Nach zwei Wochen wurde eine erste Umsetzung vorgenommen und danach in regelmäßigen Abständen. Die Gesamtdauer betrug zehn bis zwölf Wochen. Im Anschluss wurde das Material gesiebt.



■ ungekalkter/gekalkter Klärschlamm (AST GmbH)

Die beiden Klärschlämme der AST GmbH stammten aus der Kläranlage in Ilmenau. Zur Kalkung wurde der Frischmasse 5 % Branntkalk hinzugefügt, weswegen er im Folgenden als „gekalkter Klärschlamm“ bezeichnet wird. Daneben gibt es noch den „ungekalkten Klärschlamm“ ohne Kalkzugabe.

■ ungekalkter/gekalkter Klärschlammkompost (AST GmbH)

Die Kompostierung der beiden Klärschlämme wurde getrennt voneinander bei der AST GmbH durchgeführt. Als Strukturmaterial wurde Grünschnitt zugegeben. Die Kompostierung fand in offener Mietenkompostierung statt. Die Gesamtdauer betrug sieben Wochen.

■ Lehmboden (Wasserschutzgebiet Jahnaue 2)

Der für die Nachbildung einer oberflächennahen Ackerschicht verwendete Lösslehm stammte aus dem Wasserschutzgebiet Jahnaue 2.

■ schluffiger Sand

Als neutrales Füllmaterial für die Perkolationsversuche wurde Material aus der Ortslage Paschkowitz (westlich Mügeln) und Schmelzwassersand aus dem WSG Diehsa (südwestlich Niesky) verwendet.

Homogenisierung der untersuchten Materialien

Aufgrund der starken Heterogenität der Materialien erfolgte vor dem Einsatz im Versuch eine Homogenisierung der untersuchten Stoffe nach dem Kegelfverfahren DIN 19747 (2006). Dazu wurde das Material zunächst auf einer Plane ausgebreitet und mit einer Schaufel grob zerkleinert. Nach mehrmaliger Umlagerung wurde für die jeweils benötigte Probe eine Verjüngung durchgeführt. Dazu fand eine Vierteilung des Kegels statt. Mit den zwei gegenüberliegenden Anteilen wurde weitergearbeitet, bis die gewünschte Probenmenge erreicht war.

Perkolationsversuche nach DIN 19528

Versuchsaufbau

Bei den durchgeführten Säulenversuchen (siehe Abbildung 1) wurde aus einem Vorratsgefäß (1) das Elutionsmittel (2) mittels einer Pumpe (3) in eine Edelstahlsäule, gefüllt mit der zu untersuchenden Probe (5) und abgedichtet durch ein Quarzsandbett (4), befördert. Das Eluat (10) wurde in einem Auffanggefäß (11) gesammelt. Am Schraubverschluss (9) des Auffanggefäßes ist eine Entlüftungskanüle (8) angebracht. Die in diesen Versuchen verwendeten Säulen hatten eine Länge von 47,5 cm und einen Durchmesser von 7 cm.

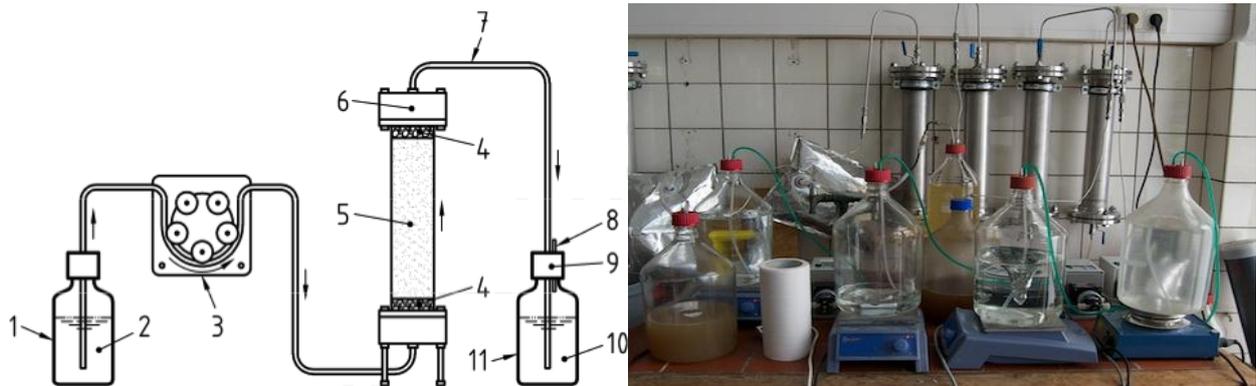


Abbildung: Versuchsanordnung Säulenversuch nach DIN 19528 (2009) – Prinzipskizze (links), Laborversuchsstand (rechts)

Elutionsmittel

Um die natürlichen Verhältnisse möglichst naturnah nachzustellen, wurde für die Perkolationsversuche synthetisches Regenwasser benutzt. In einem Liter des hergestellten Elutionsmittels waren folgende Salzmengen enthalten:

■ 0,00686 g NaNO_3

■ 0,00164 g KHCO_3

■ 0,02696 g CaSO_4

Säulenpackung

Am oberen und unteren Ende erfolgte der Einbau einer Filterkiesschicht, um den Austrag von Untersuchungsmaterial zu verhindern. Im Anschluss an die untere Filterkiesschicht erfolgte der Einbau einer Mischung, bestehend aus dem Düngemittel und Lehm im Verhältnis 1 : 1. Die Schichtdicke betrug 15 cm, weil bei Aufbringung der Düngemittel auf den Acker eine Einarbeitung in diese Tiefe angenommen wird. Das restliche verbleibende Säulenvolumen wurde mit sandigem Füllmaterial aufgefüllt.

Versuchsablauf

Vor Beginn des eigentlichen Versuches wurde eine Aufsättigung durchgeführt. Hierbei betrug die Kontaktzeit zwischen Elutionsmittel und Feststoff zwei Stunden. Im Anschluss an die Aufsättigung, während des eigentlichen Elutionsversuches, betrug die Kontaktzeit 5 Stunden. Die Entnahme der Eluatfraktionen erfolgte zu verschiedenen W/F-Verhältnissen laut Tabelle 3.

Tabelle 3: W/F-Verhältnisse für die Eluatentnahme (DIN 19528, 2009)

Fraktionsnummer	W/F-Verhältnis l/kg	Eluatvolumen (erwartet) l
1	$0,3 \pm 0,05$	$(0,3 \pm 0,05) \times M_T$
2	$1,0 \pm 0,2$	$(0,7 \pm 0,2) \times M_T$
3	$2,0 \pm 0,4$	$(1,0 \pm 0,4) \times M_T$
4	$4,0 \pm 0,8$	$(2,0 \pm 0,8) \times M_T$

Ergebnisse

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass unter gewöhnlichen Klimabedingungen in den Bodenschichten meist nur Wasser/Feststoffverhältnisse bis 1 erreicht werden. Bei Starkregenereignissen liegen diese um einiges höher. Aus diesem Grund können die Eluatgehalte bei einem Wasser/Feststoffverhältnis von 2 denen der Sickerwassergehalte annähernd gleichgesetzt werden.

Vorversuche

Diese dienten der grundsätzlichen Charakterisierung potenzieller organischer Düngemittel. Bei diesen Untersuchungen erfolgte die Untersuchung der Eluate beim Einsatz der Materialien Grünschnittkompost (GSK), Bioabfallkompost (BAK) und Klärschlammkompost (KSK). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenzufassen:

In den Eluaten des Grünschnittkompostes überschritten die Nitratkonzentrationen (1.000 mg/l) die Schwellen- bzw. Grenzwerte zum Teil sehr stark. Auch die Schwermetallkonzentrationen bei Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Quecksilber sowie die Gehalte bei Arsen überschritten die jeweiligen Schwellen- bzw. Grenzwerte. Der DOC-Gehalt war mit bis zu 100 mg/l ebenfalls bedenklich hoch. Bei den Organika konnten die Tenside, Organozinn- und Moschusverbindungen sowie PFT nachgewiesen werden, wobei nur die Tributylzinnkonzentration den Schwellenwert überschritt.

Die Eluate des Bioabfallkompostes wiesen die stärksten Belastungen innerhalb der untersuchten Materialien auf. Sehr hohe schwellen- und grenzwertüberschreitende Nitrat- und Chloridkonzentrationen waren gepaart mit Schwermetallkonzentrationen (Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink) und Arsengehalten, die ebenfalls diese Werte überschritten. Der DOC-Gehalt war hier mit bis zu 200 mg/l ebenfalls bedenklich hoch. Bei den Organika konnten die Tenside, Organozinn-, Moschus- und PFT-Verbindungen nachgewiesen werden, wobei aber nur die PFT-Verbindungen den Schwellenwert überschritten.

In den Eluaten des Klärschlammkompostes (KSK) konnten Überschreitungen der Schwellen- und Grenzwerte bei Nitrat, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Quecksilber registriert werden, wobei die Konzentrationen zum Teil weit unter denen der beiden anderen Materialien lagen. Der DOC-Gehalt war hier mit bis zu 200 mg/l ebenfalls bedenklich hoch. Bei den Organika wurden PAK, Tenside, Organozinn-, Moschus- und PFT-Verbindungen nachgewiesen, wobei die PAK sowie die Organozinn- und PFT-Verbindungen die Schwellenwerte überschritten.

Zusätzlich erfolgte die Untersuchung des Austrags der untersuchten Stoffe aus dem zur Nachbildung der oberflächennahen Ackerschicht verwendeten Lösslehm in einer separaten Blindsäule. Die dabei ermittelten Messwerte zeigten, dass bereits das verwendete Lösslehmmaterial bei den Schwermetallen die Grenzwerte für fast alle Parameter (Arsen, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zink) überschritt. Bei der Interpretation der weiteren Versuchsergebnisse muss diese vorhandene Hintergrundbelastung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Vorversuche zeigten, dass ein Einsatz der geprüften Materialien in diesem Zustand zur Humusmehrung und Bodenstrukturverbesserung aufgrund zu hoher Schadstoffgehalte im Eluat der Materialien nicht möglich ist. Deshalb sollte in weiterführenden Versuchen untersucht werden, ob sich die Schadstoffbelastungen, vor allem die der Schwermetalle, durch Kalkzugabe beim Kompostierprozess reduzieren lassen.

Spezialisierungsversuche

Auf Grundlage der Ergebnisse der Vorversuche, in denen sich gezeigt hat, dass die Schadstoffbelastung im Eluat des Klärschlammes im Vergleich zu den anderen beiden Materialien nicht extrem erhöht war, erfolgte bei den weiteren Untersuchungen eine Fokussierung auf die Klärschlämme. In einem Spezialisierungsversuch wurde deshalb der Einfluss von Kalkung und Kompostierung auf den Schadstoffaustrag, vor allem jener der Schwermetalle, aus dem Klärschlamm untersucht. Dazu fanden Versuche mit gekalktem und ungekalktem Klärschlamm vor und nach der Kompostierung statt.

In den Tabellen 4 und 5 sind die ermittelten Messwerte für pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, DOC, Anionen, Kationen und Schwermetalle in Doppelbestimmung für den ungekalkten Klärschlamm (OKS1 und OKS2) und den ungekalkten, kompostierten Klärschlamm (OKSK1 und OKSK2) sowie für den gekalkten Klärschlamm (KKS1 und KKS2) und den gekalkten, kompostierten Klärschlamm (KKSK1 und KKSK2) dargestellt. Die Überschreitungen sind dabei rot dargestellt.

Tabelle 4: Ermittelte Messwerte für den ungekalkten Klärschlamm (OKS1 und OKS2) und den ungekalkten, kompostierten Klärschlamm (OKSK1 und OKSK2)

Parameter	Einheit	OKS 1				OKS 2				OKSK 1				OKSK 2			
		W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis			
		0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4
pH	-	6,8	7,2	7,5	7,5	7,0	7,5	7,5	7,4	7,0	7,3	7,5	7,6	7,0	7,4	7,5	7,8
Leitfähigkeit	µS/cm	2680	3810	1072	493	3090	2700	1036	779	2890	2000	358	266	1998	1331	358	372
DOC	mg/l	853	939	290	116	616	566	232	132	327	246	31	14	198	176	51	31
Anionen																	
Nitrat	mg/l	257	31	2,3	9	204	27	1,7	n.a.	242	4,4	16	7,4	158	3,8	12	6,4
Nitrit	mg/l	4,2	2,2	1,8	2,1	1,6	0,8	1,0	n.n.	2,0	n.a.	n.a.	1,1	4,6	n.a.	n.a.	1,3
Chlorid	mg/l	67	25	3,2	1,1	61	24	3,5	2,2	123	25	52	4,6	78	16	46	7
Sulfat	mg/l	64	13	12	10	63	18	12	12	76	47	30	17	56	30	30	17
Phosphat	mg/l	n.n.	n.n.	19	n.n.	n.n.	n.n.	48	211	n.n.	5,5	5,9	5,6	n.n.	5,7	5,6	10
Kationen																	
Ammonium	mg/l	46	189	170	108	157	396	195	136	33	20	38	9	20	33	31	25
Kalium	mg/l	178	363	61	617	3920	128	41	19	130	114	25	12	98	83	46	42
Natrium	mg/l	20	15	13	3,9	22	13	5,9	7,9	71	15	4,2	3,1	143	12	5,3	17
Calcium	mg/l	544	345	59	10	477	172	18	23	413	193	11	5	253	132	31	6
Magnesium	mg/l	80	57	8,2	2,1	71	6,0	30	6,3	81	40	2,8	1,1	51	28	7,0	1,7
Eisen	mg/l									n.a.	0,6	1,4	1,3	0,3	1,4	2,5	2,5
Schwerm.																	
Arsen (As)	µg/l	22	28	25	18	29	40	23	25	24	27	14	6,2	18	25	24	16
Cadmium (Cd)	µg/l	1,1	1,7	1,0	0,8	1,5	1,9	0,9	1,1	1,4	2,4	1,7	1,1	1,1	2,4	1,6	1,0
Blei (Pb)	µg/l	0,8	0,8	2,5	6,3	1,3	5,7	9,0	11	1,9	3,2	8,6	3,6	1,1	5,1	8,0	6,4
Zink (Zn)	µg/l	206	60	22	105	37	98	97	192	402	129	151	88	176	107	105	365
Nickel (Ni)	µg/l	843	282	90	68	135	90	43	50	233	96	33	14	220	171	44	32
Kupfer (Cu)	µg/l	69	84	56	61	53	57	32	43	63	90	49	24	137	89	62	45
Chrom (Cr)	µg/l	53	16	6,8	7,5	61	12	6,3	6,9	50	10	7,8	5,9	34	10	7,7	7,1

Tabelle 5: Ermittelte Messwerte für den gekalkten Klärschlamm (KKS1 und KKS2) und den gekalkten, kompostierten Klärschlamm (KSK1 und KSK2)

Parameter	Einheit	KKS 1				KKS 2				KSK 1				KSK 2			
		W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis			
		0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4
pH	-	6,8	7,7	8,7	8,7	7,1	8,0	8,5	8,8	6,8	7,2	7,6	7,9	6,8	7,2	7,6	8,0
Leitfähigkeit	µS/cm	3200	2920	1114	565	2430	1530	878	713	1885	1148	637	374	2350	970	571	467
DOC	mg/l	2436	2963	1048	534	2042	1620	771	392	211	210	78	45	298	226	76	52
Anionen																	
Nitrat	mg/l	169	18	2,2	3,1	164	4,1	8,5	4,9	235	15	6,5	6,8	271	6,1	4,3	3,4
Nitrit	mg/l	13	9	3,2	2,3	13	3,4	2,8	1,9	n.a.	n.a.	n.a.	1,6	2,3	n.n.	n.a.	1,1
Chlorid	mg/l	51	35	2,8	0,2	48	7,7	2,6	n.n.	137	87	8,9	11	168	61	14	7,1
Sulfat	mg/l	62	45	32	25	51	13	25	27	167	126	17	23	167	77	19	20
Phosphat	mg/l	n.n.	n.n.	0,0	n.n.	n.n.	n.n.	16	n.n.	5,0	4,9	8,1	4,9	4,7	n.n.	9,3	6,1
Kationen																	
Ammonium	mg/l	1,6	1,3	1,7	0,7	7,9	0,3	1,6	0,4	0,5	1,3	14	27	1,8	7,6	22	16
Kalium	mg/l	150	214	68	36	138	665	105		78	63	55	27	96	76	60	31
Natrium	mg/l	26	19	6,5	3,5	22	11	5,0	4,3	143	14	7,0	4,3	20	12	20	4,1
Calcium	mg/l	769	567	131	62	539	172	74	90	265	176	39	14	343	140	30	10
Magnesium	mg/l	107	63	7,5	2,4	80	25	5,6	4,1	52	34	8,8	3,1	69	30	6,6	2,6
Eisen	mg/l									0,2	0,5	3,4	2,3	n.a.	2,3	3,8	2,7
Schwerm.																	
Arsen (As)	µg/l	22	35	26	19	21	26	21	19	15	21	19	8,2	22	25	20	14
Cadmium (Cd)	µg/l	4,2	8,2	4,5	1,8	4,2	4,7	3,0	2,2	0,8	0,9	1,0	0,6	1,0	1,9	1,9	1,5
Blei (Pb)	µg/l	0,4	0,3	0,8	1,1	0,8	0,5	0,6	0,3	0,6	1,1	7,3	2,9	0,7	3,7	8,0	7,2
Zink (Zn)	µg/l	116	116	62	59	129	77	53	66	140	145	132	63	51	117	130	139
Nickel (Ni)	µg/l	633	1015	587	261	852	769	415	366	92	89	51	22	309	279	80	56
Kupfer (Cu)	µg/l	868	2539	974	343	1947	1824	924	715	83	117	110	38	122	194	135	89
Chrom (Cr)	µg/l	43	20	10	5,4	31	13	7,7	7,7	31	11	6,7	5,4	41	10	7,1	6,6

Im Folgenden sind die Ergebnisse für die wichtigsten Parameter im Hinblick auf die Wirkung von Kalkung und Kompostierung zusammenfassend dargestellt.

Nitrat

Die Kalkung hatte hier einen positiven Effekt, wodurch es zu niedrigeren Gehalten im Eluat kam (Vergleich OKS/KKS). Durch die Kalkung kam es zu einer Anhebung des pH-Wertes in den leicht alkalischen Bereich, was förderlich für die mikrobielle Aktivität war. Im Zuge einer Denitrifikation kam es dabei zu einer verstärkten Umsetzung des durch die Nitrifikation gebildeten Nitrats. Betrachtet man jedoch die Konzentrationen im Eluat beider Materialien nach der Kompostierung (Vergleich OKSK/KKSK), so kehrt sich dieser Effekt um. Hier zeigt KKSK höhere Werte als KSK. Durch die Kalkung und den damit verbundenen erhöhten pH-Wert kam es im Rahmen der Kompostierung zu einer verstärkten Nitrifikation. Die Nitratkonzentration erhöhte sich durch die Oxidation von Nitrit zu Nitrat. Der Effekt der Kompostierung allein auf die Eluatkonzentrationen war positiv, was ein Vergleich von OKS und OKSK zeigt. Hier dominiert der Prozess der Denitrifikation.

Ammonium

Die Kalkung hatte hier einen positiven Effekt auf die Ammoniumkonzentrationen im Eluat. Durch die Anhebung des pH-Wertes im Zuge der Kalkung in den leicht alkalischen Bereich, wurde die mikrobielle Aktivität und somit die Nitrifikation gefördert. Ein Rückgang der Ammoniumkonzentrationen (Vergleich OKS/KKS) und ein Anstieg der Nitrit- bzw. Nitratkonzentrationen war die Folge. Die Kompostierung zeigte hier ebenso positive Effekte (Vergleich OKS/OKSK). Hier kommt es zur Reduzierung der Gehalte durch den Austrag von Ammonium mit den im Kompostierprozess anfallenden Sickerwässern.

Arsen, Blei, Zink, Chrom

Beim Vergleich der Klärschlämme KKS und OKS war für diese Substanzen durch die Kalkung ein konzentrationsmindernder Effekt zu erkennen. Durch die Kompostierung gab es bei diesen Substanzen wenige bis keine positiven Effekte zu beobachten. Ursache dafür könnte die Zugabe von belastetem Grünschnitt als Strukturmaterial im Zuge des Kompostierungsprozesses sein.

Cadmium, Nickel, Kupfer

Beim Vergleich der Klärschlämme KKS und OKS ließ sich erkennen, dass die Kalkung zu einer höheren Verfügbarkeit von Cadmium, Nickel und Kupfer führte. Die Eluate des gekalkten Klärschlammes wiesen bis zu fünffache Konzentrationen gegenüber dem ungekalkten aus. Die erhöhte Stofffreisetzung lässt sich für Cadmium und Nickel wahrscheinlich auf den Ionenaustausch zurückführen. Aufgrund ähnlicher Ionenradien und gleicher Ionenladung ist die Austauschbarkeit von Cadmium und Nickel mit Calcium hoch. Dies macht diese Substanzen durch den Einbau in eluierbare Bestandteile wesentlich verfügbarer. Die Verfügbarkeit steigt somit durch die Kalkzugabe und wird im Klärschlamm vermehrt ausgetragen. Kupfer hingegen gilt eigentlich als guter Komplexbildner, dadurch ist es normalerweise wenig mobil und müsste weniger gut eluierbar sein. Durch die hohen DOC-Werte im gekalkten Klärschlamm bildet Kupfer aber durch koordinative Bindungen Komplexe mit dem vorhandenen DOC und wird als feiner Niederschlag ausgetragen. Zudem erhöht der DOC-Gehalt die Löslichkeit von Kupfer.

Betrachtet man die drei Materialien hingegen nach der Kompostierung, so wirkte sich hier die Kalkung positiv aus. Die Kompostierung bewirkte eine deutliche Herabsetzung im Vergleich von KKS zu KKSK. Aufgrund der höheren Verfügbarkeit von Cadmium, Nickel und Kupfer durch die Kalkung wird es wahrscheinlich während der Kompostierung durch Sickerwässer ausgetragen.

Trotz noch deutlich vorhandener Schadstoffbelastung konnte eine positive Wirkung sowohl durch Kalkung (Arsen, Blei, Zink, Chrom) als auch Kompostierung (Nickel, Cadmium, Kupfer) nachgewiesen werden. Dabei können die durchaus noch hohen Schwermetallkonzentrationen zum Teil auch auf in Kapillarwasser gespeichertes, bei der Kompostierung nicht abgeflossenes Sickerwasser zurückzuführen sein.

Organik

Weil nur ein begrenztes finanzielles Budget zur Verfügung stand und die zur Verfügung stehenden Probenvolumina nicht ausreichend waren, wurden die nach den Vorversuchen ausgewählten organischen Schadstoffparameter nur für einzelne W/F-Verhältnisse bestimmt. In den Tabellen 6 und 7 sind die analysierten Proben mit den dazugehörigen Ergebnissen dargestellt. Dabei findet eine Unterscheidung nach nicht nachweisbar (o), nachgewiesen (x) und Geringfügigkeitschwellenwerte überschritten (↑) statt.

Tabelle 6: Übersicht über den Analyseumfang für den ungekalkten Klärschlamm (OKS1 und OKS2) und den ungekalkten, kompostierten Klärschlamm (OKSK1 und OKSK2)

	OKS1				OKS2				OKSK1				OKSK2			
	W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis			
Parameter	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4
PAK		o	o		o	x				↑			o	o	o	
Nonylphenol		o				o				x				o		
Organozinnverb.			x				↑				↑				↑	
Moschusverb.			x				x				x				x	
PFT	o	o			o	o			x	x			o	x		
Estrogene							o				o				o	

Dabei wird deutlich, dass hauptsächlich die PAK, Organozinn- und Moschusverbindungen sowie die PFT nachgewiesen konnten. Überschreitungen der Schwellen- bzw. Grenzwerte in den Eluatn beschränkten sich auf die PAK und die Organozinnverbindungen.

Tabelle 7: Übersicht über den Analyseumfang für den gekalkten Klärschlamm (KKS1 und KKS2) sowie den gekalkten, kompostierten Klärschlamm (KKSK1 und KKSK2)

	KKS1				KKS2				KKSK1				KKSK2			
	W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis				W/F-Verhältnis			
Parameter	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4	0,3	1	2	4
PAK		↑	o		x	o	o		o	o				↑	↑	
Nonylphenol		o				o				o				o		
Organozinnverb.			x				x				x				x	
Moschusverb.						o	o				x			o	x	
PFT	o	o			o	o			o	x			o	x		
Estrogene			o				o				o				o	

Die Gehalte der restlichen Substanzen lagen größtenteils unter den Schwellen- bzw. Grenzwerten und den Nachweisgrenzen der Analyseverfahren. Aufgrund der spärlichen Datenlage ließ sich lediglich für die Organozinnverbindungen eine positive Wirkung durch die Kalkung sowohl vor als auch nach der Kompostierung beobachten.

Fazit

Der Bioabfallkompost wies die stärksten Belastungen innerhalb der untersuchten Düngemittelmateriale auf. Die stärksten Belastungen in allen drei Materialen gab es durch Schwermetalle sowie einzelne Organikkomponenten (PAK, Organozinn- und Moschusverbindungen sowie PFT).

Im Ergebnis der erweiterten Untersuchungen zum Klärschlammkompost konnte eine Minderung der Eluatbelastung vor allem für die Schwermetalle durch Kalkung und Kompostierung nachgewiesen werden. Ein Einsatz

als organisches Düngemittel zur Nitratminderung sollte potenziell möglich sein. Zuvor sind allerdings weitere Untersuchungen zu folgenden Schwerpunkten nötig:

- Für die immer noch bedenklich hohen Schwermetallgehalte sollte die hier untersuchte Behandlungsmethode weiterentwickelt werden, um diese noch weiter zu reduzieren. Potenzial liegt hier vermutlich noch bei den Kompostierungsbedingungen. Durch eine stärkere Reduzierung des Wassergehaltes könnten mit Sickerwässern die Schwermetalle weiter entfrachtet werden. Die Wirkung von Eisen(III)chlorid, welches sich bei der Behandlung von Klärschlamm positiv auf das Elutionsverhalten auswirkte, ist dabei eine alternative Variante.
- Der bisher aufgrund von finanziellen und verfahrenstechnischen Gründen nur stichprobenartig untersuchte Austrag von organischen Stoffen ist durch ergänzende Untersuchungen zu untersetzen.
- Zusätzliche Untersuchungen sind nötig, um ausreichende statistische Aussagen zur Streuung der anorganischen und organischen Inhaltsstoffe in den inhomogenen Ausgangsmaterialien zu treffen.
- Die Belastung der Klärschlämme und deren Eluate mit absorbierbaren organischen Halogenverbindungen (AOX) sollte aufgrund der mitunter hohen Toxizität und Persistenz in weiteren Versuchen untersucht werden.
- Um die Reduzierung von organischen Parametern durch biologische Abbauprozesse näher zu untersuchen, sollten Langzeitsäulenversuche durchgeführt werden. Bei der weiteren Vorgehensweise sind dabei sowohl Labor- als auch großtechnische Untersuchungen an Lysimetern zu empfehlen. Einen möglichen Versuchsstandort stellt hierfür die Station Brandis südlich von Leipzig dar.

Weitere zu beachtende oder zu empfehlende Details beim Einsatz von Klärschlamm sind:

- Das bei der Kompostierung notwendige Strukturmaterial (z. B. Grün- oder Strauchschnitt) muss mit Bedacht ausgewählt werden, weil dieses mitunter stark belastet ist und damit den Effekt der Kompostierung aufhebt. Die Belastung dieses Materials muss bei der Planung des Einsatzes von Klärschlammkompost berücksichtigt werden.
- Bei der Wahl des Klärschlammes selbst sollte die Wahl vor allem auf ländliche Klärwerke fallen. Die gegebenen Hintergrundwerte (Schwermetalle) sollten bei der Auswahl Berücksichtigung finden.
- Es sollten Kompostierungsversuche mit verschiedenen Strukturmaterialien (Strauch- und Grünschnitt sowie ggf. Baumrinden von Laubbäumen) und Kalkprodukten (mit unterschiedlicher Zusammensetzung der magnesiumhaltigen Branntkalk) durchgeführt werden, um die optimalen Kompostierungsbedingungen für die Herstellung eines in der Landwirtschaft einsetzbaren organischen Düngemittels zu erproben.

Literatur

- Bundesrat (2012): Unterrichtung durch die Europäische Kommission: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik. Berlin: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH.
- Bundestag und Bundesrat (2009): Düngegesetz (DüngG).
- Bundestag und Bundesrat (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV).
- Bundestag und Bundesrat (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).
- Bundestag und Bundesrat (2012): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG).

- Bundestag und Bundesrat (2012): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2006): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2008): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Bundes-Bodenschutzverordnung - BBodSchV).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2012): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlichen und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2012): Klärschlammverordnung (AbfKlärV).
- DIN 19528 (2009): Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen (Januar 2009).
- DIN 19747 (2009): Untersuchung von Feststoffen - Probenvorbehandlung, -vorbereitung und -aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen.
- DWA (29.-31.03.2011): Klärschlammtag. Fulda.
- DWA; SKARK & ZULLEI-SEIBERT (2007): DWA-Themen: Beeinflussung der Grundwasserqualität durch Wirtschaftsdünger und Sekundärrohstoffe – Empfehlungen -. Hennef.
- ENZNER, V.: Untersuchung des Elutionsverhaltens organischer und anorganischer Stoffe aus organischen Düngemitteln mit Hilfe von Schüttel- und Perkolationsversuchen. Masterarbeit. TU Dresden. Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten. Dresden. 08.02.2013.
- EU-Parlament (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Düsseldorf.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MKUNLV) (2005): Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Teil E: Organische Schadstoffe in Klärschlämmen – Bewertung und Ableitung von Anforderungen an die landwirtschaftliche Verwertung. Düsseldorf.
- Rat der europäischen Gemeinschaft (1991): Nitratrichtlinie (91/676/EWG).

7 Projekt „Qualifizierung Bodenschätzung“

Ruth Hoffmann, Aline Kästner - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

7.1 Ausgangssituation

Die Bodenschätzung in Deutschland geht auf das am 16. Oktober 1934 erlassene „Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz - BodSchätzG)“ zurück. Damit und den 1935 in Kraft getretenen „Durchführungsbestimmungen zum Bodenschätzungsgesetz“ begann eine deutschlandweite Bestandsaufnahme und Bewertung des landwirtschaftlich genutzten Bodens nach einheitlichen Verfahrensweisen und Methoden.

Zunächst erfolgte in einem Raster von ca. 50 x 50 m die punktuelle Feldkartierung (Grablöcher) der Bodenbeschaffenheit. Unter Zuhilfenahme eines Acker- bzw. Grünlandbewertungsrahmens konnte nachfolgend die Bonität, der Wert des Bodens, abgeschätzt werden (Verhältniszahl der Reinertragsunterschiede zur Maximalpunktzahl eines Eichstandortes). Flächen mit ähnlicher Bodenbeschaffenheit, Geländegestaltung, klimatischen und Wasserverhältnissen werden zu Klassenflächen zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Bodenschätzung sind in analogen Feldschätzungsbüchern und analogen Schätzungsurkarten sowie Nachschätzungsurkarten bei den Finanzämtern archiviert. Die Neufassung des Bodenschätzungsgesetzes (BodSchätzG vom 28.12.2007) spiegelt die seit den 1990er-Jahren gewachsenen Anforderungen an die Erhebung, Speicherung und Verwendbarkeit der Bodenschätzungsdaten wider:

„Zweck der Bodenschätzung ist es, für die Besteuerung der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen des Bundesgebiets einheitliche Bewertungsgrundlagen zu schaffen. Die Bodenschätzung dient auch nichtsteuerlichen Zwecken, insbesondere der Agrarordnung, dem Bodenschutz und Bodeninformationssystemen. **Die Ergebnisse der Bodenschätzung sollen automatisiert verarbeitet werden.**“

7.2 Zuständigkeiten bei der Umsetzung des Bodenschätzungsgesetzes

7.2.1 Datenerhebung (Finanzverwaltung)

Finanzämter

- digitale Erfassung (FESCH-Software) und Kontrolle (PESCH-Software) der Stamm- und Schichtdaten der Grablöcher
- dezentrale Speicherung der Grablöcher gemarkungsweise pro Finanzamt

Landesamt für Steuern und Finanzen (LSF)

zentrale Sicherheitskopie aller digitalen Grablöcher gemarkungsweise pro Finanzamt

7.2.2 Datendigitalisierung (Vermessungsverwaltung)

Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN)

- Einscannen aller Schätzungsurkarten und Nachschätzungsurkarten
- Übernahme der digitalen Bodenschätzungsflächen mit Klassenzeichen, Lage und Bezeichnung der Bodenprofile, Vergleichs(VSt)- und Musterstücke (MSt) ins Liegenschaftskataster (ALKIS)

Untere Vermessungsbehörden bei den Landkreisen

- Georeferenzierung der Scans
- Digitalisierung aller Bodenschätzungsflächen, aller Grablöcher, Vergleichs- und Musterstücke

7.2.3 Datenbestand, Datenformate, Datenaustausch

Landesamt für Steuern und Finanzen, Finanzämter (Stand 2013)

- ca. 800.000 Grablöcher, ca. 560 000 (70 %) erfasst in MS Access
- ca. 23.000 analoge Schätzungsurkarten
- ca. 10.000 analoge Nachschätzungsurkarten

Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (Stand 09.07.2013)

- ca. 19.400 gescannte Schätzungsurkarten (ca. 2/3 des Gesamtbestandes)
- geplantes Ende der Scan-Arbeiten: Sommer/2014
- Einführung ALKIS bei den unteren Vermessungsbehörden: 11/2013
- Beginn Digitalisierung Bodenschätzung im Landkreis Görlitz: I/2014
- Datenaustausch über NAS (Normbasierte Austauschchnittstelle, xml-basiert)
- Fortschreibungsdaten turnusmäßig bei Abruf über NBA (Normbasierte Bestandsdatenaktualisierung)

7.2.4 Datenauswertung (Umweltverwaltung)

Zeitgleich mit Inkrafttreten des neuen BodSchätzG erhielt das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie ab 2008 verstärkt Anfragen Dritter nach digitalen Bodenschätzungsdaten für nutzerorientierte Auswertungen unterschiedlichster Fragestellungen des Umwelt-, Landwirtschafts-, Planungs- und Kommunalbereiches.



Abbildung 1: Auswahl Nutzerkreis digitaler Bodenschätzungsdaten für bundesweite Anwendungen

Neben den Bodenreferaten benötigten noch weitere Referate im Geschäftsbereich des Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) zur Umsetzung ihrer Fachaufgaben digitale Bodenschätzungsdaten. Folgerichtig erteilte 2008 das SMUL dem Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Referat Boden/Geochemie, den Auftrag, die digitalen Bodenschätzungsdaten in das Fachinformationssystem Boden (FIS Boden) zu integrieren, mit dem Ziel der Bereitstellung großmaßstäbiger digitaler Bodenbasisinformationen und Bodenbewertungsdaten für vielfältige Fachanwendungen.

7.3 Nutzerkreis der digitalen Bodenschätzungsdaten innerhalb des LfULG

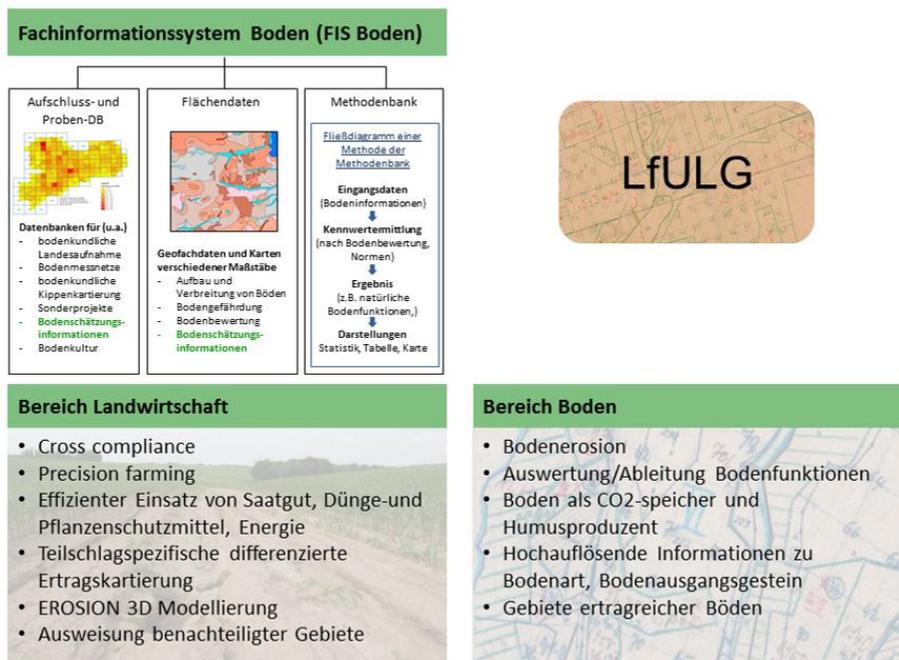


Abbildung 2: Nutzerschwerpunktbereiche digitaler Bodenschätzungsdaten im LfULG laut BodSchätzG

7.4 Projekt Qualifizierung Bodenschätzung

Momentan verfügt das LfULG über Bodenkarten und darauf aufbauender Auswertungen im Überblicksmaßstab (1 : 50.000 und kleiner). Flurstücks- und schlagbezogene Darstellungen bzw. planungsrelevante Aussagen können somit nicht hinreichend genau getroffen werden. Abbildung 3 verdeutlicht die Bohrpunktdichte der Bodenschätzung und damit einen erheblichen Informationsgewinn zum Bodenzustand und seiner Wertigkeit.

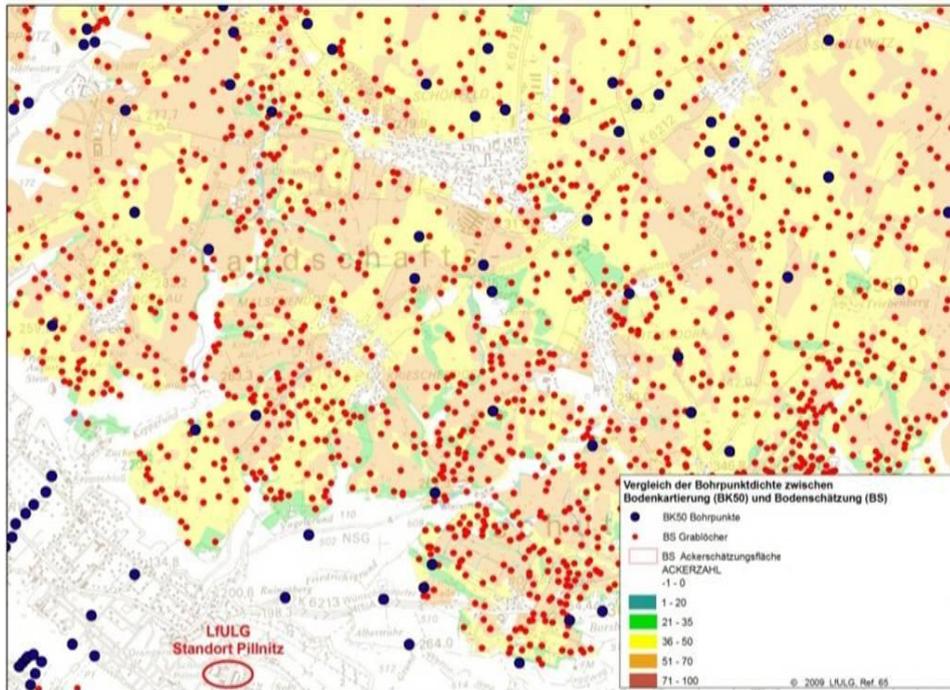


Abbildung 3: Vergleich Bohrpunktdichte BK50 (blau) mit Grablochdichte Bodenschätzung (BS) (rot)

Aufgrund der aktuellen Gesetzeslage (externe Datenerhebung und Datendigitalisierung) sieht das LfULG das Projekt „Qualifizierung Bodenschätzung“ als Gemeinschaftsprojekt an. In Planung und Durchführung des Projektes waren und sind demzufolge mehrere Geschäftsbereiche einzubinden, das Staatsministerium des Innern (SMI), das Staatsministerium der Finanzen (SMF) und das Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL).

Begonnen wurde im LfULG 2008 mit der Ist-Analyse vorhandener analoger und digitaler Punkt- und Flächen-datenbestände in den oberen und unteren besonderen Staatsbehörden (LfULG, Landesamt für Steuern und Finanzen und Finanzämter, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung). Die Ergebnisse sind zusammen mit Arbeitsablauf, Zeitplan und Kostenabschätzung im Fachgrobkonzept dokumentiert.

Zur Verifizierung des Zeitplans, des Nutzerkreises digitaler Bodenschätzungsdaten im LfULG und vor allem der geschätzten Kosten für die mittelfristige Finanzplanung im Umweltbereich wurde ein Fachfeinkonzept (WV 2010/2011) in Auftrag gegeben (Inhalt: Interviews in 13 Bundesländern zum Stand der Digitalisierung, zu Datenmengen, Software, zum Arbeitskräfteeinsatz, zu beteiligten Institutionen, Finanzmitteln etc.).

Die Ergebnispräsentation in einem Workshop zeigte, dass die Entscheidungen zur Digitalisierung und Weiterführung des Projektes auf ministerieller Ebene erfolgen müssen (drei Arbeitstreffen im Zeitraum zwischen 12/2012 und 07/2013). LfULG, LSF und GeoSN sind in die Treffen eingebunden.

Als entscheidende Kernfragen waren zu klären:

- Wer digitalisiert wann die Bodenschätzungsdaten?
- Welche Daten werden in welcher Form digitalisiert?
- Wo werden welche Daten gespeichert?
- Wer ist für welches Qualitätsmanagement zuständig?
- Wie und in welchen Zeiträumen erfolgt die Datenübergabe an die Projektpartner?
- Wer finanziert die Digitalisierung?

Im Anschluss an die Umstellung nach ALKIS erfolgt laut Aussage des GeoSN die Digitalisierung der Bodenschätzungsdaten in den unteren Vermessungsbehörden. Das bedeutet eine programmtechnische Anpassung der bundesweit vorgegebenen Rahmenbedingungen an die Anforderungen der sächsischen Landesvermessung bis hin zur praxistauglichen Anwendung.

Es zeigte sich, dass dieser Prozess längere Zeit benötigt (Planungen ab 2008, Einführung ALKIS → Beginn 11/2013 im Landkreis Görlitz).

7.5 Arbeitsstand November 2013

Es war abzusehen, dass im LfULG die Übernahme, Kontrolle, Speicherung, Aktualisierung, Übersetzung und Auswertung der enormen Datenmengen mit eigenen Kräften in akzeptablen Zeiträumen nicht zu leisten ist. Deshalb wurde zur Unterstützung der Projektgruppe Bodenschätzung im LfULG (drei Mitglieder) eine Projektstelle besetzt (04/2013 bis 12/2014).

Die Schwerpunktaufgaben für die Inhaberin der Projektstelle bestehen darin, parallel zur Einführung von ALKIS und in Vorbereitung erster digitaler Bodenschätzungsdaten des Landkreises Görlitz (gemarkungsweise) die vorgesehenen Arbeitsschritte laut aktualisiertem Arbeitsablauf des LfULG (2013) umzusetzen.

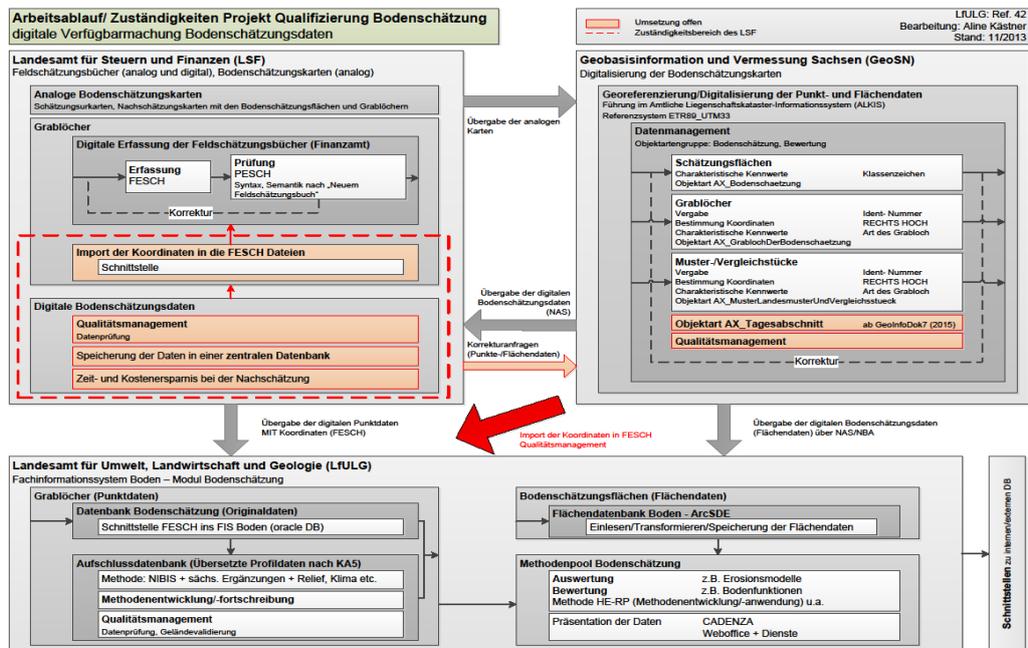


Abbildung 4: Arbeitsabläufe bei Datenerhebung, Datendigitalisierung und Datenqualifizierung

Konkret bedeutet das, im Zeitraum 05/2013 bis 12/2013 ein IT-Grobkonzept zu erstellen. Im Vordergrund steht die Konzipierung des Moduls Bodenschätzung innerhalb des FIS Boden (Ausgangssituation, Ist-Analyse, Geschäftsprozesse, Datenflüsse).

Ein erster Entwurf des Datenflussdiagramms wurde 06/2013 vorgelegt. Weiterhin übergab GeoSN zu Testzwecken der NAS und NBA zwei digitale Gemarkungen an das LSF und das LfULG (07/2013). Die digitalen Testdaten wurden im LfULG mit der Software FME Desktop 2012 ausgelesen und im Anschluss in ArcGIS 10.1 visualisiert.

Dem LSF steht intern nach wie vor keine Soft- und Hardware zur Datentestung zur Verfügung. Parallel zur Datentestung wird im LfULG ein IT-Fachkonzept ausgearbeitet. Das Ziel besteht in der Umsetzung des Moduls Bodenschätzung innerhalb des FIS Boden (Prozesse, Technologien der Datenübernahme, Datenmanagement, Qualitätsmanagement). Das fachliche Datenmodell konzentriert sich auf die Datenbeschreibung (Datennamen, Typ, Wertebereich, Datenstrukturen). Systemschnittstellen sind zu zentralen Datenbanken und FIS Boden zu schaffen (Arc-SDE-Datenbank, CADENZA-Anwendung, ORACLE-Aufschlussdatenbank, Schnittstelle FESCH-Dateien – Modul Bodenschätzung).

7.6 Testergebnisse

Während der Konzeption des Moduls Bodenschätzung und der Auswertung von digitalen Testobjekten des GeoSN ergaben sich etliche offene Probleme zu den Strukturen und Inhalten des Fachobjektes „Bodenschätzung“ im ALKIS. Um diese nach Möglichkeit noch vor Einführung von ALKIS im Landkreis Görlitz und vor Einführung der aktualisierten GeoInfoDok 7.0 der AdV (2015) programmieren zu können, fanden fünf Arbeitstreffen der Projektgruppe Bodenschätzung der oberen und unteren besonderen Staatsbehörden im Zeitraum von 08/2013 bis 11/2013 statt.

Die Ergebnisse können weitestgehend in der Programmierung berücksichtigt werden.

Offen ist das entscheidende Kriterium des Qualitätsmanagements beim LSF. Zu prüfen wären die Koordinatengaben und die exakte Kennzeichnung der digital erfassten Grablöcher im Abgleich mit der Lage und Bezeichnung der Grablöcher in den Originalschätzungskarten. **Die dazu vorgestellten Lösungsansätze sind aus Sicht des LfULG bisher nicht ausreichend.**

Beim GeoSN werden für ein Qualitätsmanagement einfache, automatisierte Prüfroutinen im Digitalisierungsprogramm DAVID implementiert.

Das LfULG kann Nachnutzern nur mit technisch und sachlich kontrollierten Ausgangsdaten qualitativ belastbare, großmaßstäbige Bodenbewertungsinformationen zur Verfügung stellen. Im Oktober 2013 wurde im LfULG das Pilotprojekt des Übersetzungsprogramms (Prototyp) der digitalen Bodenschätzungsdaten nach geltender Bodennomenklatur (KA5) mit sächsischen Erweiterungen vorgestellt.

7.7 Ausblick 2014

Die Fortsetzung der Programmierarbeiten am Übersetzungsprogramm mit erweitertem sächsischem Regelwerk (WV) ist im I. Quartal 2014 geplant. Internen Nutzern können voraussichtlich ab II. Quartal 2014 erste digitalisierte Bodenschätzungsdaten zur Verfügung gestellt werden.

Für qualifizierte Bodenschätzungsdaten erfolgt die Erarbeitung des „Methodenpools Bodenschätzung“ innerhalb des FIS Boden (geplant ab 05/2014 innerhalb der Projektstelle). Dazu erfolgt u. a. die Übernahme der hessisch-rheinland-pfälzischen Methode der Bodenfunktionsauswertung über Direktauswertung der Bodenschätzungsdaten. Weitere Auswertungsmethoden beruhen auf den nach KA5 transformierten Bodenschätzungsausgangsdaten.

Die Ergebnisse beider Methoden werden einem Qualitätsmanagement unterzogen, bis hin zur in situ-Überprüfung im Gelände. Das Referat Boden, Altlasten des LfULG schätzt nach derzeitigem Bearbeitungsstand, eigene, großmaßstäbige Auswertekarten zu Bodenfunktionen Ende 2014 zur Verfügung stellen zu können.

7.8 Nutzerkreis der digitalen Bodenschätzungsdaten außerhalb des LfULG

Externen Nutzern, wie Städten, Gemeinden, Planungsbüros, Universitäten, Hochschulen etc., soll ein web-basierter Datenzugriff auf Bodenschätzungsbasisdaten und Bodenbewertungsdaten, insbesondere Bodenfunktionsauswertungen, ab Ende 2014 ermöglicht werden.

Dieser Zeitpunkt ist allerdings von kontinuierlichen Digitalisierungsarbeiten und störungsfreiem Datenaustausch zwischen LSF, GeoSN und LfULG abhängig.

8 Bewertung der Schwermetallbelastung im Grundwasser gemäß Grundwasserverordnung am Beispiel des als diffus belastet eingestuften GWK FM 1

Heiko Ihling - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Ivo Paffrath - TU Bergakademie Freiberg, Studienrichtung Geoökologie

8.1 Einleitung

Im Ergebnis der Zustandsbewertung der Grundwasserkörper (GWK) gemäß Grundwasserverordnung (GrwV) in Umsetzung der WRRL in Sachsen durch das LfULG, basierend auf der Regionalisierung (2009/6 mittels SIMIK+) der Grundwasserbeschaffenheit, wurden sieben GWK mit Schwermetallbelastung ermittelt. Auch die Oberflächenwasserkörper in diesem Gebiet erreichen aufgrund der hohen Schwermetall- und Arsenkonzentrationen nicht den guten Zustand. Einer der belasteten Grundwasserkörper ist der Grundwasserkörper Freiberg FM 1 („Obere Freiburger Mulde“).

Der GWK FM 1 („Obere Freiburger Mulde“) liegt im südlichen Mittelbereich des Freistaates Sachsen im Direktionsbezirk Chemnitz und ist Bestandteil des Koordinierungsraumes Mulde – Weiße Elster der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe.

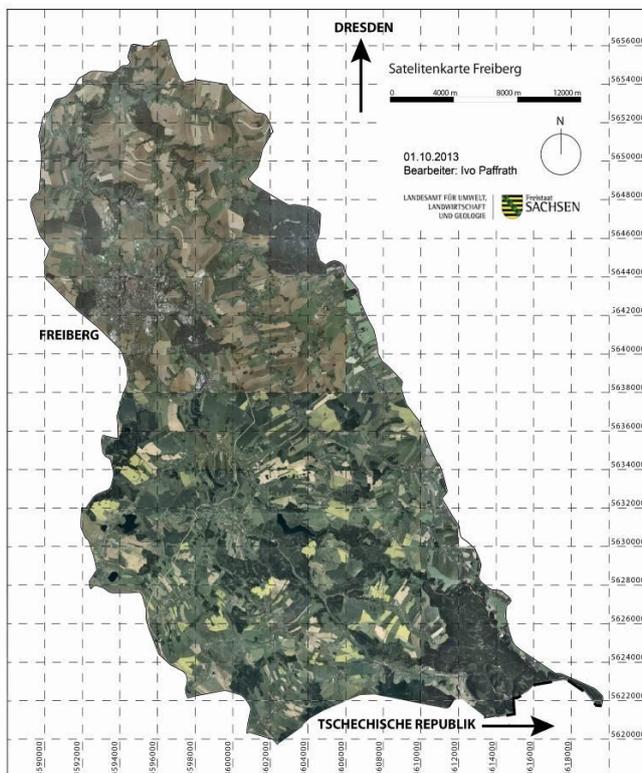


Abbildung 1: Übersicht zur Lage des GWK FM 1 innerhalb des Freistaates Sachsen

Er erstreckt sich gemäß der Nord-Süd-Ausdehnung südlich der gedachten Linie Mohorn – Neukirchen – Siebenlehn (südlich der Autobahn A 4) bis zur Grenze nach Tschechien. Die West-Ost-Ausdehnung reicht in etwa von Brand-Erbisdorf (Randlage des GWK FM 2-2) bis Klingenberg. Die Gesamtfläche beträgt ca. 528 km².

Als geologische Gesteinsart überwiegt im GWK FM 1 der kambrische Biotit- bzw. Zweiglimmer-Zweifeldspat-Orthogneis mit einem Flächenanteil von 33 %. Mit einem Anteil von 30 % nimmt der Zweiglimmer-Paragneis ebenfalls einen relativ großen Flächenbereich in Anspruch. Die Flächenanteile an den Gesteinsarten Glimmerschiefer, Skarne, Quarzit, Biotit-Monzogranit, Marmor, Granulit und Eklogit liegen unter 6 % der Gesamtkörperfläche und somit sind diese Gesteine im GWK FM 1 unterrepräsentiert. Noch geringer ist der Flächenanteil an Sedimentgesteinen wie Sande, Kiese, Schluffe und Sandsteine (ca. 2,8 % des GWK).

Im nördlichen Teil des GWK befindet sich der Freiburger Lagerstättendistrikt, der aus den Bergrevieren Freiberg-Muldenhütten, Halsbrücke und Brand-Erbisdorf besteht. In diesem Bereich dominiert der mittel- bis grobkörnig-schuppige Biotitgneis (Freiburger grauer Gneis) (BECK 1899). Dieser wurde durch wechselnde Druck- und Temperaturunterschiede stark beansprucht. Die entstandenen Spalten- und Kluftsysteme entlang von Störungen wurden als Zirkulationswege für hydrothermale Lösungen während Mineralisations-Zyklen verschiedenen Alters genutzt.

Es können die zeitlich aufeinanderfolgenden Mineralisations-Zyklen

- Quarz-Polymetall-Assoziationen (Typ „kb-Formation“) mit den Erzmineralen Bleiglanz, Zinkblende, Schwefelkies, Arsenkies und Kupferkies sowie der Gangart Quarz,
- Fluorbarytische-Bleierz-Assoziationen (Typ „fba-Formation“) mit den Erzen silberreicher Bleiglanz, Tetraedrit und fein verteilte Zinkblende, Schwefelkies sowie Kupferkies und den dominierenden Gangarten Schwer- und Flussspat,
- Wismut-Kobalt-Nickel-Silber-Assoziationen (Typ „biconi-Formation“) mit den Erzmineralen gediegen Silber, Rotgültigerz, Silberglanz, Zinkblende und Bleiglanz sowie den Gangarten Eisen- und Kalkspat

unterschieden werden. Die Hauptquellen für die Schwermetallbelastung im Boden und Grundwasser des GWK FM 1 stellen der frühere Erzbergbau und die Verhüttung, die metallherstellende und verarbeitende Industrie, (un-)sanierte Deponien und militärische genutzte Flächen. Entsprechend der Zustandsbewertung des GWK Freiburger Mulde wurden aufgrund der festgestellten Cadmiumbelastung die LAWA-Maßnahmenkennziffern 37 und 38, welche eine Reduzierung der Belastungen durch Bergbau und diffuse Quellen bewirken sollen, zugeordnet.

8.2 Aufgaben- und Zielstellungen der Auswertung der vorliegenden Daten

Wesentliche Schwerpunkte der Arbeiten zu diesem Kapitel sind die Auswertung der Probennahme- und Analysendaten relevanter sächsischer Grundwasseraufschlüsse aus dem Monitoringmessnetz gemäß WRRL und die Klärung der Ursachen für die hohe Schwermetallbelastung, v. a. durch Cadmium, Arsen, Blei und Zink des beprobten Grundwassers.

Zudem ist an Grundwassermessstellen mit ausreichend statistisch gesicherter Datenlage eine Trendbewertung der Schwermetallkonzentrationen unter Beachtung der Niederschlags- und Grundwasserstandsdaten zu realisieren.

Als weiterer Aspekt der Analyse, Untersuchung und Auswertung der Beschaffenheitsdaten im Grund- und Stollenwasser besteht die Frage, ob unter dem Gesichtspunkt der Verhältnismäßigkeit Maßnahmen zur Minderung der diffusen Schadstoffeinträge in den belasteten Bereichen des GWK vorgeschlagen werden können, die über die bereits umgesetzten Maßnahmen hinausgehen.

8.3 Durchgeführte Arbeiten zur Realisierung der Zielstellungen

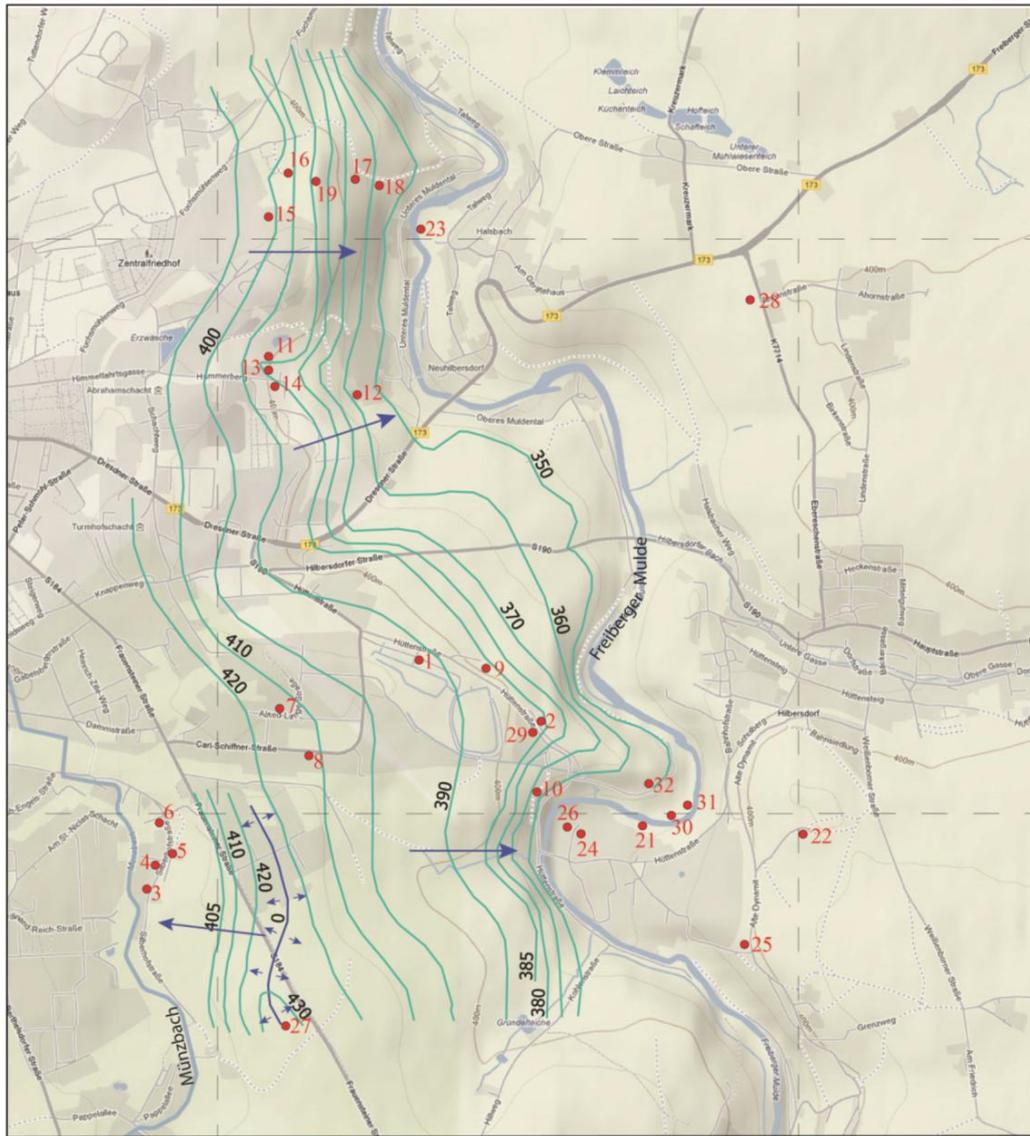
Die in diesem Kapitel zusammengestellten Untersuchungsergebnisse und deren komplexe Interpretation basieren maßgeblich auf den Auswertungen der Messnetzdaten zum Grundwassermonitoring im Rahmen einer Diplomarbeit von PAFFRATH (2013) an der TU Bergakademie Freiberg. Zur Bewertung möglicher Austräge von diffusen und punktuellen Schadstoffen aus Bergbauhalden und Hüttenstandorten sowie ehemaligen größeren Deponien wurden folgende Feld- und Untersuchungsarbeiten durchgeführt:

- Bestandsaufnahme vorhandener Daten (Geologie, Hydrogeologie, Boden-, Klima- und Bewirtschaftungs- sowie Flächennutzungsdaten) zum Grundwasserkörper FM 1
- Recherche zu den potenziellen Belastungs- und Schwerpunktgebieten für den Bereich der SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, für Standort der ehemaligen Hausmülldeponie Freiberg (Zuständigkeitsbereich der Entsorgungsdienste Kreis Mittelsachsen GmbH) sowie zu den altbergbaulichen Anlagen mit Relevanz bezüglich der Schwermetallproblematik wie Schächte und Gruben
- Stichtageinmessung der Grundwasserstände und Darstellung der Hydrodynamik für den westlichen Grundwasserzustrom zur Freiburger Mulde unter Berücksichtigung der Bergbausituation im Freiburger Lagerstättendistrikt
- Auswertung der Grundwasseranalysen aller geeigneten Grundwassermessstellen nach WRRL-relevanten chemischen Parametern wie pH-Wert, Redoxpotenzial und Sulfat, die Metalle Al und As sowie die Schwermetalle Pb, Cd, Cu, Ni und Fe mit Fokus auf zeitliche Trends und Korrelationen der Parameter untereinander
- Probennahme und Analytik auf o. g. Parameter sowie zusätzlich Hauptanionen und -kationen, Metalle der Seltenen Erden, radioaktiven Metalle (U, Th) und organische sowie anorganische Kohlenstoffgehalte an Grund- und Sickerwassermessstellen im Bereich des Haldenkomplexes des Davidschachtes
- Bewertung des chemischen Zustandes des GWK FM 1 unter Berücksichtigung der Kriterien und des Vorgehens gemäß Grundwasserverordnung (GrwV 2010) unter Berücksichtigung eines geeigneten Regionalisierungsverfahrens
- Recherche und Auswertung geeigneter ökologischer und effektiver Maßnahmen zur Minderung der Schwermetallbelastung im Grundwasser.

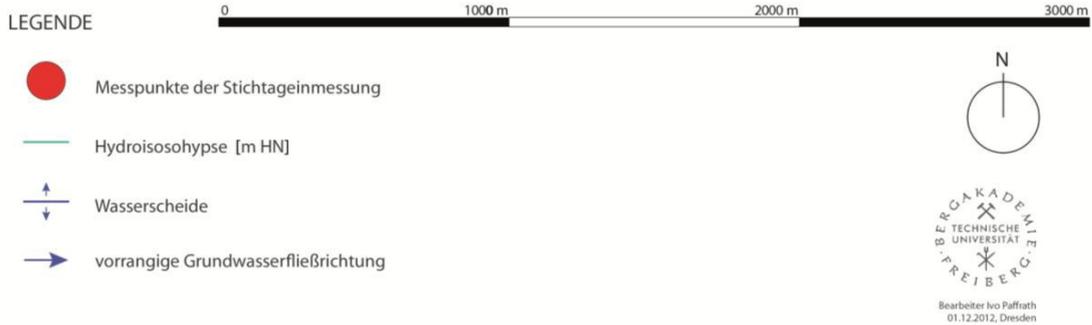
8.4 Grundwasserstandsmessung und Hydrodynamik

Am 21.09.2012 erfolgte eine Einmessung der Grundwasserstände an allen verfügbaren GWM und Brunnen im Raum Freiberg und Halsbrücke.

Die folgende Satellitenkarte enthält den auf Grundlage der Stichtagsmessung vom September 2012 konstruierten Hydroisohypsenplan. Die im Grundwassergleichenplan mit roten Zahlen gekennzeichneten GWM zeigen an, dass zum Stichtag ein Messwert gewonnen werden konnte.



Hydroisohypsenplan der Stichtageinmessung vom 21.09.2012



LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN

Abbildung 2: Karte Muldental östlich des Stadtzentrums von Freiberg mit Hydroisohypsen und verwendeten GWM der Stichtageinmessung vom 21.09.2012

Insgesamt konnten an 28 Grundwassermessstellen und zwei Brunnen Grundwasserstände eingemessen werden. Das untersuchte Grundwasserströmungsgebiet zeigt keine Beeinflussung durch private und öffentliche Brauch- und Trinkwassergewinnungsanlagen.

Eine relevante Beeinflussung des Grundwasserströmungsregimes erfolgt jedoch durch das mit dem Altbergbau bis in das Jahr 1969 im Zusammenhang stehende Anlegen von Wasserlösestollen und Gräben, wie u. a. durch den Rothschnberger Stolln (Anschluss aller großen Schächte des Freiburger Lagerstättenbezirks), den Königlich Verträgen Gesellschaft Stolln sowie den Roten Graben. Außerdem tritt eine Beeinflussung der Hydrodynamik teilweise durch die Herstellung von Dränagen an den Bahnstrecken sowie durch Gebäude- und Straßenbaumaßnahmen (v. a. im Bereich der Hütte Freiberg) auf.

Das geohydraulische Strömungsfeld kann in zwei Teilbereiche, getrennt durch die Bundesstraße B 173, untergliedert werden. Im südlichen Teil des untersuchten Grundwasserströmungsfeldes befindet sich eine Wasserscheide (siehe Abbildung 2). Westlich der Wasserscheide, die morphologisch-geologisch bedingt ist und durch die Hochlage des Freiburger Graugneises charakterisiert werden kann, erfolgt eine Grundwasserströmung in Richtung des Vorfluters Münzbach. Östlich der Wasserscheide und südlich der Dresdner Straße (B 173) fließt das Grundwasser in Richtung des Hauptvorfluters Freiburger Mulde ab.

Im Bereich nördlich der Dresdner Straße und östlich der stillgelegten Bahnstrecke Freiberg–Halsbrücke ist die Grundwasserfließrichtung grundsätzlich vorflutorientiert (Vorfluter: Freiburger Mulde). Gemäß dem Grundwassergleichenplan ergibt sich eine vorrangige Grundwasserströmungsrichtung von Westen nach Osten. Dieser Bereich weist jedoch eine starke Störung in den Haldenbereichen von Abraham-Schacht, Turmhof-Richtschacht und Davidschacht durch die Anbindung an die Wasserlösestollen auf.

Westlich der stillgelegten Bahnlinie Freiberg–Halsbrücke ist die Hydrodynamik durch die Schacht- und Haldenanlagen der Reichen Zeche sowie der Alten Elisabeth ebenfalls stark gestört. Der überwiegende Teil des Grundwasserzustroms aus westlicher Richtung (von der Geländeerhöhung „Herders Ruhe“ kommend) wird durch die Auffahrtsstrecken der beiden Schächte gefasst und fließt über den Rothschnberger Stolln in Richtung Triebisch ab. Das östlich der beiden Haldenkomplexe der Schachtanlagen auftreffende Niederschlagswasser versickert über den Braunerde-Boden in die Verwitterungszone des Festgesteins. Der überwiegende Teil fließt über die Verwitterungs- und Auflockerungszone des Freiburger Graugneises dem Haldenkomplex des Davidschachtes zu. Ein geringerer Anteil des Sickerwassers mündet in den Bahneinschnitt der stillgelegten Bahnlinie Freiberg–Halsbrücke.

8.5 Ergebnisse der Datenrecherche, der Trendbewertung und der Regionalisierung der Grundwasserbeschaffenheit

8.5.1 Standorte mit relevantem Schadstoffpotenzial für die Schwermetallbelastung im Grundwasser

Im Ergebnis der Recherchen zur Historie und Art des Bergbaus, der Verhüttung, der Haldenstandorte sowie der Abfallablagerungen ergaben sich folgende komplexe Standorte mit potenzieller Schwermetallbelastung für das Sicker- und Grundwasser: Alte Zinnhütte, Hütte Freiberg, EKM-Deponie Hüttenstraße, Haldenkomplex Davidschacht (incl. Spülhalde Davidschacht, Grobbergehalde Davidschacht, Spülhalde Hammerweg und Davidschachtanlage), Muldenhütten mit Ottodeponie und Hütte Halsbrücke. Die Lage der einzelnen Standorte, mit Ausnahme der Hütte Halsbrücke, ist der Abbildung 3 zu entnehmen.

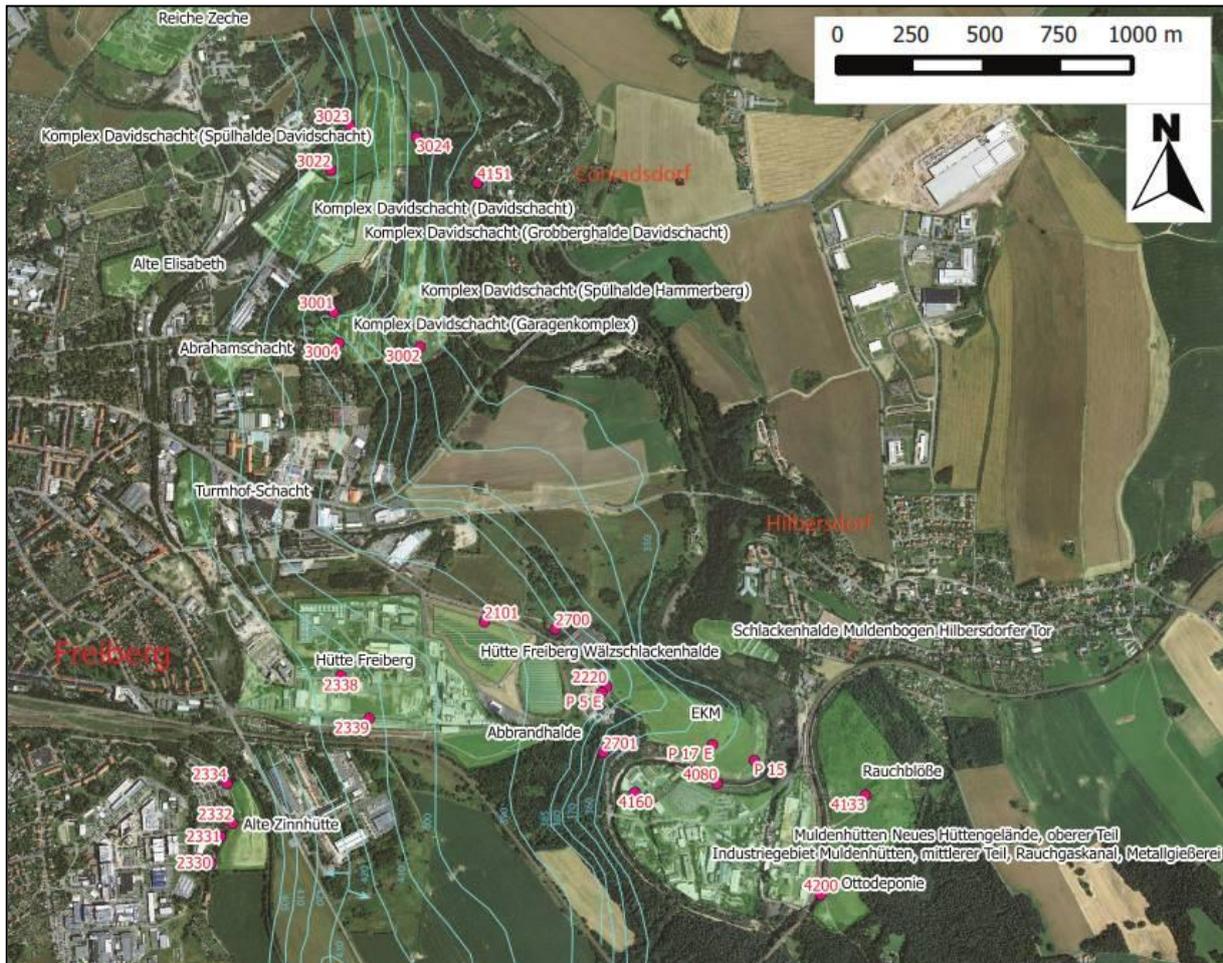


Abbildung 3: Übersicht zur Lage der Standorte mit relevantem Schadstoffpotenzial in Hinblick auf die Schwermetallbelastung des Grundwassers innerhalb des GWK FM 1 (Freiberger Lagerstättendistrikt) mit Hydroisohypsen und Grundwassermessstellen

Der Standort Muldenhütten befindet sich östlich der Freiburger Mulde, alle anderen liegen westlich des Hauptvorfluters. Die Hütte Halsbrücke liegt ca. 5 km nördlich des Stadtzentrums von Freiberg und ist in der Abbildung 3 nicht enthalten.

Tabelle 1 beinhaltet eine Charakterisierung der komplexen Altstandorte bzw. -ablagerungen in Hinblick auf die Historie, Flächen- und Volumengröße, das Gefährdungspotenzial für die Schwermetallbelastung im Grundwasser sowie die durchgeführten Maßnahmen zur Minderung der Schwermetallbelastung im Sicker- und Grundwasser.

Tabelle 1: Charakterisierung der Komplexstandorte und -ablagerungen mit Gefährdungspotenzial für die Schwermetallbelastung im Grundwasser

Komplexer Altstandort bzw. -ablagerung	Alte Zinnhütte	Hütte Freiberg	EKM-Deponie	Davidschacht Spülhalde	Davidschacht Grobbergehalde	Muldenhütten	Hütte Halsbrücke
Historie	<p>ab 1935 Zinnhütte bis 1945 Zinnproduktion im Wälzprozess</p> <p>ab 1945 Verarbeitung von Reicherzkonzentrationen sowie zinnreichen Schlacken im Flamm- und Kurzschachtofen</p> <p>1978 stillgelegt</p> <p>1988 Abbruch der Elektrolyseanlage</p>	<p><u>Haldenkomplex</u> bestehend aus Wälzschlacken-, Schutt- und Aschehalde, deponiertes Material mit hohen Konzentrationen an Arsen und den Schwermetallen Pb, Cu, Zn und Cd,</p> <p>Entzündung und Entstehen von Glimmbränden, Mitte der 1990er-Jahre erhebliche Oxidationsprozesse, Folge: → Oxidation von Sulfiden zu Sulfaten, Erhöhung Löslichkeit von Arsen und Schwermetallen</p> <p><u>Absetzhalde</u> ab 1969 in Betrieb zur Verspülung von Neutralisationstrüben aus min. Abfällen der Hüttenproduktion geformt</p> <p>1991 Schließung</p> <p><u>Abbrandhalde</u> Kiesabbrände der Schwefelsäureproduktion; teilweise Rückbau der Halde</p>	<p>ab 1960 Ablagerung von Industrieabfällen, Schlacken, Aschen und Hausmüll</p> <p>1963 Erstgenehmigung durch den Rat der Stadt Freiberg</p> <p>1972 Übernahme durch Stadtwirtschaft Freiberg</p> <p>1978 Anlage eines Absetzbeckens für Fäkalien im SE der Deponie</p> <p>nach 1984 Rückgang der Hausmüllentsorgung im Vergleich zur Industrie-müllentsorgung</p> <p>1997 Einstellung der Entsorgung von Abfällen auf der Deponie</p> <p>2003 Durchführung von Hochwasserschutzmaßnahmen</p>	<p>1943/44 Anlage eines Spülbeckens</p> <p>1947 bis 1950 Nutzung als Klärbecken durch die WISMUT AG</p> <p>1969 Stilllegung auf Grund von Havarien</p>	<p>1970 bis 1980 Ablagerung von taubem Gestein, Erzresten und Schlacken bis 1990 z. T. wieder abgebaut mittels Haldenrückgewinnungsanlage der Fa. Gelsenrot – Erzeugung von Schotter</p> <p><u>Spülhalde Hammerberg</u> (teilweise abstromig der Grobbergehalde gelegen)</p> <p>ab 1965 Nutzung als Klärteich mit Spültechnologie und verschiedenen Dämmen;</p> <p>1965 bis ca. 1970 Absetzanlage am Hammerberg</p>	<p>1856 Errichtung einer Schwefelsäurefabrik</p> <p>1857 bis 1910 Errichtung und Betrieb der Zinkhütte</p> <p>1859 Inbetriebnahme von Rauchgaskanal und Esse</p> <p>1862 bis 1991 Errichtung und Betrieb der Arsenhütte</p> <p>1926 Inbetriebnahme eines Bleischachtofens zur Verhüttung von Bleierzen</p> <p>ab 1970 Verhüttung von Akku-Schrott, Gekrätz und Altblei</p> <p>ab 1960 Gewinnung von Spurenmetallen, Arsenverbindungen und Germanium sowie Züchtung von Einkristallen</p> <p>1985 Errichtung der neuen Bleihütte zur Verarbeitung von Akku-Schrott</p> <p><u>Ottodeponie</u></p> <p>1971 bis 1988 Verbringung von Flugstäuben, Steinsanden und Schlacken</p>	<p>1962 Gründung (Edelmetallabscheidung – Gewinnung von Gold und Silber)</p> <p>ab 1963 Gewinnung von Blei, insgesamt drei Betriebsteile:</p> <p>1) Betriebsteil I incl. Feinhütte Muldenhütten (Hüttenkomplex) (1612 bis 1991)</p> <p>2) Betriebsteil II Grube Beihilfe, (1850 bis 1982)</p> <p>3.) Betriebsteil III Edelmetallgewinnung (1978 bis 1991)</p>

Komplexer Altstandort bzw. -ablagerung	Alte Zinnhütte	Hütte Freiberg	EKM-Deponie	Davidschacht Spülhalde	Davidschacht Grobbergehalde	Muldenhütten	Hütte Halsbrücke
Flächengröße [m ²]	30.000	∑ 536.000 [SALKA 2012], davon u. a. Wälzschlackenhalde 45.000 Absetzbecken 27.000	94.300	75.000	ca. 115.000 Spülhalde Hammerberg: ca. 130.500	unterer Bereich: 189.000 Neues Hüttengelände: 60.000 Ottodeponie: 35.000	445.000
Volumen [m ³]		690.000 [SALKA 2012]	1.348.700 [SALKA 2012]	∑ 760.000 (gesamter Haldenkomplex David-schacht)			
Gefährdungspotenzial für das Grundwasser (Schwermetalle)	mittel bis hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch	hoch bis sehr hoch	mittel bis hoch	hoch bis sehr hoch	hoch
Durchgeführte Maßnahmen bezüglich der Minderung der Schwermetallbelastung	2006 bis 2008: Sicherung durch Abdeckung, Abdichtung, Wasserableitung, Begrünung und Böschungsstabilisierung 2008: Ausformung der Endkontur und abschließende Bau- maßnahme 2013: Abschluss der Arbeiten zur Oberflächenrekultivierung und Böschungsstabilisierung	2000 bis 2005: Zwischenabdeckung, Temperaturmonitoring, Brandbekämpfung durch Ausbau glimmender Substanzen, Verfüllung von Haldeneinschnitten, Bau Oberflächenwasserfassung an der Nordseite des Haldenkomplexes, mineralische Abdeckung des Haldenkörpers und Rekultivierung	2003 bis 2005: Sanierung der Deponie, um ein Einbrechen zu verhindern, Müllberäumung, Abfallumlagerung, Herstellung einer temporären Oberflächenabdeckung, Rückbau der aktiven Deponieentgasung, Herstellung der Bewässerungseinrichtungen und Zaunbau; Planungen ab 2012 zur Endabdeckung der ehemaligen Deponie scheitern an zu hohen Setzungsraten	2000 bis 2005: Unterbindung des Fremdzufusses von Wasser aus dem Porzellanwerk und den Absetzbecken durch Versatz der Leitungen, Befahrung des Abwassersystems und Setzen von An- und Abstrompegeln, Bau eines Messwehres, Sicherungsmaßnahmen	ab 2010: Erdstoffüberbauung, mineralische Abdichtung mittels Trisoplast auf dem Plateau der Grobbergehalde (2 ha) – besteht aus 88 M-% Sand, 11,5 M-% aus Bentonit und zu ca. 0,2 M-% aus Polymeren (bezogen auf Trockenmasse); Schichtdicke 7 bis 10 cm, Durchlässigkeit: $k_f \leq 3 \cdot 10^{-11}$ m/s	<u>Arsenhütte:</u> (Betriebszeit: 1859 bis 1990) nach 1990 Abriss der Gebäude, Entsorgung von Flugstaub und kontaminiertem Holz, temporäre Sicherung durch Abdeckung mit unbelastetem Recyclingmaterial, Sicherung des Geländes durch bituminöse Oberflächenabdichtung und Sicherung der Böschungen mit Betonmatten und Herstellung einer Rekultivierungsschicht <u>Hüttenhof und Zwischenproduktfreilager:</u> 2007 bis 2008 Abdichtung der Flächen und Verringe-	<u>Halde am Pochwerk:</u> 2003 Sicherungsmaßnahme durch horizontale Einkapselung und Abdeckung der Oberfläche mit 0,5 m mächtiger Lösslehm-schicht (gesicherte Fläche: 8.000 m ²) <u>Obere Schlackenhalde:</u> 2005 bis 2006 Abschirmung der Radioaktivität, der Staubemission, des Direktkontaktes Boden – Mensch, der Erosion, der Standsicherheit sowie der Schwermetallausträge über den Wasserpfad durch Verfüllung mit

Komplexer Altstand- ort bzw. -ablagerung	Alte Zinnhütte	Hütte Freiberg	EKM-Deponie	Davidschacht Spülhalde	Davidschacht Grobbergehalde	Muldenhütten	Hütte Halsbrücke
						<p>rung der Durchsickerung um ca. 80 %</p> <p><u>Muldenbogen und Böschungen:</u> 2003 bis 2004 Haldenfußsicherung gegen Hochwasser durch Zyklopenmauer und Böschungspflaster, Sicherung des Plateaus mit Trisoplast und Erdstoffüberdeckung</p> <p><u>Ottodeponie:</u> 1995 bis 2001 mineralische Oberflächenabdichtung mit Restdurchsickerung von $\leq 10\%$ sowie Fassung und Ableitung von Niederschlagswasser</p>	<p>unbelastetem Material</p> <p><u>Schlackenhalde</u></p> <p><u>Hohe Esse:</u> 1993 bis 1995 Sanierung durch Erdstoffauftrag aus Baumaßnahmen</p>

Der mit ca. 50 ha größte Komplexstandort mit potenzieller Schwermetallbelastung, die „Hütte Freiberg“, besteht gemäß SALKA-Datenbank (2012) aus insgesamt 17 Altlastenteilflächen.

Die Abbildung 4 gibt einen Überblick zur tiefenabhängigen Verteilung der Bodeneluatkonzentrationen des Parameters Cadmium entlang eines West-Ost-Profiles durch das Gelände der „Hütte Freiberg“ aus dem Jahr 1993. Danach lagen die höchsten Cd-Belastungen im Bodeneluat im Bereich der Zinklaugerei, des Lagerplatzes für Zinkstaubrückstände, im Umfeld der Gebläse der Zinkblenderöstanlage und der Schwefelsäureanlage. Weitere, aber deutlich geringer cadmiumbelastete Flächen ergeben sich für den Bereich des Umfeldes eines Absetzbeckens, das westlich des großen Absetzbeckens und am Südrand der Schutt- und Aschenhalde liegt sowie im Bereich der ehemaligen Elektrolyse.

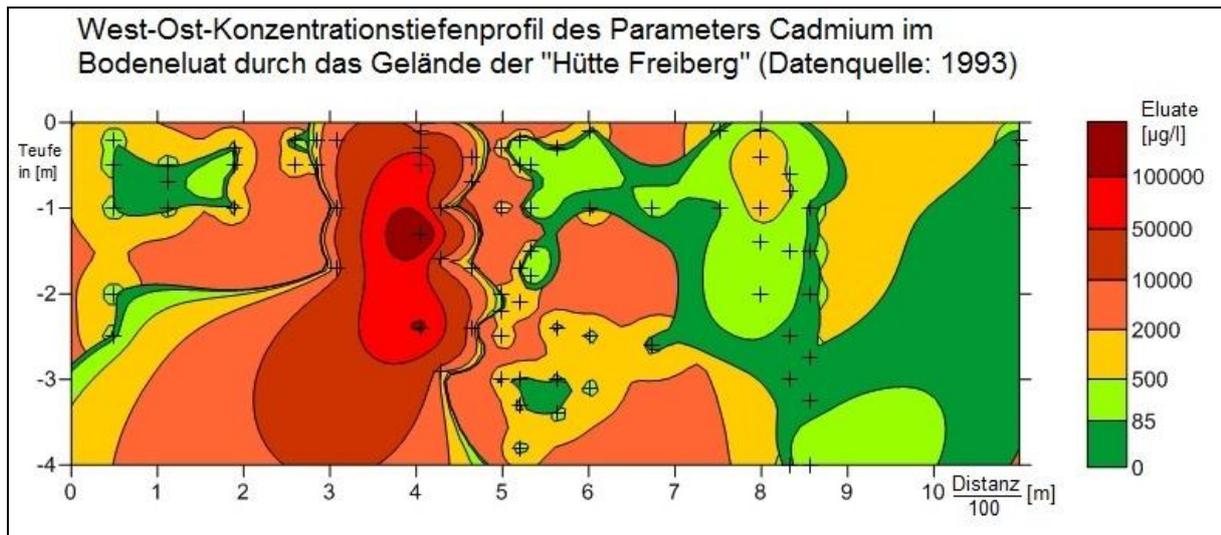


Abbildung 4: West-Ost-Konzentrationstiefenprofil des Parameters Cadmium im Bodeneluat durch das Gelände der „Hütte Freiberg“ (Datenquelle: 1993)

Abbildung 5 zeigt die Konzentrationsganglinien für den Parameter Cadmium an den vier bestehenden Grundwassermessstellen im Bereich der Hütte Freiberg.

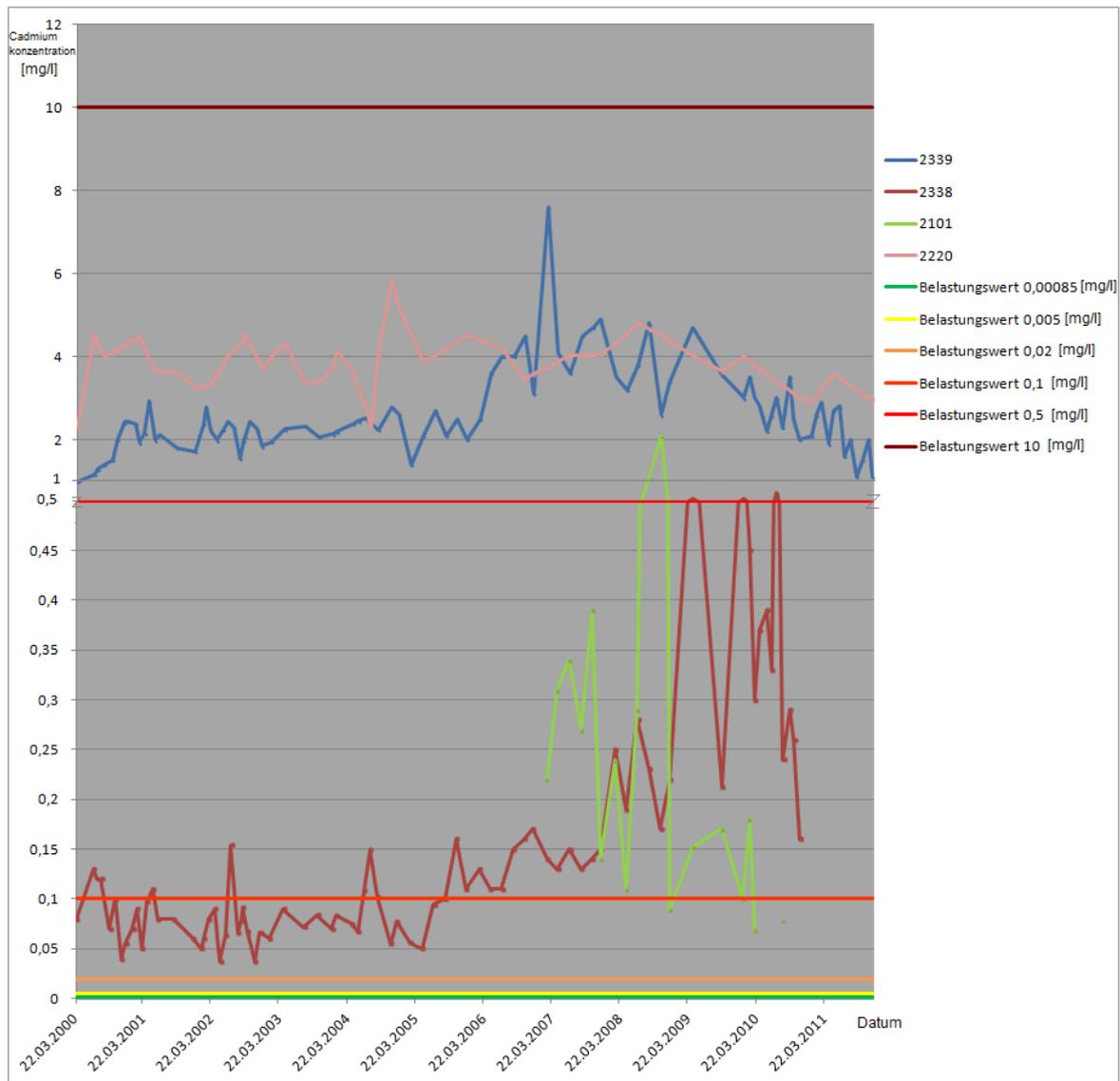


Abbildung 5: Konzentrationsganglinien für Cadmium an den GWM im Bereich des Altlastenkomplexes „Hütte Freiberg“

Die GWM 2101, die am Nordrand des komplexen Altlastenstandortes und somit abstromig der Wälzschlackenhalde gelegen ist, weist einen Schwankungsbereich der Cd-Konzentrationen von ca. 0,1 bis 2,1 mg/l auf, der einer sehr starken bergbaulichen Beeinflussung entspricht. Für die Beobachtungsreihe von 2007 bis 2011 ergibt sich leicht fallender Trend der Konzentrationsentwicklung für den Parameter Cadmium.

An der GWM 2339, die am Südrand des Haldenkomplexes „Hütte Freiberg“ liegt und den Abstrom der Erzlagerröhre repräsentiert, weisen die Cadmiumgehalte ein differenziert zu bewertendes Trendverhalten auf. Bis Ende 2009 steigen die Cd-Gehalte signifikant an. Danach fallen die Cd-Gehalte stark ab. Die gegenwärtig ermittelten Cd-Gehalte von 1 bis 2 mg/l liegen jedoch noch deutlich über dem Niveau einer sehr starken bergbaulichen Beeinflussung.

Die GWM 2338, die sich im zentralen Bereich des Haldenkomplexes der Hütte Freiberg befindet, weist bis April 2002 einen fallenden Trend der Cd-Konzentration auf. Danach stiegen die Cadmiumgehalte signifikant an. Gegenwärtig liegen die Cd-Gehalte mit 0,2 bis 0,4 mg/l im Niveau einer starken bergbaulichen Beeinflussung.

sung. Die Ursachen hierfür könnten gemäß den hydraulischen Verhältnissen durch einen Sickerwassereintrag und Grundwasserzustrom aus den Bereich der ehemaligen Elektrolyse sowie der Cadmiumanlage bedingt sein. Die GWM 2220, die sich im Abstrom des großen Absetzbeckens befindet, weist einen signifikant fallenden Trend der Cd-Gehalte auf. Die derzeitigen Cd-Konzentrationen liegen jedoch mit gemessenen Gehalten von 3,0 bis 3,2 mg/l deutlich im stark bergbaulich beeinflussten Belastungsniveau.

8.5.2 Trendbewertung der GWM im GWK FM 1

Für die Auswertung des Trendverhaltens der Grundwasserbeschaffenheit wurde der Zeitraum von 01.01.1990 bis 31.12.2012 gewählt. Die Mindestanzahl pro GWM beträgt fünf Analysenwerte, was einem Beobachtungszeitraum von mindestens fünf Jahren entspricht. Die statistische Sicherheit des Tests liegt bei >90 %.

Es konnte das Trendverhalten an insgesamt 16 Messstellen bewertet werden. Darunter befanden sich zwölf GWM sowie drei Quell- und eine Stollenwassermessstelle. Fünf Grundwassermessstellen weisen einen fallenden Trend für die Parameter Arsen, Blei und teilweise Cadmium auf. Eine Messstelle (Stollenwassermessstelle Gruna, Tiefer Hilfe Gottes Stollen; MKZG 49452004) zeigt jedoch in Hinblick auf die chemischen Parameter Cadmium ein ansteigendes Trendverhalten, im Gegensatz zu den Parametern Arsen, Blei und Zink.

Eine Grundwassermessstelle (MKZG 50460038 – im Zentrum des Haldenkomplexes der Hütte Freiberg) und eine Quellwassermessstelle (52472113 – Quelle Hermsdorf) weisen bezüglich der chemischen Parameter Cadmium und Zink einen eindeutig steigenden Trend auf.

Die übrigen neun Messstellen besitzen für die bewerteten vier prioritären chemischen Parameter Arsen, Cadmium, Blei und Zink kein eindeutiges Trendverhalten und müssen demzufolge differenziert betrachtet werden. In folgender Matrix erfolgte die Darstellung des Trendverhaltens der GWM im GWK FM1 mittels Auflistung nach chemischen Parametern und GWM sowie der farblichen Untersetzung, welche Konzentrationsklasse bezüglich der bergbaulichen Beeinflussung des Grundwassers überschritten wurde.

Tabelle 2: Trendmatrix für ausgewählte Grundwassermessstellen

MKZ	Bez.-SAXONIA	Messstellenart	Arsen	Blei	Cadmium	Zink
49452004		Stollen	n	-	+	-
52472105		Quelle	/	n	+	n
52472109		Quelle	+	n	n	n
52472113		Quelle	/	n	+	+
50460036	2101	GWM	-	-	-	-
50460037	2220	GWM	n	-	-	n
50460038	2338	GWM	-	+	+	+
50460039	2339	GWM	-	-	+	n
50460040	3001	GWM	-	n	-	-
50460041	3002	GWM	-	-	-	-
50460042	3150	GWM	n	n	n	n
50460043	4080	GWM	+	n	n	+
50460044	4151	GWM	-	-	-	-
50460045	4160	GWM	n	n	n	n
50460046	2330	GWM	-	-	n	-
50460047	2332	GWM	-	-	n	n

Legende	
	Klasse 0
	Klasse 1
	Klasse 2
	Klasse 3
	Klasse 4
	Klasse 5
+	Trend steigend
n	kein Trend
-	Trend fallend
/	keine Werte

8.5.3 Regionalisierung

Die Regionalisierung der Grundwasserbeschaffenheit wurde mittels Geostatistical Analyst von ArcGIS 9.3 durchgeführt. Hierzu wurden die Analysendaten der Monitoringmessnetze der WRRL, Daten Dritter (SAXONIA mbH, EKM) und die aktuell gewonnenen Analysendaten im Rahmen der Diplomarbeit genutzt. Anschließend erfolgte die Auswahl aller in Frage kommenden Messstellen (GWM, Brunnen und Stollenwassermessstellen) unter Berücksichtigung der Mittelwerte aus den Jahren 2006 bis 2012. Auf Grund der Datenlage wurde eine Berechnung unter Verwendung des Verfahrens „ordinary Kriging“ realisiert.

Im ersten Schritt wurden hierzu die Datenbankauszüge in Punktlayer umgewandelt und in das Geoinformationssystem ArcGIS eingelesen. Nach einigen Testläufen ergab sich, dass die Messpunktdichte im südlichen Grundwasserkörper sehr gering ist. Daher wurde eine Trennung in einen nördlichen Grundwasserkörper-(N-GWK) und südlichen Grundwasserkörperbereich (S-GWK) vorgenommen. Die Abgrenzung verläuft von West nach Ost von Zug in Richtung Rosine, vor Niederbobritsch in Richtung Naundorf zum Tharandter Wald. Begründet wird dies durch den Unterschied zwischen dem vererzten metamorphen Festgestein und dem unverzten Gesteinsbereich. Es wurde versucht, ein optimales Verhältnis zwischen Flächenausdehnung, Landnutzung, Eintragsquellen und Hydrologie zu erzeugen. Gestützt wird diese Entscheidung durch die Ergebnisse von früheren Arbeiten (SEGGERN 2007; KUNAU 2003), die eindeutig das Freiburger Bergbaurevier als Ursprungsgebiet für die erheblichen Schwermetalleinträge in der Freiburger Mulde identifizieren.

Der S-GWK umfasst die Messstellen mit den Messstellenkennziffern (MKZG) 50462252, 50460032, 51462001, 51460001, 51460003, 51460004, 51460005, 51462158, 51462726, 52460001, 52460002, 52472105, 52472108, 52472109 und 52472113. Bei diesen Messstellen kann fast ausnahmslos keine bzw. eine geringe Schwermetallbelastung festgestellt werden. Das Areal umfasst ca. 383 km².

Dagegen weist der N-GWK (prinzipiell alle im Freiburger Raum erfassten Messstellen, auf jedem Fall die GWM mit den MKZG 50460036, 50460038, 50460039, 50460040, 50460041, 50460044, 50460043, 50460045, 50460046, 50460047) sehr stark räumlich differenzierte und sprunghafte Ergebnisse auf. Hierbei liegen hohe Konzentrationen teilweise direkt neben geringeren Gehalten. Die Messstellen des N-GWK bestehen zum großen Teil aus Messstellen, die aus dem Bestand der SAXONIA GmbH, teilweise der EKM und dem Landesmessnetz stammen. Die Flächengröße beträgt ca. 146 km².

Die Grundlage für die Bewertung der Regionalisierungsergebnisse mit Hilfe des Verfahrens „ordinary Kriging“ bildete das Flächenkriterium von 25 km² als Belastungsbereich, ab dem ein Grundwasserkörper (> 75 km²) als belastet einzustufen ist. Dazu werden alle Klassenflächen (außer K 0 = geringe Belastung) aufsummiert. Im Resümee ergaben sich aus der durchgeführten Regionalisierung nachfolgende Ergebnisse:

Tabelle 3: Übersicht zu den Ergebnissen der Regionalisierung der Grundwasserbeschaffenheit für den GWK FM 1

Übersicht der Regionalisierungsergebnisse der Grundwasserbeschaffenheit [Angaben in km²]

Klasse	Aluminium	Arsen	Blei	Cadmium	Eisen	Kupfer	Nickel	Queck.	Sulfat	Zink	pH	Leitf.
0	18,8	22,7	44	9	74,9	-	29	145,9	-	-	-	-
1	18,7	45,1	45,7	26,8	71	3	15,2	-	146	23,6	-	134,1
2	24,7	41,4	53,4	24,6	-	33,8	72,4	-	-	17,3	92,3	11,9
3	71,4	32,9	2,8	45,6	-	63,2	12,8	-	-	27,3	53,7	-
4	5,3	3,9	-	23,9	-	30,8	16,5	-	-	24,4	-	-
5	7	-	-	16,1	-	15,2	-	-	-	53,4	-	-
Summe korrigiert	127,1	123,3	101,9	137,0	71,0	146,0	116,9	0,0	146,0	146,0	146,0	146,0

Unter Berücksichtigung einer kleinen bergbaulichen Beeinflussung (Einhaltung der Schwellenwerte der GrwV, der GFS-Werte der LAWA und der geogenen Hintergrundwerte) ergibt sich für alle betrachteten chemischen Parameter, mit Ausnahme von Quecksilber, eine Überschreitung des Flächenkriteriums gemäß WRRL. Bei diesen chemischen Parametern wurde die als repräsentativ eingeschätzte Mindestanzahl von 30 Konzentrations-Punktwerten eingehalten. Allerdings ist die flächenhafte Verteilung ungünstig.

Gemäß der Ergebnisse der Regionalisierung muss der GWK FM 1 bezüglich der chemischen Parameter Al, As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn und Sulfat als belastet eingestuft werden.

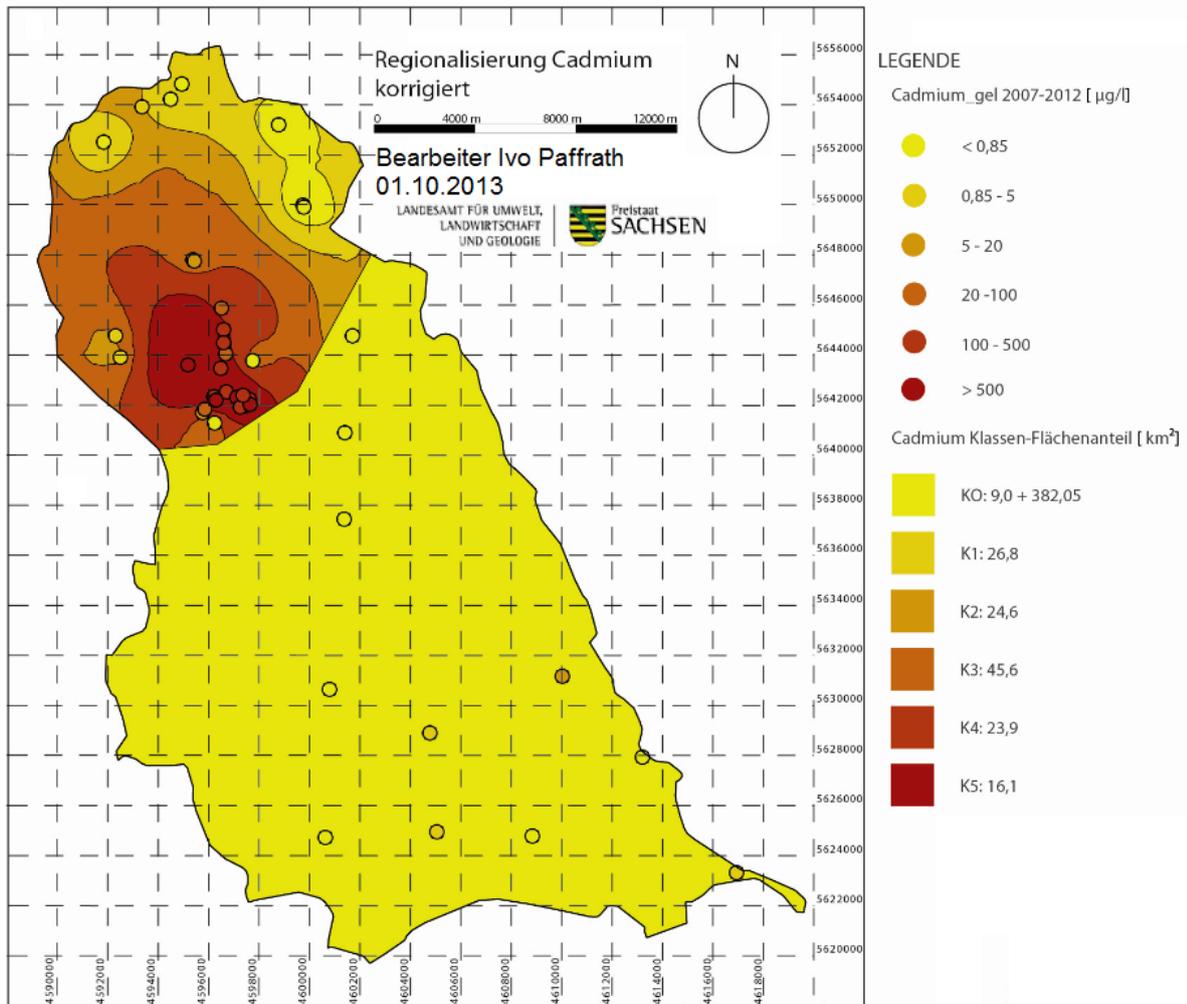


Abbildung 4: Regionalisierungsergebnis für den Parameter Cadmium des Grundwasserkörpers FM 1

8.6 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse zeigt, dass der Altbergbau und die ehemalige Hüttenindustrie die Wasserqualität im Grundwasserkörper FM 1 („Obere Freiburger Mulde“) deutlich beeinträchtigen. Die hauptsächlichen Ursachen der hohen Schwermetallbelastung im Grundwasser sind Auslaugungsprozesse von Haldenmaterial (Spül- und Grobbergehalden), Rückstände aus der Lagerung, dem Transport und der Verladung der Roherze, Feinstaubrückstände des Verhüttungsprozesses der sulfidischen Erze, Emissionen und sedimentierte Partikel (Stäube und Aerosole) aus der Verhüttung der Erze sowie schwermetallbelastete Sickerwasseremissionen aus Industrie- und Hausmülldeponien. Bei zahlreichen chemischen Parametern, wie v. a. Arsen, Schwermetallen (Pb, Cd, Cu, Fe, Ni und Zn) und Sulfat treten im nördlichen Teil des GWK FM 1 zum Teil deutliche Überschreitungen der Schwellen- und geogenen Hintergrundwerte auf, sodass über effektive und nachhaltige Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen nachgedacht werden muss.

Ein Sicherungs- und Sanierungsbedarf leitet sich entsprechend der Bewertung der Schwermetallkonzentrationen sowie der Trendbewertung der Schwermetallgehalte im Grund- und Stollenwasser für die komplexen Alt-

standorte Hütte Freiberg sowie Muldenhütten und den Haldenkomplex des Davidschachtes ab (u. a. PAFFRATH 2013).

In Bezug auf den komplexen Altstandort „Hütte Freiberg“ mit den Haupteintragsherden für die Schwermetallbelastung, wie Zinklaugerei, Lagerplatz für Zinkstaubrückstände, Umfeld der Gebläse der Zinkblenderöstanlage, der Schwefelsäureanlage, der Elektrolyse und der Cadmiumanlage sollte über eine In-situ-Immobilisierung der Schwermetalle, Versiegelung der Flächen mit Asphalt bzw. lokal Bodenaustausch nachgedacht werden. Außerdem sollten aus ökologischen Gesichtspunkten (Entlastung der Schadstofffrachten über das Sicker- und Grundwasser in den Hauptvorfluter Freiburger Mulde) Überlegungen zur Fassung und Sammlung des stark schwermetallbelasteten Grundwassers und die anschließende Ableitung in den Rothschönberger Stolln angestellt werden.

Für den Haldenkomplex des Davidschachtes wird eine separate Wasserhaltung der Haldensickerwässer mit anschließender Behandlung (inkl. der Berücksichtigung der Wasserlösestellen) entsprechend der vorhandenen Belastungssituation vorgeschlagen. Dabei sind nach Möglichkeit Fremdwasserzuflüsse auszubinden. Zudem ist eine unkontrollierte Verschleppung der Schadstoffe in die Verwitterungs- und Auflockerungszone des Gneises sowie in die mit dem Grundwasserleiter kommunizierenden Vorfluter (Freiberger Mulde und Münzbachtal) zu vermeiden (Verhinderung/Minderung der Kontaminierung an der Sohle des Vorfluters). Die regelmäßige Entfernung Schadstoffakkumulierender Flora und/oder Sedimenten entlang der Mulde wäre zu prüfen.

Zudem sollte das Messnetz zum Grund- und Stollenwassermonitoring im nördlichen Teil des GWK verdichtet werden, um relevante Eintragsquellen besser bestimmen und Wirkungseffekte von durchgeführten Minderungsmaßnahmen an den einzelnen Schadstoffeintragsherden beobachten und bewerten zu können. Die Regionalisierung der Grundwasserbeschaffenheit kann als ein geeignetes Werkzeug zur Bewertung der Belastungssituation im Grundwasserkörper angesehen werden. Auf Grundlage des erarbeiteten Hydroisohypsenplanes sowie der Ergebnisse der Altlastenuntersuchung der komplexen Altstandorte und -ablagerungen sollte der Versuch unternommen werden, relevante und noch wirksame Schwermetalleintragsherde zu ermitteln.

Gemäß der Regionalisierungsergebnisse sind durchschnittlich 127 km² (11 chemische Parameter, ausgenommen Quecksilber) des GWK FM 1 im belasteten Zustand (= 24,1 % der Gesamtfläche des GWK). Die Mindestbelastungsfläche im korrigierten Zustand beträgt dabei 71 km² (= 13,5 % der Gesamtfläche des GWK).

Entsprechend der aktuellen (2012) Konzentrationen sind bezüglich der Parameter Aluminium, Arsen, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zink sowie der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit, gemessen an der Anzahl der Punkteinträge (n >4), zu hohe Belastungen festgestellt worden.

Das in der WRRL festgeschriebene Ziel des guten chemischen Zustandes des Grundwassers kann für diesen GWK aller Voraussicht noch bis zum Jahr 2015 und vermutlich auch bis zum Jahr 2021 (Ende des 2. Bewirtschaftungsplanzeitraumes) nicht erreicht werden.

8.7 Literaturverzeichnis

- Beak Consultants GmbH (1996): Historische und orientierende Erkundung und Bewertung radioaktiver Altlasten auf Liegenschaften der Saxonia Freiberg.
- BECK, R. (1899): Geologische Spezialkarte des Königreiches Sachsen, Sektion Freiberg, Blatt 80 (5046). Maßstab 1:25.000. 2. Auflage. Leipzig.
- BIUG (2008): Detailuntersuchung (DU) des Wasserpfades an der Spülhalde Davidschacht. Freiberg. Freiberg. 05.02.2009.
- G.E.O.S. Freiberg (2010): Detailuntersuchung des Wasserpfades am Objekt „Spülhalde Davidschacht“. Halsbrücke. 2010.
- G.E.O.S. Freiberg (2013): Migrationswege stark mineralisierter Haldensickerwässer auf den Königlich-Verträglichen Gesellschaft-Stolln im Bereich der alten Erztransportstrecke. PowerPoint-Folie von G.E.O.S. Freiberg. übermittelt am 28.03.2013.
- GREIF, A.; KLEMM, W. (2010): Geogene Hintergrundbelastungen. LfULG-Schriftenreihe, Heft 10/2010. Dresden. 26.04.2010.
- Grundwasserverordnung (GrwV) (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers vom 09.11.2010. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 56, ausgegeben zu Bonn am 15.11.2010.
- KUNAU, JAHN (2003); Praktikumsarbeit: Die Schwermetallbelastung der Freiburger Mulde im Abschnitt Muldenhütten – Obergruna unter Bezugnahme auf das Altlastenprojekt SAXONIA; RP Chemnitz, UFB.
- NEUMANN, CH. (2007): Ermittlung der Hydrodynamik mit Hilfe von Tracertests im Richtschacht Reiche Zeche/ Freiberg (Sachsen). Studienarbeit. TU Bergakademie Freiberg. Freiberg.
- PAFFRATH, I. (2013): Auswertung der Schwermetallbelastung an Grund- und Oberflächenwassermessstellen des Grundwasserkörpers (GWK) „Obere Freiburger Mulde“ (GWK FM 1). Diplomarbeit. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg. 24.05.2013.
- SALKA (2012): Datenbank des LfULG; Link: <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/12935.htm>
- SEGGERN, D. (2007); Diplomarbeit: Schwermetall- und Arsenbelastung der Freiburger und Vereinigten Mulde 2000 – 2004. RP Chemnitz, UFB.

9 Methoden zur Bestimmung der Aquifer- und Kippsubstrateigenschaften in einer Bergbauregion – Fallbeispiel Braunkohlentagebau Nochten

Heiko Ihling, Ruth Hoffmann - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Sabine Willscher, Doreen Knippert, Denise Kühn, Peggy Schuster - TU Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten

Denise Umoh, Kay Knöller, Christina Jeschke - Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

Henry Schlönvoigt - TU Dresden, Institut für Geographie

9.1 Einleitung

In der Lausitz sind bis zu 2.500 km² vom Bergbau, z. B. durch aktiven Tagebau, Kippflächen und Grundwassererhaltung, beeinflusst (GRAUPNER 2012). Im Kippengrundwasser ehemaliger Tagebauflächen können sich große Mengen an anorganischen Kontaminanten wie Sulfat, Eisen und Ammonium lösen. Aus einer interdisziplinären Untersuchung (Abbildung 1) von Grundwasser und Sediment auf einem Altkippenbereich des Tagebaus Nochten sollen Lösungsansätze zur Verbesserung der physikochemischen Parameter des Kippengrundwasserleiters und der nachfolgenden Bergbausanierung entwickelt werden.



Abbildung 1: Methodenkonzept zur Ermittlung der Ammonium- und Sulfatbelastung im Grundwasser von bergbaubeeinflussten Gebieten

9.2 Aufgaben- und Zielstellung

Die Landschaft der Niederlausitz ist teilweise stark geprägt durch die Aktivität des Braunkohlentagebaus. Die dortige Umwelt wird durch Rekultivierungsmaßnahmen gestaltet und durch Sanierungskonzepte geprägt, um den niedrigen pH-Werten in Wasser und Boden entgegenzuwirken und die Beeinträchtigung des Oberflächenwassers und Grundwassers durch „Acid Mine Drainage“ (AMD) zu vermindern.

Im Ergebnis der Zustandsbewertung der Grundwasserkörper (GWK) in Sachsen gemäß WRRL im Juli 2009 ergeben sich vier GWK, bei denen ein schlechter Zustand auf Grund der Ammonium- und Sulfatbelastung zu verzeichnen ist. Es handelt sich um die GWK SAL GW 059 (Weißelsterbecken mit Bergbaueinfluss), SE 1-1 (Hoyerswerda), SP 2-1 (Niesky) und SP 3-1 (Lohsa-Nochten). Hierbei nimmt der Tagebau Nochten einen bedeutenden Flächenanteil des GWK SP 3-1 in Anspruch (ca. 14 % des sächsischen Teils des GWK).

In den im schlechten Zustand befindlichen GWK sind die hohen Ammonium- und Sulfatgehalte v. a. auf die Kippen- bzw. Abstrombereiche der Kippengrundwasserleiter konzentriert.

Der Schwerpunkt eines FuE-Vorhabens bestand in der Durchführung von vergleichenden Untersuchungen an tiefenabhängigen Sediment- und Grundwasserproben auf der Abraumkippe mit unterschiedlicher Nutzung in Zusammenarbeit mit dem Bergbautreibenden, der VATTENFALL Europe Mining AG, die im Rahmen des Messstellenneubaus für das Grundwassermonitoring im Jahr 2011 gewonnen wurden. Dabei wurde exemplarisch an je einer Grundwassermessstellen(GWM)-Bohrung die Problematik der Ammoniumbelastung auf den folgenden beiden Standorttypen untersucht:

- rekultivierter Kippenbereich mit Waldnutzung
- rekultivierter Kippenbereich auf einer Sukzessionsfläche

Im Abschluss dieses FuE-Vorhabens mit der Thematik „Erste Ergebnisse zur Klärung der Ursachen der hohen Ammoniumbelastung im Grundwasser der rekultivierten Kippe des Tagebaus Nochten“ werden alle verwendeten Methoden zur Charakterisierung des Kippengrundwasserleiters vorgestellt und hinsichtlich ihres Nutzens und ihrer Grenzen bewertet. Seit 2011 wurden dazu in mehreren Messkampagnen und Feldeinsätzen auf dem Gebiet des Tagebaus Nochten zur Durchführung von physikohydrochemischen, mikrobiologischen oder isotopegeochemischen und bodenkundlichen Analysen Grundwasser-, Sediment- und Kippenbodenproben entnommen und in nachgeschalteten Laboreinrichtungen und -experimenten weiter untersucht.

9.3 Hydrogeologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet innerhalb des Tagebaus Nochten

Die Abbildung 2 enthält eine Übersicht zur Lage des Untersuchungsgebietes innerhalb des Tagebaus Nochten mit der Schnittpur eines Querprofilschnittes (SW–NE verlaufend) zur Verdeutlichung des Zustandes vor 1969, d. h. vor Aufschluss des Tagebaus, und einer nahezu analog verlaufenden Schnittpur eines hydrogeologischen Querpofilschnittes mit dem jetzigen Zustand, d. h. nach Braunkohle- und Abraumgewinnung sowie der anschließenden Kippsubstratschüttung auf der Kippe des Tagebaus mittels Abraumförderbrücke (AFB 60) und Absetzer. Zudem sind in der Übersichtskarte neben den Grundwassermessstellen (GWM) die Hydroisohypsen der Stichtageinmessung von Mai bis Juli 2011 und die Lage der Randriegel Nord und Süd enthalten.

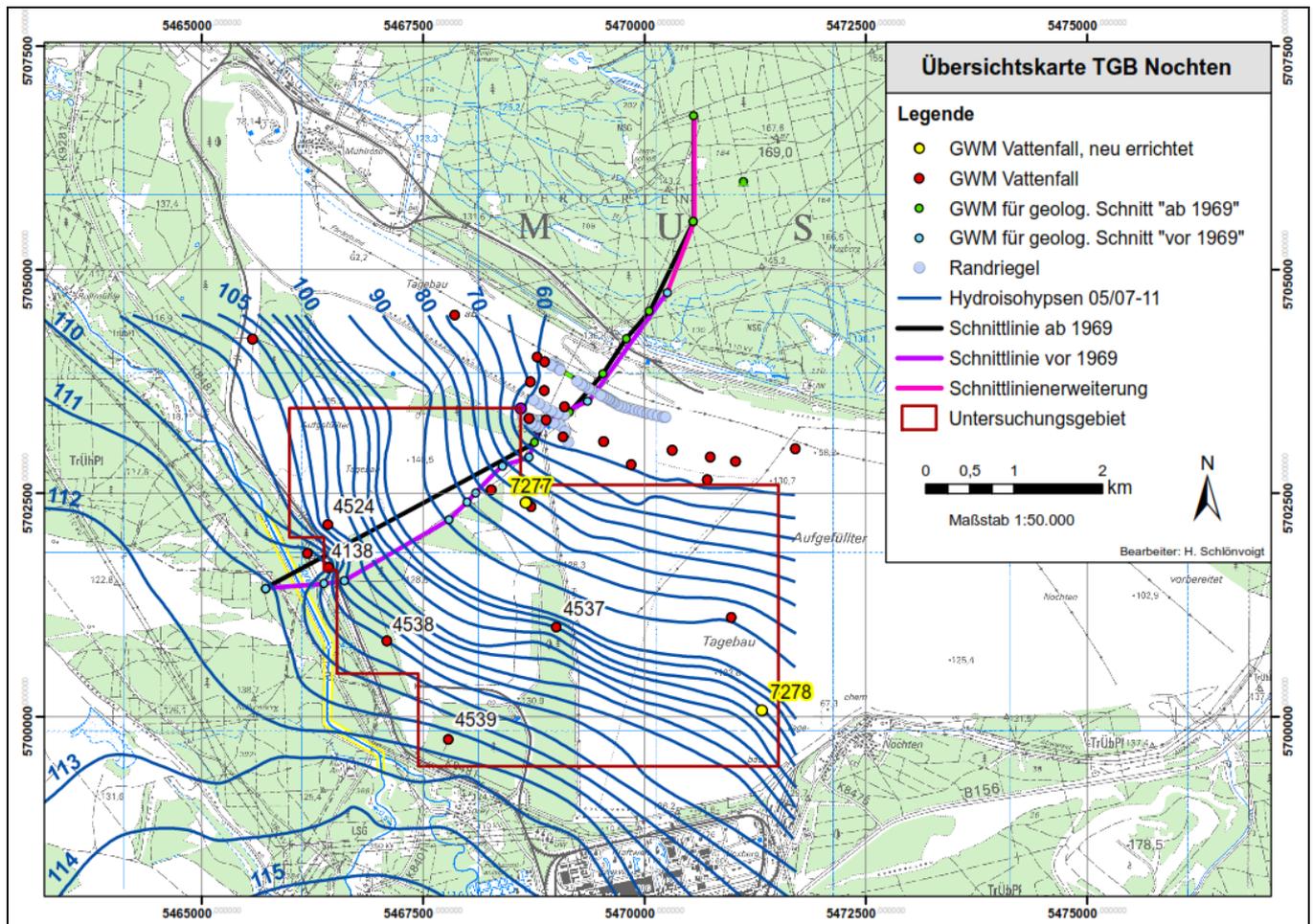


Abbildung 2: Übersichtskarte zum Untersuchungsgebiet des Tagebaus Nochten mit Hydroisohypsen der Stichtageinmessung von 05-07/2011, den Schnittspuren der beiden hydrogeologischen Profilschnitte und der Lage der Randriegel des Tagebaus Nochten

9.3.1 Hydrogeologischer Profilschnitt 1

Der hydrogeologische Profilschnitt 1 (Abbildung 3), der den vorbergbaulichen Zustand charakterisiert, verläuft nahezu senkrecht zum hydraulischen Abflussgeschehen und erfasst den ehemaligen nordöstlichen Grundwasserzstrom zum Vorfluter Spree entlang der Linie von der Muskauer Heide (Höhe Jagdschloss) über das jetzige Tagebaugelände mit der Grubenwasserreinigungsanlage (GWRA) Tzschelln, dem Kreuzungsbereich Zufahrt zur GWRA Tzschelln–Verbindungsstraße Boxberg–Neustadt/Schleife (K 8481) bis westlich des Talabschnittes der verlegten Spree und dem Randbereich des Truppenübungsplatzes Lohsa.

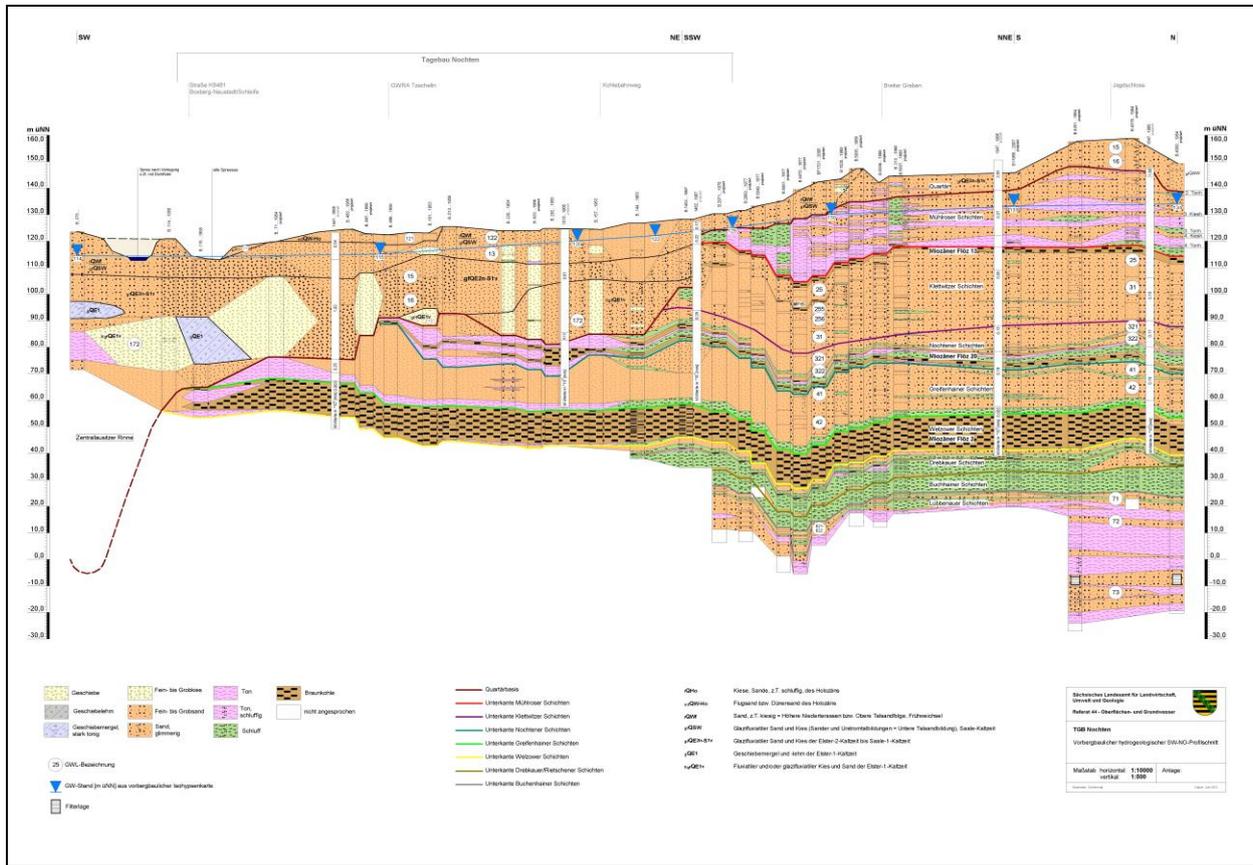


Abbildung 3: Hydrogeologischer Profilschnitt (NW-SE-Verlauf) mit Darstellung der vorbergbaulichen geologischen Lagerungsverhältnisse und des hydraulischen Potenzials des oberen quartären Grundwasserleiters (Zustand: vor 1969)

Entsprechend der Lagerungsverhältnisse bilden die quartären Sedimentschichten, bestehend aus den Schmelzwassersanden sowie fluviatilen Sanden und Kiesen der Elster 1-Vorschüttbildungen (Rinnensedimente), den Schmelzwassersanden und -kiesen der Elster 2-Nachschütt- bis Saale 1-Vorschüttbildungen sowie den Sanden und Kiesen der Unteren und Oberen Talsandfolge des Lausitzer Stromes einen hydraulisch zusammenhängenden Grundwasserleiterkomplex. Nach Auswertung der vorhandenen Bohraufschlusdaten bilden die nur reliktsch im Bereich der Zentrallausitzer Rinne angetroffenen Geschiebemergelpakete der Elster 1-Kaltzeit keinen flächenhaft ausgebildeten, hydraulisch trennend wirkenden Grundwasserstauer.

Die Quartärbasis wird im Bereich der bis in eine Tiefe von ca. 120 m unter GOK reichenden Zentrallausitzer Rinne (westlich der Straße K 8481) durch die untermiozänen Lübben-Schichten der Spremberger Formation, im Bereich zwischen der alten Spreeaue und dem Nordostrand des Tagebaus Nochten durch die mittelmiozänen Nochten-Schichten der Brieske-Formation sowie nordöstlich des Tagebaurandes durch die Flaschenton-Kiessand-Abfolge der Mühlrose-Schichten innerhalb der mittelmiozänen bis pliozänen Rauno-Formation gebildet.

Im quartären Grundwasserleiter ergibt sich für den Bereich des jetzigen Tagebaugeländes für den vorbergbaulichen Zustand bei einem mittleren Grundwassergefälle von 0,33 % und einem mittleren Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) von $1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s und einem entwässerbaren Porenvolumen (n_e) von 0,18 eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit (v_a) von 0,2 m/d.

9.3.2 Hydrogeologischer Profilschnitt 2

Der hydrogeologische Profilschnitt 2 (Abbildung 4) verdeutlicht die geologischen Lagerungsverhältnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt.

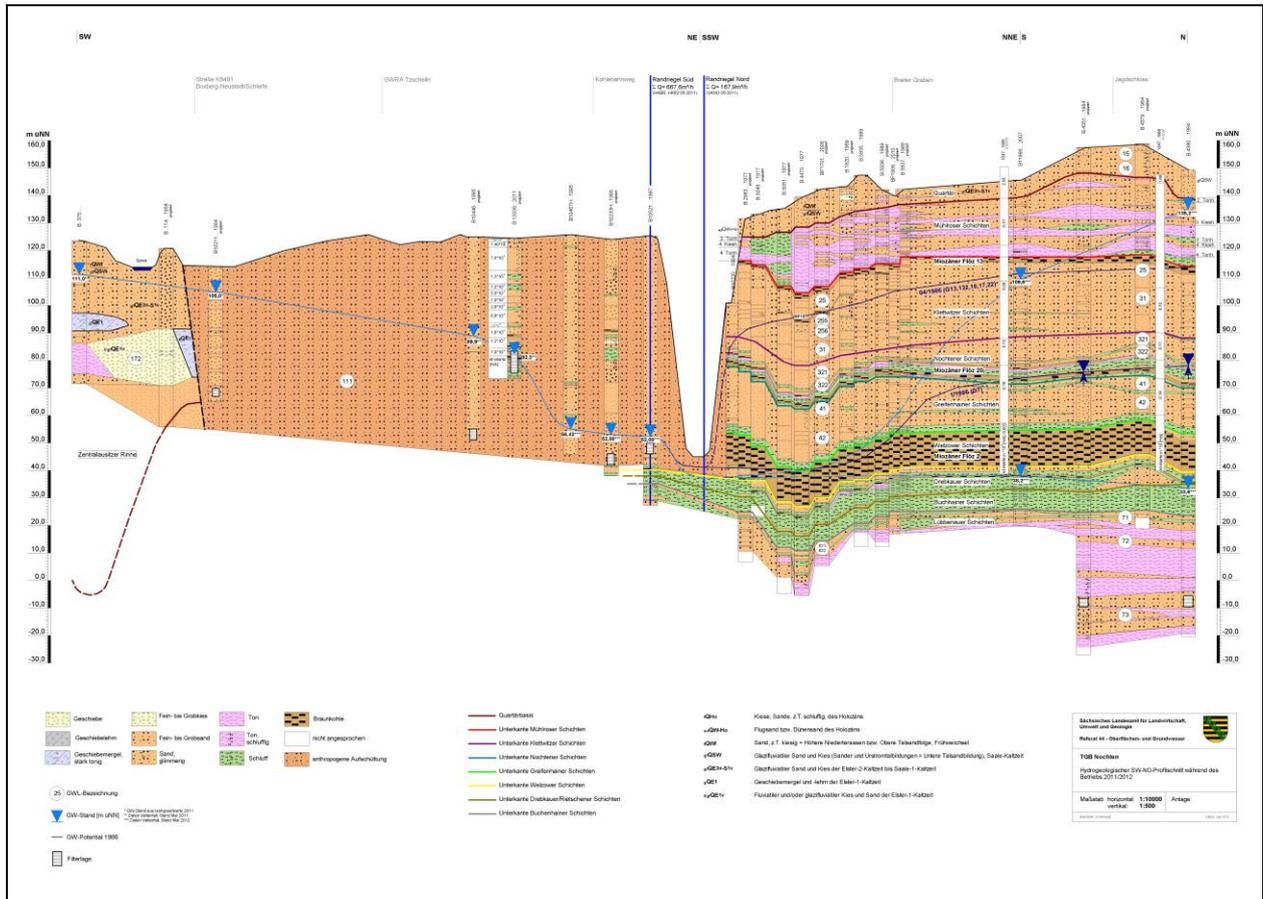


Abbildung 4: Hydrogeologischer Profilschnitt (NW-SE-Verlauf) mit Darstellung der gegenwärtigen geologischen Lagerungsverhältnisse und den hydraulischen Potenzialen der quartären und tertiären Grundwasserleiter

Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in der Sedimentabfolge vergleichsweise zum vorbergbaulichen Zustand im Bereich des Tagebaus Nochten zwischen der Verbindungsstraße Boxberg–Neustadt/Schleife (K 8481) und dem Filterriegel Nord. In diesem Bereich ist ein 60 bis 80 m mächtiger Kippenkörper, bestehend aus einem Wechsel von kiesig-sandigen und schluffig-tonigen mit Braunkohlebröckchen durchsetzten Kippsubstraten, ausgebildet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) schwanken hierbei zwischen $7 \cdot 10^{-9}$ m/s (tonig-schluffige Sedimente) und $6,9 \cdot 10^{-5}$ m/s (fein- bis mittelsandige, schwach kiesige Sedimente).

Für den Bereich der Kippe Nochten zwischen der Straße K 8481 und der GWRA Tzschelln ergibt sich bei einem Gefälle von 0,8 %, einem gewichteten mittleren k_f -Wert des Kippen-GWL von $4,06 \cdot 10^{-5}$ m/s und einem nutzbaren Porenvolumen (n_e) von 0,14 eine Abstandsgeschwindigkeit (v_a) von gleichfalls ca. 0,2 m/d. Das Grundwassergefälle ist hier jedoch entgegen der natürlichen vorbergbaulichen Bedingungen von Südwesten nach Nordosten gerichtet, bedingt durch die Absenkungswirkung der Randriegel des Tagebaus Nochten.

Im Bereich der Randriegel Nord liegen gegenwärtig die Absenkungsbeträge bei ca. 75 m und im Bereich der Randriegel Süd bei ca. 65 m im Vergleich zum vorbergbaulichen Grundwasserpotenzial.

Zudem liegt der Grundwasserspiegel zum Zeitpunkt der Einmessung zwischen dem Abschnitt Sprey und Kreuzungsbereich der Straße Boxberg–Neustadt/Schleife (K 8481) und der Zufahrt zur GWRA Tzschelln noch zwischen 2,2 und 3,7 m unter dem Wasserspiegel des Vorfluters Spree, dessen Sohle zu diesem Zeitpunkt noch folienabgedichtet war.

Eine starke Absenkung der Grundwasserspiegel erfahren auch die Grundwasserleiter G 13 bis 17 (Saale- bis elsterkaltzeitliche Fluss- und Schmelzwassersedimente), G 22 (Kiessandhorizonte der Rauno-Formation) und G 7 (Sand- und Schluffhorizonte der Spremberger Formation) durch die Randriegelbrunnen Süd und Nord, die nordöstlich der Tagebaugrenze im Bereich der Muskauer Heide ausgebildet sind.

9.4 Physikochemische Untersuchungen

Während der Bohrarbeiten zur Errichtung der beiden GWM wurden für die teufenorientierte Boden- und Sedimentprobennahme Linerproben (Innendurchmesser: DN 100, Material: PVC; Länge: 1 m) entnommen, die an den beiden Enden mit Kies aufgefüllt und luftdicht mit Kappen unter Anwendung von Heißwachs verschlossen waren. Nach der Sedimententnahme wurden drei Linerproben gleichzeitig geöffnet (halbiert) und für die anschließenden physikochemischen Untersuchungen beprobt.

An den entnommenen Feststoffproben wurden die Parameter Trockenrückstand, Glühverlust, Gesamtschwefel (S_{ges}), Gesamtkohlenstoff (TC), organisch gebundener Kohlenstoff (TOC) und Karbonatgehalt nach SCHEIBLER (Bestimmung der Feststoffgehalte in M-%) untersucht. Beim Vorliegen eines Schwefelgesamtgehaltes von $> 0,05$ M.-% erfolgte eine zusätzliche Untersuchung auf die S-Komponenten Sulfid- und Disulfidschwefel sowie auf organisch gebundenem Schwefel. Außerdem wurde die im Labor gemäß DIN 19529 mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg hergestellten Eluate auf die chemischen Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotenzial, NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe gesamt (gelöst), Fe (II) (gelöst), Mn^{2+} , Al^{3+} , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , gelöstes CO_2 , DOC und DIC untersucht.

An ausgewählten Grundwassermessstellen im Gewachsenen sowie v. a. auf der Kippe des Tagebaus wurden Grundwasserproben entnommen und auf dieselben Parameter wie die Bodeneluate untersucht. Des Weiteren wurden aus den Kernkisten des Bohrgutes teufenorientierte Sedimentproben für die Bestimmung der Parameter mineralischer Stickstoff (N_{min} , bestehend aus $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$), Gesamtstickstoff (N_t), Gesamtkohlenstoff (C_t), organischer Kohlenstoff (C_{org}) und Karbonatgehalt (c_{CaCO_3}) entnommen.

Von einzelnen ausgewählten Sedimentschichten der beiden Bohrprofile wurden Proben für die Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter (Körnungsanalysen mittels Nasssiebung sowie bei bindigen Substraten Triaxialversuche) entnommen und in Zusammenarbeit mit VATTENFALL Europe Mining im Labor untersucht.

Die Praxis hat gezeigt, dass das Probenmaterial für die chemische Analytik unter Kühlung (u. a. mittels flüssigem Stickstoff) bzw. schnellem Luftabschluss entnommen und ins chemische Labor transportiert werden sollte, um eine Oxidation des Bohrgutes und somit Verfälschung der Eluatkonzentrationen auf Grund der teilweise vor Ort angetroffenen reduzierten Milieubedingungen zu vermeiden. Zudem sollte eine zeitnahe Analytik des Probenmaterials erfolgen, um das stark verwitterungsanfällige Material repräsentativ charakterisieren und auswerten zu können.

9.5 Mikrobiologische Untersuchungen

Zum Vergleich verschiedener Standorte auf den Kippenflächen wurden Proben zum einen von einer Sukzessionsfläche, zum anderen von einer Waldfläche im rekultivierten Kippenbereich entnommen. Die Probennahmen erfolgten dabei aus verschiedenen Teufenbereichen, um die Aktivität der Mikroorganismen in den unterschiedlichen Teufen zu ermitteln (z. B. Bodenzone, ungesättigte Zone, Grundwasserzone). Es wurde davon ausgegangen, dass bei einem verstärkten Einfluss der Melioration auf die NH_4^+ -Konzentration ein ausgeprägtes Teufenprofil der Mikroorganismenaktivität erkennbar sein muss (Maximum in einem bestimmten Teufenbereich), während z. B. bei einem Abbau N-haltiger Huminstoffe im Kippsubstrat eher eine Verteilung entsprechend dem organischen Substrat zu erwarten sein sollte. Die Probenahme erfolgte parallel sowohl anaerob als auch aerob in sterilen Behältnissen mit einer sofortigen Weiterbearbeitung der Proben im Labor. Es wurden 53 Feststoffproben aus dem Kippsubstrat an beiden Standorten für mikrobiologische und enzymatische Untersuchungen entnommen. Von jeder Probe wurden innerhalb dieser Untersuchungen 316 Einzeltests durchgeführt (KBE = Kolonienbildende Einheiten, MPN = Most probable Number „wahrscheinlichste Keimzahl“, Inkubations- und Enzymtests), das sind für alle Proben insgesamt ca. 17.000 durchgeführte Einzeltests.

Die Kippsubstratproben wurden hier teufenabhängig auf folgende mikrobiologische Parameter untersucht:

- allgemeine heterotrophe Mikroorganismen (KBE), um einen Überblick über die teufenabhängige Aktivität zu erhalten
- Pilze (KBE) mit der potenziellen Fähigkeit zum Abbau des huminstoffartigen Materials im kohligen Kippsubstrat
- Sulfatreduzierer (MPN) zum Überblick über das teufenabhängige Potenzial in Bezug auf die mikrobielle Sulfatreduktion
- heterotrophe Nitratreduzierer (MPN) mit potenzieller Fähigkeit zum Abbau organischer Substanz (Huminstoffe bzw. deren Abbauprodukte)
- autotrophe Nitratreduzierer, z. B. *Thiobacillus denitrificans*, die auch unter mikroaeroben bzw. anaeroben Bedingungen in der Lage sind, Sulfide autotroph zu oxidieren
- Aktivitäten ausgewählter Enzyme von Bodenorganismen zur Klärung des Ursprungs der erhöhten NH_4^+ -Konzentrationen
- Bestimmung von Nitrifikationsraten in verschiedenen Teufen des Kippsubstrates, um den Prozess des Verbrauchs von NH_4^+ bzw. die Hemmung im Kippenkörper bzw. -grundwasserleiter zu untersuchen

Zusätzlich erfolgte eine teufenabhängige Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft zur Bestätigung der Beteiligung verschiedener Mikroorganismengruppen am kommensalistischen bzw. mutualistischen Abbau der Huminstoffe und damit der Ursache der NH_4^+ -Akkumulation im Grundwasserleiter.

Als Ergebnis der ersten Recherchen und Untersuchungen konnte ein landwirtschaftlicher Eintrag von NH_4^+ , ein Eintrag durch frühere Bergbauaktivitäten, wie ein Einsatz von Sprengstoffen bzw. Cyaniden oder durch eine Kohleveredlung als potenzielle N-Quellen, ausgeschlossen werden. Als mögliche Eintragsquellen für Ammonium wurde hier die Melioration der Kippenflächen geprüft, weiterhin ein mikrobieller Abbau der Huminstoffe im kohligen Kippsubstrat und eine mögliche Inhibierung der Nitrifikation im Kippenkörper. Bisher sind aus der Literatur keine Informationen zum mikrobiellen Abbau von kohligem Substrat in Verbindung mit der Akkumulation von NH_4^+ im Grundwasserleiter bekannt.

Allgemeine heterotrophe Mikroorganismen

Erhöhte Keimzahlen an heterotrophen Mikroorganismen (KBE) wurden im kohligen Kippsubstrat unterhalb der Oxidationszone in einer Teufe von 17 bis 34 m (Waldstandort KBE $1.2 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^5$ /g Substrat) nachgewiesen. Die Koloniezahlen der heterotrophen Mikroorganismen zeigen dabei einen Zusammenhang mit dem Organikgehalt des Kippsubstrates; bei höheren Organikgehalten nehmen die mikrobiellen Keimzahlen des Kippsubstrates zu, während sie bei höheren Gehalten an Sand wieder absinken. Insgesamt gab die Quantifizierung der allgemeinen heterotrophen Mikroorganismen einen ersten Hinweis auf eine mikrobielle Abbauproduktivität im kohligen Kippsubstrat.

Sulfatreduzierer

Mikrobielle Sulfatreduzierer wurden nur in geringen Zahlen (10^3 – 10^4 /g) in einem Teufenbereich von 15,7 bis 34 m (Waldfläche) nachgewiesen. Aus den geringen Zahlen wurde geschlossen, dass sie unter den derzeitigen Bedingungen nur eine untergeordnete Rolle im Kippenkörper spielen. Auch eine autotrophe Sulfatreduktion wurde nachgewiesen, jedoch in noch geringeren Zahlen als die heterotrophen Sulfatreduzierer.

Heterotrophe Denitrifikanten

In den tieferen Zonen des Kippsubstrates (Waldfläche 17–34 m) wurden erhöhte Zahlen an denitrifizierenden Bakterien (10^6 bis fast 10^8 /g) nachgewiesen. Die Aktivität der Denitrifikanten hängt eindeutig mit dem Gehalt an kohligem Kippsubstrat zusammen. Während bei erhöhten Organikgehalten im Kippsubstrat auch erhöhte Keimzahlen auftreten, nehmen diese bei höheren Gehalten des Kippsubstrates an Sand wieder ab. Das hier erhaltene Ergebnis gab neben den ersten Zahlen der allgemeinen heterotrophen Mikroorganismen einen weiteren wesentlichen Hinweis auf einen mikrobiellen Abbauprozess des huminstoffhaltigen Kippsubstrates.

Autotrophe Denitrifikanten

Für *Thiobacillus denitrificans* wurden hier geringere Keimzahlen festgestellt ($8.6 \cdot 10^3$ – $2.7 \cdot 10^5$ /g) als an früher untersuchten anderen Standorten. Aus diesem Grund scheint *Tb. denitrificans* an diesem Standort keine bedeutende Rolle zu spielen. Es wird angenommen, dass an diesem Standort heterotrophe Nitratreduzierer in direkter Nährstoffkonkurrenz zu *Tb. denitrificans* stehen. Auf Grund ihrer wesentlich höheren Wachstumsraten haben die heterotrophen Nitratreduzierer hier einen wesentlichen Selektionsvorteil gegenüber *Tb. denitrificans*. Beim Vergleich der Keimzahlen von *Tb. denitrificans* mit den Sulfatreduzierern fiel auf, dass die autotrophen Nitratreduzierer immer in leicht höheren Keimzahlen vorliegen als die Sulfatreduzierer. *Tb. denitrificans* ist somit in der Lage, von Sulfatreduzierern produzierte bzw. gefällte Sulfide (z. B. Greigit) sehr schnell wieder zu reoxidieren. Damit erreicht die mikrobielle Sulfatreduktion im Kippsubstrat nur eine geringe Wirkung, weil das produzierte Sulfid nur als Intermediärprodukt existiert.

Nitrifikationsraten in verschiedenen Teufenbereichen des kohligen Kippsubstrates

Die Nitrifikationsraten von Kippsubstratproben aus verschiedenen Teufen wurden in zahlreichen Mikrokosmenversuchen bei entsprechenden Temperaturen wie in den Kippenkörpern ermittelt. Selbst in der Grundwasserzone des Kippenkörpers kann eine Nitrifikation im entsprechenden versauerungsbeeinflussten Untergrund noch mit geringen Geschwindigkeiten (0.5 – 1 mg NO_3^- /kg Substrat*d) ablaufen. Die Nitrifikation des im Kippenkörper akkumulierten Ammoniums stellt einen geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der Umwandlung des Ammoniums mit anschließender Denitrifikation unter Abbau des huminstoffhaltigen Kippsubstrates dar.

Aktivitäten wesentlicher Enzyme im kohligen Kippsubstrat

Die Aktivität dreier verschiedener Enzyme im Kippsubstrat wurde in Flaschentests unter entsprechenden Temperaturen gemessen, so die von der Amidase (zur Hydrolyse organischer Amidverbindungen), der Urease (zur Spaltung von Harnstoff, als Indikator für die Verwendung organischer Düngemittel) und die Phosphatase als genereller Indikator für metabolische und enzymatische Aktivitäten.

In der oberen Bodenaufgabe wurden, wie erwartet, erhöhte Aktivitäten von Urease und Phosphatase gemessen. Mit zunehmender Tiefe nehmen diese Aktivitäten aber rasch ab, weil vor allem in größeren Tiefen keine leicht abbaubare organische Substanz mehr existiert. Im Gegensatz dazu stieg die Aktivität der Amidase in den Schichten mit kohligem Kippsubstrat verstärkt an. Dieses Ergebnis stellte noch einmal einen wesentlichen Hinweis auf einen möglichen mikrobiellen Abbau des kohligen Kippsubstrates dar.

Die organische Substanz wird in einer Kaskade von Schritten durch eine vielfältige Organismengemeinschaft abgebaut und organische Amide können als Zwischenprodukte gebildet werden. Durch die enzymatische Hydrolyse der Säureamide mit den Amidasen werden niedermolekulare organische Säuren produziert, die anschließend metabolisiert werden. Das als Nebenprodukt gebildete Ammonium wird zum Teil im Kippenkörper bzw. im Grundwasser akkumuliert (WILLSCHER, KNIPPERT et al. 2012). Die Nitrifikation des Ammoniums ist in den tieferen Schichten des Kippenkörpers auf Grund der niedrigen Sauerstoffkonzentrationen und durch die Versauerung des Kippsubstrates stärker gehemmt (bis zu 82 % Hemmung), was in zahlreichen Mikrokosmenversuchen nachgewiesen wurde. Aus diesem Grund kommt es zu einer Akkumulation des Ammoniums im Kippenkörper und im Grundwasser.

Eine sehr wichtige Stufe der stetigen Nachlieferung des Ammoniums ist die erhöhte Denitrifikation, bei der immer wieder neues organisches Substrat zersetzt und damit auch Ammonium freigesetzt wird. Damit besteht ein ständiger Zyklus aus Freisetzung von Ammonium, Nitrifikation und anschließender Denitrifikation von neuem N-haltigen, organischem Substrat.

Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft zum Abbau des kohligen Kippsubstrates

Im kohligen Kippsubstrat existiert eine vielfältige Gemeinschaft an Mikroorganismen, die zum Abbau komplexer organischer Substanz befähigt sind. Sie agieren in einer komplexen Gemeinschaft mit kommensalistischen und z. T. in mutualistischen Nahrungskaskaden. Ein tiefenorientierter Nachweis verschiedener Mitglieder dieser Mikroorganismengemeinschaft erfolgte durch Isolation und anschließende molekularbiologische Bestimmung mit Hilfe einer 16S RNA-Analyse. Dadurch konnte die Verteilung verschiedener Mikroorganismenstämme bzw. ihre Häufigkeit in den verschiedenen Zonen des Kippsubstrates bestimmt werden. So sind die meisten Pilze (z. B. *Penicillium*), die meisten Actinomyceten (*Streptomyces*, *Cellulomonas*) und einige Bakteriengruppen (z. B. *Bacillus*) vor allem in der ungesättigten Zone des kohligen Kippsubstrates zu finden. Andere Bakteriengruppen, so z. B. auch Abbauer von Aromaten und heterocyclischen Verbindungen (als mögliche Zwischenprodukte des Abbaus) können ebenfalls in der Kapillar- bzw. Grundwasserzone existieren. Hier wurden häufiger *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Mycobacterium* und *Microbacterium*-Arten nachgewiesen.

Ein Nachweis der Fähigkeit der Pilzisolat e erfolgte über einen Lignin-Abbauversuch. Dabei waren zahlreiche Pilze, in verschiedenen Intensitäten, zu einem Abbau von Lignin in der Lage (z. B. verschiedene *Penicillium*-Spezies, *Cladosporium*, *Cochliobolus*, *Lecythophora*, *Lachnum*). Streptomyceten sind in der Lage, lignocelluloseartige Strukturen abzubauen, und Streptomyceten und andere Actinomyceten besitzen ebenfalls die Fähigkeit zum Abbau von Cellobiose und Xylose als Bestandteile der komplexen organischen Substanz in huminstoffhaltigem Substrat (WILLSCHER, KNIPPERT et al. 2012, 2013).

Fe(III)-Ionen aus der biogeochemischen Oxidation des Pyrits scheinen im Kippenkörper eine wesentliche Rolle als Katalysator bei einem oxidischen oder auch denitrifizierenden Abbau der komplexen organischen Substanz zu spielen. Dies wurde in zahlreichen Mikrokosmenversuchen und parallelen Versuchen unter sterilen Bedingungen nachgewiesen.

Als Ergebnis dieser vielfältigen mikrobiellen Prozesse in den verschiedenen Zonen des kohlehaltigen Kippsubstrates konnte ein komplexer Zusammenhang der verschiedenen mikrobiellen Eisen-, Schwefel-, Kohlenstoff- und Stickstoffzyklen im Untergrund herausgearbeitet werden.

9.6 Isotopenhydrologische Untersuchungen

Die Untersuchungen der Isotopenzusammensetzung sollen Hinweise auf ablaufende Abbau- und Rückhalteprozesse von Schwefelverbindungen (Sulfat, Sulfid und Disulfide) und Stickstoffverbindungen (Ammonium, Nitrat) im Zusammenhang mit möglichen „Natural Attenuation“-Vorgängen geben. Durch die Isotopenfraktionierung können biochemische Vorgänge nachgewiesen und äußere Einflüsse wie Infiltration weiterer Wässer ausgeschlossen werden. Weiterhin ergeben sich aus dem charakteristischen Isotopensignal eines Stoffes Informationen zu dessen Herkunft und möglichen Alters des Untergrundes bzw. des Aquifers.

Im Rand- und Innenkippenbereich des Tagebaus Nochten wurden aus sechs Grundwassermessstellen Pumpproben entnommen und im Isotopenlabor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung Halle/Saale folgende Isotopenverbindungen untersucht: $\delta^{15}\text{N}$ am gelösten Ammonium, $\delta^{15}\text{N}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am gelösten Nitrat, $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am gelösten Sulfat, $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am gelösten anorganischen und organischen Kohlenstoff, $\delta^{14}\text{C}$ am gelösten anorganischen Kohlenstoff und Tritium ($\delta^3\text{H}$), $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am Wasser. Zusätzlich erfolgte eine Probennahme zur Bestimmung der gelösten Heliumkonzentration.

Bei der Errichtung zweier Grundwassermessstellen auf dem Gebiet der Altkippe Nochten wurden aus den Bohrungen Sedimentmaterial entnommen und die Isotopenverbindungen $\delta^{15}\text{N}$ von anorganischen Ammoniumverbindungen und $\delta^{34}\text{S}$ der Disulfide untersucht.

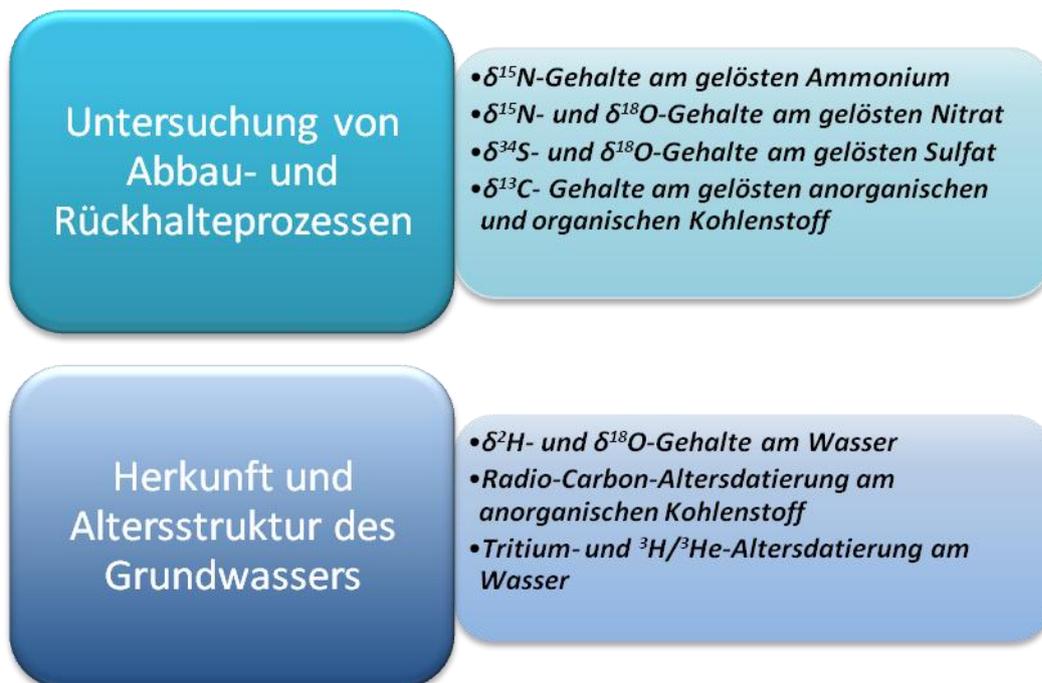


Abbildung 5: Übersicht zu den im Tagebau Nochten angewendeten isotopehydrologischen Methoden

9.6.1 Anwendungsbereich und Bewertung

Bestimmung der $\delta^{15}\text{N}$ -Gehalte am gelösten Ammonium

Im Fallbeispiel der „Untersuchung der hohen Ammoniumkonzentrationen im Sicker- und Grundwasser des im chemisch schlechten Zustand befindlichen GWK SP 3-1 (Lohsa-Nochten) auf der rekultivierten Kippe des Tagebaus Nochten“ sollte die Analyse der Isotopenwerte $\delta^{15}\text{N}$ am gelösten Ammonium der Ermittlung der Ammoniumquelle dienen.

Dazu wurden zwei Liter Wasserprobe mit konzentrierter Schwefelsäure unverzüglich nach Probennahme stabilisiert, sodass Stickstoffverbindungen nicht entweichen konnten. Aufschlussmaterial aus den Bohrungen wurde unter Argonatmosphäre luftdicht verpackt, gekühlt transportiert und bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert.

Die weitere Aufarbeitung der Wasserproben erfolgte im Labor mit Hilfe der Kjeldahl-Methode nach MÜLLER (1968). Die Umsetzung des Ammoniumsulfates zu reinem Stickstoff und dessen Messung erfolgte im Elementaranalysator (Continuous Flow Technik), gekoppelt an ein Isotopenhäufigkeitsmassenspektrometer (Delta V Advantage, Thermo, Germany). Die Untersuchungen des gelösten Ammoniums im Jahr 2011 (WILLSCHER et al. 2011) und 2012 (KNÖLLER et al. 2012) zeigten, dass der Ursprung der erhöhten Ammoniumkonzentration aus kohligen Kompartimenten stammen könnte.

Bestimmung der $\delta^{15}\text{N}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte am gelösten Nitrat

Als zweite Stickstoffkomponente wurde das gelöste Nitrat im Wasser isotopenhydrologisch untersucht. Die $\delta^{15}\text{N}$ und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte können Informationen zu möglichen Ammoniumoxidationsprozessen geben. In Abhängigkeit des Nitratgehaltes ist eine Probenmenge von ca. 2 ml je Messlauf für die Bestimmung der stabilen ^{15}N - und ^{18}O -Isotope erforderlich. Zur Konservierung der Probe wurde das Wasser noch vor Ort durch einen $0,2\text{ }\mu\text{m}$ -Membran-Filter filtriert. Die weitere Präparation erfolgte offline nach der Methode von CASCIOTTI (2002) und SIGMAN (2001). Das bakteriell aus Nitrat/Nitrit produzierte Lachgas (N_2O) wurde online in einer GasBench (Finnigan) extrahiert und im angekoppelten Massenspektrometer (Delta V, Thermo, Germany) das Isotopenverhältnis gemessen.

Im Ergebnis wurden die Komponenten $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{15}\text{N}$ bzw. $\delta^{15}\text{N}$ beider Stickstoffverbindungen gegenübergestellt. Innerhalb eines Jahres ergab der isotopenhydrologische Vergleich der Stickstoffverbindungen keine eindeutige Korrelation im Bezug zum Nitrifikationsprozess. Die Isotopenwerte von Sauerstoff und Stickstoff am gelösten Nitrat ergaben ebenfalls kein eindeutiges Bild zu dessen Herkunft. Jedoch zeigten die Ergebnisse unterschiedliche Einflüsse bzw. Wasserzumischungen in einzelnen Bohrungen.

Bestimmung der $\delta^{34}\text{S}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte am gelösten Sulfat

Als Hilfe zur Aufklärung von weiteren Stoffströmen und Umsatzprozessen, wie z. B. der Sulfatreduktion, wurden Wasser- und Sedimentproben auf den Gehalt an $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am gelösten Sulfat bzw. $\delta^{34}\text{S}$ am festgesetzten Sulfid bestimmt.

Die Wasserproben (1 l) konnten mit ammoniakalischer Zink-Acetat-Lösung stabilisiert werden. Anschließend erfolgte im Labor die Umarbeitung und Ausfällung von Bariumsulfat. Dem Bodenmaterial wurde durch Schockgefrieren die Feuchtigkeit entzogen und dadurch die Probe bis zur weiteren Aufarbeitung konserviert. Im Destillationsverfahren an der Kjeldahl-Apparatur konnten aus dem Sediment die „chrom-reduzierbaren Sulfide“ (CRS; Disulfide) gefällt werden. Im Standardmessverfahren wurde das $\delta^{34}\text{S}$ am Delta S online mit dem Elementaranalysator und der Gehalt an $\delta^{18}\text{O}$ am Delta plus XL online mit Pyrolyse gemessen.

Die bisherigen Ergebnisse der $\delta^{34}\text{S}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Untersuchungen am Grundwasser im Tagebau Nochten zeigten in den Randgebieten eine fortschreitende Sulfatreduktion, während im Innenkippenbereich keine signifikante Isotopenfraktionierung bestimmt wurde, d. h. kein Hinweis auf bakterielle Umsetzung des gelösten Sulfates und Festsetzung von Sulfid (KNÖLLER, IHLING et al. 2012) zu erkennen ist. Im heterogenen System der Kippe zeigt die isopenhydrologische Analyse des Sedimentmaterials einen großen Schwankungsbereich der $\delta^{34}\text{S}$ -Sulfidmesswerte (Abbildung 4 und 5). In beiden Abbildungen ist eine leichte Tendenz von positiven zu negativen CRS-Werten mit zunehmender Tiefe festzustellen. Unterhalb des Grundwasserspiegels deuten die negativen $\delta^{34}\text{S}$ -Werte auf die Bildung von reduzierten Schwefelverbindungen im Sediment hin, allerdings konnte dies durch die Untersuchung der Wasserproben nicht bestätigt werden. Reduzierte Schwefelverbindungen können bei erneutem Sauerstoffkontakt oder mikrobiell reoxidiert werden. Der Wertebereich lässt darauf schließen, dass es eine breite Quellvariation des sedimentären Sulfides in den kohligen Einheiten gibt.

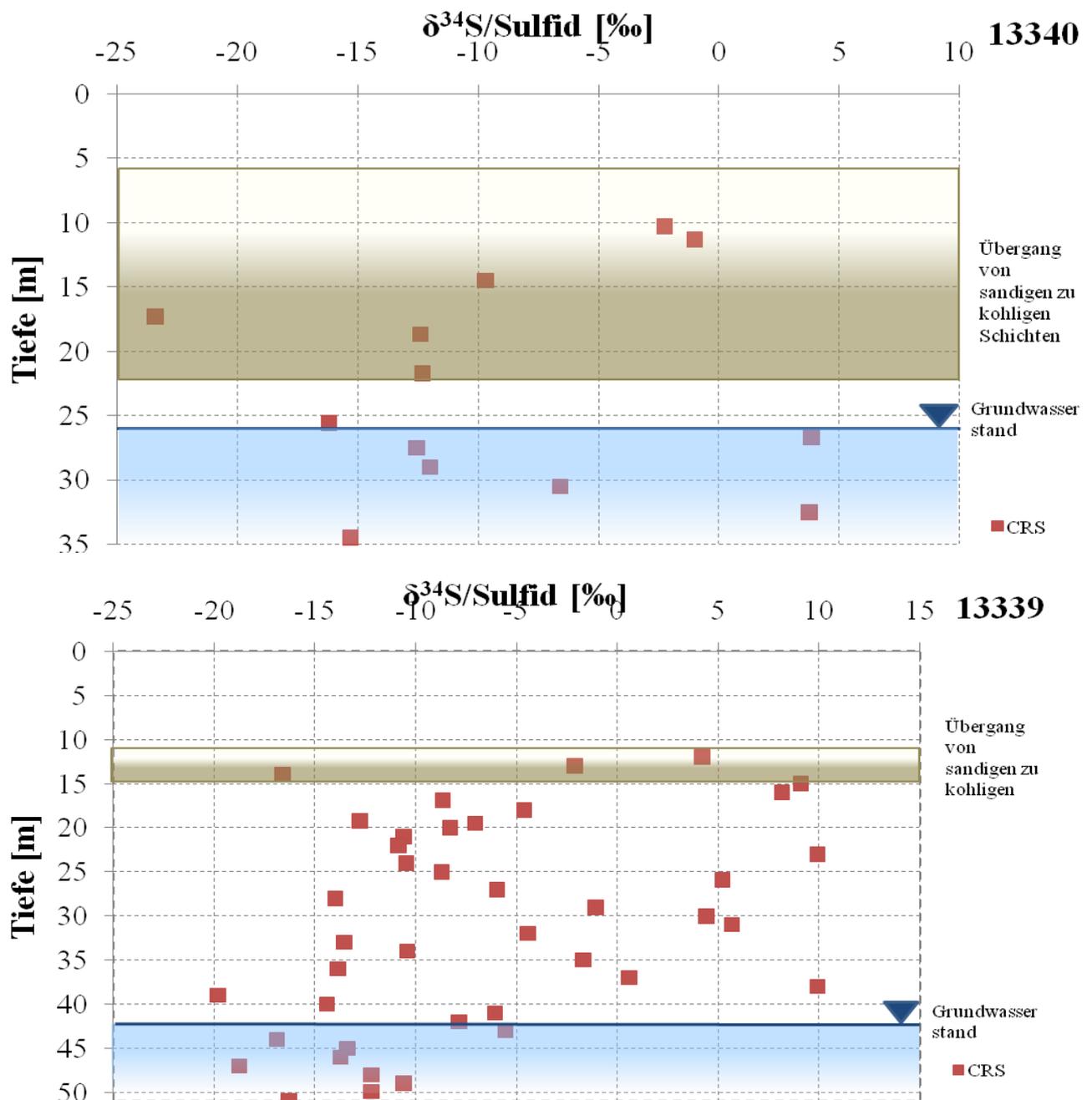


Abbildung 6 und 7: Gegenüberstellung von Tiefe der Bohrung und $\delta^{34}\text{S}$ -Werte (nach Vienna Cañon Diablo Troilite Standard) des Sulfides im Sediment. Der Wechsel von feuchten zu wassergesättigten Sedimenten wurde als blauer Bereich eingezeichnet. Die blaue Linie markiert dabei den Grundwasserspiegel (GWS).

Bestimmung der $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalte am gelösten anorganischen und organischen Kohlenstoff

Die Untersuchung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte sollte weitere Informationen zur mikrobiellen Aktivität innerhalb des Schwefel- und Stickstoffkreislaufs auf dem Gelände des Tagebau Nochten geben.

Die Bestimmung der Säurekapazität kann die Probenmenge pro Analyse ($\delta^{13}\text{C}$ am gelösten anorganischen Kohlenstoff) auf 2 ml beschränken. In Abhängigkeit des organischen Kohlenstoffanteils ist eine ähnliche Wassermenge für die Bestimmung des ^{13}C -Verhältnis nötig. Mittels Phosphorsäure bzw. durch Aktivierung mit

einem Oxidanten konnte das $\delta^{13}\text{C}$ im freigesetzten Kohlendioxid (anorganisch oder organisch) in einer Gas-Bench (Finnigan) extrahiert und mit einem angekoppelten Massenspektrometer (Delta V, Thermo, Germany) gemessen werden.

Der Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Analyse mit der Kohlenstoffkonzentration und dem pH-Wert des Grundwassers zeigte keine Interferenz zueinander, sondern die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte blieben sowohl am anorganischen als auch am organischen Kohlenstoffanteil konstant. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Isotopensignaturen zeigten jedoch Unterschiede nach deren Ursprung wie in CLARK & FRITZ (1997) dargestellt. Die Bohrung 4539 (auf der Kippe im südwestlichen Grenzbereich des Tagebau Nochten gelegen) weicht von den restlichen Bohrungen, mit vorrangig durch mikrobielle Zersetzung von Kohle geprägten Messwerten, deutlich ab. Dort ist eine Beeinflussung durch weitere Wasserzutritte anzunehmen.

Bestimmung der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte am Wasser

Um die Einwirkung von verdunstungsbeeinflussten Wässern, z. B. Sicker- bzw. Oberflächengewässer, als Ammoniumbelastungsquelle des Kippengrundwasserleiters auszuschließen, wurde der $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt in sechs Grundwassermessstellen des Tagebaus Nochten bestimmt.

Für die Analyse am Cavity Ring-Down Spektrometer (Picarro L1102-i) wurde nur eine geringe Menge von 1,5 ml an Probewasser je Messlauf benötigt. Nach der Filtration (0,45 μm) war ein weiterer Aufschluss der Proben im Labor nicht notwendig.

Die $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Ergebnisse zeigten entsprechend gemäßigter Breiten typische Grundwassersignaturen. In Bohrung 4539 konnte der Eintrag bzw. die Infiltration von verdunstungsbeeinflussten Wasser in den Randbereich des Kippengrundwasserleiters nachgewiesen werden. Die Erkenntnisse aus den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Daten konnten auch zum Vergleich bzw. zur Kontrolle weiterer Messungen in Bezug auf Herkunft und Alter des Grundwassers genutzt werden.

Bestimmung von Radio-Carbon (^{14}C) am gelösten anorganischen Kohlenstoff

Zum Aufschluss von Grundwasserverweilzeiten bzw. zur Einschätzung des Transportpfades des Wassers wurde der Wert von ^{14}C am gelösten anorganischen Kohlenstoff ermittelt.

Abhängig vom Karbonatgehalt war für die Bestimmung des Radio-Carbons eine große Menge an Wasser (bis zu 120 Liter) notwendig. Die Proben mussten nicht konserviert werden und der Kohlenstoff konnte in Form von Kohlendioxid im Labor extrahiert werden. Die Messung erfolgte an einem Flüssig-Szintillations-Analysator (Tri-Carb 2770 SC/TR).

Die Ergebnisse zeigten wieder Unterschiede zwischen den Bohrungen im Innenbereich zum Randbereich des Tagebaus. Bei der Gegenüberstellung mit den stabilen Isotopen ^{13}C , ^{15}N und ^{34}S wurde die starke mikrobielle Aktivität durch die Umsetzung von Kohlenstoffverbindungen deutlich. Im Fallbeispiel des Tagebau Nochten ist davon auszugehen, dass die Radio-Carbon-Altersdatierung beeinflusst wurde von den mikrobiellen Stoffumsetzungsprozessen und der damit verbundenen Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Sedimentmaterial.

Tritium- und $^3\text{H}/^3\text{He}$ -Altersdatierung am Wasser

Eine weitere Methode zur Charakterisierung der Verweilzeit des Grundwassers ist die Analyse der Tritiumwerte. In Kombination mit der Bestimmung des Heliumgehaltes im Wasser sollten sich Ansatzpunkte zur Altersinterpretation bzw. zur Grundwasserneubildung ergeben.

Das Wasser für die Tritiumbestimmung wurde in 1-Liter-Schott-Glasflaschen abgefüllt und dicht verschlossen bei Raumtemperatur bis zur Weiterverarbeitung gelagert. Nach der Reinigung und Elektrolyse der Wasserproben erfolgte die Bestimmung des Messwertes an einem Flüssig-Szintillation Spektrometer (Wallac Quantulus 1220 ultra low level). Für die Ermittlung der (tritiogenen) ^3He -Daten sollte das Wasser gasfrei und luftdicht in einem Kupferrohr eingeschlossen werden. Eine repräsentative Probennahme war auf Grund der CO_2 -Ausgasungen im durch den Bergbau stark beeinflussten Grundwasser nicht möglich.

Die Tritiumdaten zeigten keine eindeutige Korrelation zu den Isotopenwerten aus dem gelösten Ammonium, Nitrat und Sulfat, so dass diese Methode der Altersbestimmung nicht bei der Detektion der Kontaminationsquelle helfen konnte. In der Gegenüberstellung mit den Radio-Carbon Daten wurde erneut der Unterschied zwischen den Bohrungen im Innenkippenbereich und Randbereich des Tagebaus Nochten und die Beeinflussung durch freigesetzten Kohlenstoff aus Wasser und Sediment sowie die Infiltration anderer Wässer deutlich.

9.7 Bodenkundliche Untersuchungen

Für die Rekultivierung von Braunkohlenkippen werden nach der Planierung der Kippenareale bodenkundliche Erstkartierungsberichte angefertigt. Sie beinhalten Aussagen zur Kippsubstratzusammensetzung sowie deren bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften. Daraus abgeleitete notwendige Meliorationsmaßnahmen für Folgenutzungen (z. B. Land- und Forstwirtschaft) beziehen sich auf Kalk-, Stickstoff- und Makronährstoffgaben zur Neutralisation des sauren Milieus bzw. Steigerung der Ertragsfähigkeit der Kippsubstrate.

Im Untersuchungsgebiet erfolgte die Melioration vor ca. 10 bis 12 Jahren. Mit den Aufgrabungen von zwei Bodenprofilen nahe der GWM-Bohrungen sollte die aktuelle punktbezogene Bodenentwicklung und der Einfluss der Kalk- und Stickstoffgaben auf die erhöhten Ammoniumgehalte im GW-Körper eruiert werden.

Dazu wurden die Schicht- und Horizontansprachen der Bodenprofile nach bodenkundlicher Kartieranleitung 5. Auflage (KA5) vorgenommen. Die Beprobung der Profile für Mischproben (gestörte Probe) und Stechringe (ungestörte Probe) erfolgte nach KA5 (S.39: 1996, AD-HOC-AG Boden), in Anlehnung an die DIN ISO 10381. Demnach sind pro Schicht/Horizont eine Mischprobe und fünf Stechringe (Mindestanzahl) zu entnehmen. Die Substratzusammensetzung (Fein- und Grobbodenanteile) und die Palette der bodenchemischen Parameter wurden an den Mischproben untersucht. Die Bestimmung der bodenphysikalischen Kennwerte erfolgte an den Stechringen. Die Analytik erfolgte gemäß dem LfULG-Standardprogramm für Kippenböden. Es umfasst im Einzelnen folgende Parameter:

■ Bodenphysik

kalk- und humusfreier Feinboden, Grobboden Trockenrohddichte (dB), effektive Lagerungsdichte (eff. Ld), Dichte Festsubstanz (dF), Vol. % bei Saugspannung (pF 1,8; 2,5; 4,2), Porenvolumen (PV), Weite Grobporen (GP), Enge Grobporen (GP), Mittelporen (MP), Feinporen (FP), Wasserleitfähigkeit (kf-Wert in m/s), kf-Wert (cm/d), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Bodenfeuchte (entspricht Prüfplan Kippe 2)

■ Bodenchemie

Gesamt(total)gehalt Phosphor (P_t), Calciumchlorid-Auszug Magnesium [$\text{Mg}(\text{CaCl}_2)$], Natriumsulfat-Extraktion Mangan [$\text{Mn}(\text{Na}_2\text{SO}_3)$], Gesamt(total)gehalt Schwefel (S_t), Sulfatschwefel (S_{so_4}), hydrolytische und Austauschkapazität, freie Säure, amorphes (oxalatisch bestimmtes) Eisen (Fe_o), kristallines (dithionitisch bestimmtes) Eisen (Fe_d), Verhältnis Fe_o/Fe_d , Mn_o , Mn_d , Mn_o/Mn_d , Al_o , Al_d , Al_o/Al_d , potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}), potenzielle Basensättigung (BS_{pot}), effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}), Wasserstoff aus-

tauschbar (H^+), effektive Basensättigung (BS_{eff}), Salzsäure (HCL)-Auszug, Doppellactat(DL)-Auszug für Kaliumoxid (K_2O), Phosphoroxid (P_2O_5), pH-Wert ($CaCl_2$, H_2O , KCl), elektrische Leitfähigkeit (σ), Calciumcarbonat ($CaCO_3$), gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (C_{org}), Gesamt(total)gehalt Kohlenstoff (C_t), Gesamt(total)gehalt Stickstoff (N_t), Humus1, Humus2, Königswasserextrakt (KW), Ammoniumnitrat-aufschluss (NH_4NO_3 -Extrakt) (entspricht Prüfplan Kippe 1)

Der detaillierte Vergleich zwischen den bestimmten Kennwerten der Erstbeprobung und den aktuellen Analyseergebnissen ist noch zu führen. Eine erste Wertung der Stickstoff-, Kalk- und Schwefelgehalte lässt den Schluss zu, dass die Meliorationsmengen keinen Einfluss auf die aktuellen erhöhten Ammoniumgehalte im Grundwasser haben. Aufgrund des Wasser- und Nährstoffbindevermögens der gekippten Substrate (quartäre fein- und grobsandigen Mittelsande [mSfs, mSgs]) ist davon auszugehen, dass die Stickstoffdüngemengen zum einen durch die Pflanzen (rekultivierte Fläche: Wald) aufgenommen wurden und zum anderen über das Sickerwasser bereits mit dem Grundwasser verfrachtet sind. Vorliegende Forschungsergebnisse geben dafür den Zeitraum von einer bis zwei Vegetationsperioden an. Eine weitere Kontaminationsquelle könnten die Humusanteile im Oberboden darstellen. Die Kartierergebnisse belegen eine pedologische Entwicklung vom Rohboden zum entwickelten Boden nach wie vor im Initialstadium (Bildung eines Ah-Horizontes). Die damit verbundene Humusakkumulation ist für die Ammoniumproblematik zu gering. Nicht betrachtet wurden Standorte mit bindigen bzw. bindig-kohligen Substraten. Deren höheres Filter- und Puffervermögen könnte zu zeitlich verzögerten Stofffrachten führen.

9.8 Resümee

Die **physikochemischen Untersuchungen** dienten als erste Erfassung und Bestandsaufnahme zur Beschaffenheitscharakteristik des Kippengrundwasserleiters. Die Analyseergebnisse an den Sediment-, Eluat- und Grundwasserproben ergaben hohe und nicht tolerable Konzentrationen bezüglich des Parameters Ammonium. Die gewonnenen Ergebnisse waren die Basis und der Ausgangspunkt für detaillierte Untersuchungen zur Ergründung des phänomenologischen Zusammenhangs in Hinblick auf die Ursachen für die hohe Ammoniumbelastung im Kippenkörper.

Durch die **mikrobiologischen Untersuchungsmethodik** konnte ein eindeutiger Abbau des kohligen Kippsubstrates als Ursache für die Akkumulation des Ammoniums in den Kippengrundwasserleitern nachgewiesen werden. Dabei konnte auch gezeigt werden, dass eine komplexe Kaskade verschiedener Mikroorganismengruppen als kommensalistische bzw. mutualistische Nahrungsgemeinschaft am Abbau des kohligen Kippsubstrates mitwirkt. In dieser Abbaugemeinschaft nehmen die Pilze den Initialschritt des Abbaus der komplexen Huminsubstanz im kohligen Substrat durch eine Ausscheidung ligninhydrolysierender Exoenzyme vor. Die Oligomere werden dann von der folgenden Nahrungskaskade an Mikroorganismen abgebaut. Mit der Quantifizierung der verschiedenen Mikroorganismengruppen konnte ihre Häufigkeit im Kippenuntergrund abgeschätzt werden. Auf dieser Grundlage wurden verschiedene Abbaumechanismen vorgeschlagen und in weiteren Experimenten (Enzymuntersuchungen, Mikrokosmenversuche) geprüft. Dabei leisteten die enzymatischen Untersuchungen, v. a. auf die Amidase, einen wesentlichen Hinweis auf mögliche Abbaumechanismen. Mit den zahlreichen Mikrokosmenversuchen konnten viele Raten unter verschiedenen Parametern (variierte pH-Werte, Sauerstoffkonzentrationen, Eisenkonzentrationen, Konzentrationen anderer chemischer Kippeninventars) ermittelt bzw. einzelne Zusammenhänge des komplexen Abbaumechanismus herausgearbeitet werden. Damit war sowohl eine weitgehende Aufklärung des Abbaumechanismus als auch eine Angabe zahlreicher Quelldaten für eine spätere Modellierung der komplexen biogeochemischen Umsatzprozesse im Kippenkörper möglich.

Wichtig für die Planung und Interpretation der mikrobiologischen Untersuchungen waren v. a. die chemischen Messdaten der untersuchten Standorte und die hydrogeologischen Daten, anhand derer die Prozesse im Kippkörper Schritt für Schritt erkennbar wurden. Mit Hilfe dieser Daten konnten weitere wichtige Untersuchungsschritte abgeleitet und geplant werden.

Eine sehr wesentliche Bestätigung der These des mikrobiellen Abbaus des kohligen Kippsubstrates und damit der Freisetzung des Ammoniums im Kippengrundwasserleiter konnte durch die isotopehydrologischen Untersuchungen geleistet werden.

Die Nutzung von **isotopehydrologischen Methoden** zur Bestimmung von Aquifereigenschaften ist besonders geeignet, um Aufschluss über Abbau- und Rückhalteprozesse zu geben und kann in einer Bergbauregion eingeschränkt zur Ermittlung der Herkunft und Altersstruktur des Grundwassers eingesetzt werden.

Die Aktivität der mikrobiellen Stoffumsetzung im Kohlenstoff-, Schwefel- und Stickstoffkreislauf kann durch den Grad der Isotopenfraktionierung detektiert werden. Die Freisetzung von Kohlenstoffverbindungen, das umgelagerte Untergrundmaterial, die Wasserhaltung und weitere im Bergbauggebiet typische Veränderungen (z. B. CO₂-Ausgasung) beeinflussen jedoch die korrekte Bestimmung des Grundwasseralters mittels Radio-Carbon und den Gehalt an tritiogenen Helium.

Im Fallbeispiel Tagebau Nochten konnten mittels isotopehydrologischer Untersuchungen der Nachweis von mikrobiellen Stoffumsetzungsprozessen (z. B. bakterielle Sulfatreduktion) und die Informationen zum Ursprung des Ammoniums erbracht werden. Zudem wurde die Mischung bzw. Infiltration von verdunstungsbeeinflussten Wasser eindeutig in einer Grundwassermessstelle belegt.

Insgesamt lässt sich resümieren, dass die Nutzung verschiedener Methoden aus den Bereichen Hydrogeologie, Hydrogeochemie, Mikrobiologie, Isotopehydrologie und Pedologie/Bodenchemie einen profunden Überblick über die biogeochemischen Interaktionen eines bergbaubeeinflussten Untersuchungsgebietes liefert. Die folgende Tabelle enthält eine Übersicht zu geeigneten Untersuchungsmethoden für spezifische Aufgaben- und Zielstellungen in Braunkohlentagebaugebieten.

Tabelle: Übersicht über die Untersuchungsmethoden im Braunkohlentagebaugebiet an Wasser- und Sedimentmaterial

Aufgaben- und Zielstellung	Untersuchungsbereich	Verfahren/Methode
Langfristige wasserhaushaltliche Betrachtungen	Hydrologie/Klimatologie	Bestimmung der Grundwasserneubildungsraten mittels Wasserhaushaltsmodellierung (z. B. BOWAHALD oder anderes geeignetes Modell), Szenarienrechnungen für Rekultivierungsplänen unter Berücksichtigung von klimatischen Veränderungen
Klärung der hydrogeologischen und -dynamischen Verhältnisse	Hydrogeologie	hydrogeologische Quer- und Längsprofilschnitte; Bestimmung bodenphysikalischer Parameter; Konstruktion von Hydroisohypsenplänen
Charakterisierung der Bodensubstrate	Physikochemie	Bestimmung der boden-physikalischen und -chemischen Parameter (Feststoffgehalte und lösliche Anteile relevanter Stoffe)
Charakterisierung des Grundwassers	Physikochemie	Bestimmung der Kat- und Anionenkonzentrationen, der Inertgasgehalte sowie der anorganischen und organische Kohlenstoffgehalte im

Aufgaben- und Zielstellung	Untersuchungsbereich	Verfahren/Methode
		Grundwasser
Einschätzung des mikrobiellen Abbaupotentials im Kippsubstrat	Mikrobiologie	Bestimmung von heterotrophen Mikroorganismen, Pilze und teufenorientierte Untersuchung mikrobieller Gemeinschaften (16S RNA-Analyse)
Einschätzung mikrobieller Abbauprozesse in Bezug auf N-, S- und Fe-Kreislauf im Kippsubstrat	Mikrobiologie	Bestimmung von Sulfat- und Eisenreduziern, hetero- und autotrophen Nitratreduziern, Enzymaktivität spezieller Bodenorganismen, Bestimmung Nitrifikationsraten
Einschätzung von Abbau- und Rückhalteprozesse im Wasser und Kippsubstrat	Isotopenhydrologie	Bestimmung der Isotopenverhältnisse an Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelkomponenten
Herkunft und Altersstruktur des Grundwassers	Isotopenhydrologie	Bestimmung der Isotopengehalte des Wassers, Altersdatierung mittels Radiocarbon, Tritium und Helium
flächenhafte Einschätzung der Kippsubstrate zur Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit und der Grundwasserneubildungsraten	Bodenhorizonte und -chemie (Kippsubstrate) sowie Bodenphysik	Bestimmung der Bodenbeschaffenheit, der Wasserdurchlässigkeit (k_f -Wert) und des Meliorationsbedarfes im Hinblick auf erforderliche Rekultivierungsmaßnahmen

Danksagung

Für die Unterstützung des Projektes bedanken wir uns bei Vattenfall Europe Mining AG, Abt. Geotechnik, Ingolf Arnold, der Geohydrologie und Wasserwirtschaft, Dr. Thomas Koch und dem Ingenieurbüro Dr. Uhlmann in Dresden.

9.9 Literatur

- CASCIOTTI, K. L., SIGMAN D. M., HASTINGS M. G., BÖHLKE, J. K. & HILKERT, A. (2002): "Measurement of the Oxygen Isotopic Composition of Nitrate in Seawater and Freshwater Using the Denitrifier Method." *Analytical Chemistry* **74**(19): 4905-4912.
- CLARK, I. D. & P. FRITZ (1997): *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Taylor & Francis.
- DIN 19529: Eluation von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Eluationsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Januar 2009.
- GRAUPNER, B. J., KOCH, C., PROMMER, H., WERNER, F. (2012): „Process oriented quantification of mine dump pollutant inventories on the large scale – The case of the lignite mining district Lusatia, Germany.” *Journal of Geochemical Exploration* 112: 161-173.
- HELLWIG, D.; SCHUBERT, G.; CEPEK, A. G.; STEDING, D.: *Litofazieskarte Quartär. M.: 1:50.000. Blatt Weißwasser (2470)*. ZGI Berlin. 1979.
- HOCHÉ, D.: *Hydrogeologisches Kartenwerk der DDR. M.: 1:50.000. Blatt Weißwasser S/Rothenburg (Oberlausitz) (1111-3/4)*. Zentrales Geologisches Institut Berlin. 1. Auflage. 1984.
- KNÖLLER, K., H. IHLING & C. JESCHKE (2012): *Ergebnisse der isotopenhydrologischen Untersuchungen an Grundwassermessstellen auf der rekultivierten Kippe des Tagebaus Nochten*. Schriftenreihe, Heft 41/2012 "Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell. LfULG. Dresden: 42-50.
- MÜLLER, G. O. (1968): *Acidimetrische Bestimmung nach Kjeldahl*. Praktikum der quantitativen chemischen Analyse, Hirzel Verlag. **10. Auflage**: 324.

- KOCH, E.; ALEXOWSKY, W.: Geologische Karte der eiszeitlich bedeckten Gebiete von Sachsen. M.: 1:50.000. Blatt Weißwasser (2470). 1. Auflage. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 1. Auflage. Freiberg. 1999.
- SCHEERBAUM, M.: Hydrogeologisches Kartenwerk der Deutschen Demokratischen Republik. M.: 1:50.000. Blatt Hoyerswerda/Hoyerswerda-Neustadt (1110-3/4). Zentrales Geologisches Institut Berlin. 1. Auflage. 1984.
- SEELIGER, M.: Ergänzungsbericht Braunkohlenerkundung Feld Nochten-West 1980 - Berichtsteil Hydrogeologie. VEB GFE Freiberg. Freiberg. 03.02.1981. unveröff.
- SEELIGER, M.: Vorratsberechnung Braunkohlenerkundung Nochten Ost 1986. Berichtsteil II, Hydrogeologie. VEB GFE Halle, BT Freiberg. 31.10.1986.
- SIGMAN, D. M., CASCIOTTI K. L., ANDREANI, M., BARFORD, C., GALANTER, M. & BÖHLKE, J. K. (2001): "A Bacterial Method for the Nitrogen Isotopic Analysis of Nitrate in Seawater and Freshwater." *Analytical Chemistry* **73**(17): 4145-4153.
- WILLSCHER, S., KNIPPERT, D., IHLING, H., KNÖLLER, K. AND JESCHKE, C. (2011): Erste Ergebnisse der mikrobiellen und isopenhydrochemischen Untersuchungen zur Klärung der Ursachen der hohen Ammoniumbelastung im Grundwasser auf der rekultivierten Kippe des Tagebaus Nochten. Schriftenreihe, Heft 45/2011 "Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell". LfULG. Dresden: 24-37.
- WILLSCHER, S.; KNIPPERT, D.; KÜHN, D.; IHLING, H. (2012): Weiterführung der mikrobiologischen Untersuchungen zur Klärung der Ursachen der hohen Ammoniumbelastung im Grundwasser auf der rekultivierten Kippe des Tagebaus Nochten. Schriftenreihe, Heft 41/2012 „Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell“, LfULG. Dresden. S. 34-41.
- WILLSCHER, S.; KNIPPERT, D.; IHLING, H.; KÜHN, D.; STARKE, S.: Underground degradation of lignite coal spoil material by a mixed microbial community under acid mine drainage conditions. *Advanced Materials Research*. Vol. 825 (2013). pp 46-49.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Kati Kardel, Heiko Ihling, Christina Illgen, Sabine Gruhne, Dr. Arnd Bräunig,
Ron Tannert, Ruth Hoffmann, Aline Kästner
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Dr. Sabine Wilscher, Verena Enzner, Denise Kühn, Doreen Knippert, Peggy
Schuster, Thomas Fichtner
TU Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten
Henry Schlönvoigt
TU Dresden, Institut für Geographie
Ivo Paffrath
TU Bergakademie Freiberg, Studienrichtung Geoökologie
Claus Nitsche, Norbert Hüfers, Stephan Klotzsch, Theresa Albert
GICON GmbH/Boden- und Grundwasserlabor GmbH (BGD)
Thomas Vienken, Peter Dietrich, Denise Umoh, Kay Knöller, Christina Jesch-
ke; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
Tilo Vogel
Imprägnierwerk Wülknitz GmbH

Redaktion:

Christina Lausch
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Boden, Altlasten
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden
Telefon: +49 351 8928-4209
Telefax: +49 351 8928-4099
E-Mail: Christina.Lausch@smul.sachsen.de

Fotos:

Heiko Ihling, LfULG

Redaktionsschluss:

09.12.2013

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

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

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rah-
men ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlich-
keit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im
Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung
verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an
Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder
Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist
auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch
ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende
Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des
Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden
könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhän-
gig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informations-
schrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese
Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.