GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht zum Vorhaben

WIR! - rECOmine –

Verminderung von Gewässerbelastungen in der Montanregion Erzgebirge/ Krušnohoří am Beispiel der Spülhalde Hammerberg Freiberg

(MindMontan)

TP1: Pilotanlagenplanung und biologische Schadstoffabtrennung aus Sickerwässern

Zuwendungsempfänger: TU Bergakademie Freiberg

Förderkennzeichen: 03WIR1920A

Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2023- 31.12.2025

Berichtszeitraum: 01.05.2023- 31.12.2025

Projektleiterin: Prof. Dr. Sabrina Hedrich

Projektbearbeiter: Dennis Oßmann, Dr. Michel Oelschlägel

Freiberg, den 31.05.2026

Inhaltsverzeichnis

1 Projektergebnisse 1
1.1 Projektkonsortium 1
1.2 Zielstellung des Vorhabens 1
1.3 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse 1
AP 1: Detaillierte Systemanalyse zur Technologieauswahl und Schaffung der Voraussetzungen 1
AP 1.1: Antrags- und Genehmigungsmanagement 1
AP 1.3: Zusammenstellung bisheriger chemischer Monitoringdaten 2
AP 2: Optimierung biologischer und chemischer Behandlungsverfahren 2
AP 2.1 und 2.2: Probennahme, Analyse mikrobieller Gemeinschaften am Standort 2
AP 2.3: Gewinnung, Charakterisierung und Optimierung der Kulturen 3
AP 2.4: Upscaling der Anreicherungskulturen + Optimierung Prozessparameter 5
AP 2.6: Auswahl und Optimierung von Substraten für eine passive Wasserbehandlung 12
AP 3: Pilotversuchskonzeption 16
AP 3.1: Wahl und Vorbereitung des Upscaling-Standortes 16
AP 3.2: Festlegungen zur Einpassung in den laufenden Betrieb der Haldensanierung 17
AP 4: Installation und Durchführung Pilotversuch 19
AP 4.4: Mikrobiologisch-chemisches Monitoring der Pilot-Wasserbehandlungsanlage 19
AP 4.6: Auswertung, ökologisch-ökonomische Bewertung für den Standort 21
AP 5: Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit 23
AP 5.3-5.5: Projektbezogener öffentlicher Veranstaltungen 23
2 Zweckmäßigkeit der Kosten 25
3 Zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten 25
4 Verwertung 25
5 Veröffentlichungen und Ergebnisverbreitung 26
6 Literaturverzeichnis 26

1 Projektergebnisse

1.1 Projektkonsortium

Das Projekt „MindMontan – Verminderung von Gewässerbelastungen in der Montanregion Erzgebirge/Krušnohoři am Beispiel der Spülhalde Hammerberg, Freiberg“ wurde im Rahmen des Programms „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ im rECOmine-Verbund durchgeführt. Die TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften, AG Mikrobiologie/Biohydrometallurgie, verantwortete als Verbundkoordinatorin das Teilvorhaben 1 „Pilotanlagenplanung und biologische Schadstoffabtrennung aus Sickerwässern“. Weitere Verbundpartner waren die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH und der Förderverein Montanregion Erzgebirge e.V. Als assoziierte Partner waren die Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, der Landkreis Mittelsachsen, die Landesdirektion Sachsen und die Meyer Burger GmbH eingebunden.

1.2 Zielstellung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens MindMontan war es, durch innovative Technologien die Auswirkungen des Bergbaus auf die Umwelt sowohl regional als auch global zu reduzieren, regionale Strukturen auszubauen, gesellschaftliche Konflikte zu minimieren und die soziale Entwicklung durch aktive Einbindung der Öffentlichkeit zu stärken. Unter Einsatz neuartiger Wasserbehandlungsverfahren sollten die am Standort der Spülhalde Hammerberg in Freiberg anfallenden, schadstoffhaltigen Sickerwässer kostengünstig und langfristig aufbereitet, der Rohstoff Wasser in einen ökologisch und chemisch guten Zustand versetzt und damit die Umgebung dekontaminiert werden. Der geplante modulare Aufbau der Wasserbehandlungsanlage, bestehend aus chemischen und biologischen Verfahren, sollte einen Übertrag auf ähnliche, bergbaubeeinflusste Standorte weltweit erlauben und somit auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig sein. Durch Integration eines Solarmoduls (gestiftet von der Firma Meyer Burger, Freiberg) zur unabhängigen Energiegewinnung für den Betrieb der Anlage wurde das nachhaltige und innovative Konzept der Technologie weiterhin gestärkt. Durch Entwicklung und Erprobung des Verfahrens im Pilotmaßstab am Standort Hammerberg und unter Einbeziehung von Behörden sollte die wirtschaftliche und soziale Entwicklung in der Region gestärkt werden. Gleichzeitig sollte mit diesem Vorhaben ein wichtiger Schritt zum Erreichen der in der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) vorgegebenen Ziele und der Umsetzung der dafür notwendigen Maßnahmen getätigt werden. Die TUBAF als Verbundkoordinator verfolgte umfassend das Ziel, durch Koordination aller Partner die Pilotanlage am Standort effizient zu betreiben, dabei die breite Öffentlichkeit einzubeziehen und durch Übertrag der Technologie die Stellung auf dem Weltmarkt zu sichern und das Gesamtziel des Vorhabens zu erreichen. In Teilvorhaben 1 hatte die TUBAF zum Ziel, mit Unterstützung des Unterauftragnehmers Saxonia und weiterer assoziierter behördlicher Partner eine Genehmigung zum Bau und Betrieb der Pilotanlage am Standort Hammerberg zu erhalten. Des Weiteren war es das Ziel der TUBAF, die biologische Behandlungsstufe der Pilotanlage zu etablieren und zu betreiben und somit das innovative und nachhaltige Gesamtkonzept der Anlage zu stützen. Ergänzende Versuche im Labormaßstab bildeten dabei einen weiteren Aufgabenbereich. Weiterhin sollten der geplante Verlauf und die Ergebnisse des Vorhabens öffentlichkeitswirksam aufbereitet und im aktiven Austausch mit Bürgern und der breiten Öffentlichkeit zur Stärkung der Montanregion Erzgebirge als Weltkulturerbe verwendet werden.

1.3 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

AP 1: Detaillierte Systemanalyse zur Technologieauswahl und Schaffung der Voraussetzungen

AP 1.1: Antrags- und Genehmigungsmanagement

Die Sanierung der Spülhalde Hammerberg erfolgt seit 2012 durch das Aufbringen einer mineralischen Abdeckung. Diese Sanierungsmaßnahme unterliegt dabei den Vorgaben der zuständigen Bodenschutzbehörde, in diesem Fall der Oberen Bodenschutzbehörde der Landesdirektion Sachsen (LDS). Folglich bedürfen Forschungsvorhaben, die im Bereich der Spülhalde Hammerberg stattfinden, der Zustimmung der LDS. Da die geplante Versuchsanlage auch die Einleitstelle 3119 an der Freiberger

Mulde tangiert, war auch die Zustimmung der unteren Wasserbehörde des Landratsamtes Mittelsachsen (uWB) erforderlich.

Durch die SAXONIA erfolgt weiterhin ein regelmäßiger Austausch mit beiden Umweltfachbehörden. In Abstimmung mit der LDS erfolgt der Austausch über den jährlich einzureichenden Jahresbericht zum Stand der Sanierungsmaßnahme, der um ein Unterkapitel zum Projekt MindMontan erweitert wurde.

AP 1.3: Zusammenstellung bisheriger chemischer Monitoringdaten

Die Monitoringdaten, die aktuell auch weiterhin an der MP 3119 erhoben werden, umfassen Temperatur, Trübung/ Geruch, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential sowie die Bestimmung des Gehaltes an Cd, Cu, Ni, Zn, Al sowie TOC. Die Daten werden durch die SAXONIA aufbereitet und den Projektbeteiligten kontinuierlich zur Verfügung gestellt. In Abstimmung mit der LDS wurde das aktuelle Untersuchungsspektrum ab 01/2025 um die Bestimmung des Sulfatgehaltes erweitert.

AP 2: Optimierung biologischer und chemischer Behandlungsverfahren

AP 2.1 und 2.2: Probennahme Hammerberg-Halde, Analyse mikrobieller Gemeinschaften am Standort

Für die Probennahme von Material aus insbesondere anaeroben Schichten auf der Hammerberg-Halde war die Abtragung der vegetativen Bedeckung und oberer mineralischer Schichten mit einer Mächtigkeit von 50-100 cm notwendig. Dies setzte den Einsatz von schwerem Gerät voraus. Diese Arbeiten zum Aushub von oxidiertem und reduziertem Spülsand, welche von der SAXONIA durchgeführt wurden, konnten aus organisatorischen Gründen nicht wie geplant im Jahr 2023 erfolgen, sondern erst im darauffolgenden Frühjahr im Jahr 2024. Aufnahmen dieser Maßnahme im Frühjahr 2024 sind in **Abb. 1** dargestellt.

***Abb. 1**: Entnahme von Haldenmaterial auf der Spülhalde Hammerberg am 30.04.2024 (Aufnahmen SAXONIA)*

Das dabei erhaltene Probenmaterial wurde nachfolgend an der TUBAF molekulargenetisch untersucht, wobei vorhandene DNA isoliert und anschließend extern sequenziert wurde. Diese Arbeiten sollten Auskunft über im Material vorhandene Mikroorganismen geben. Zugleich sollte geprüft werden, ob sich die Proben aus den anaeroben Zonen ggf. zur Anreicherung von Sulfatreduzierern eignen, welche eine Reduktion von Sulfat durchführen und durch daraus folgende Schwefelwasserstoffbildung die gewünschte Abscheidung von Metallionen als schwerlösliche Sulfide realisieren können. Die Ergebnisse der 16S-rRNA-Amplikon-Sequenzierung von oxidiertem und reduziertem Spülsand sind in **Abb. 2** dargestellt.

In beiden entnommenen Proben war die Gattung *Clostridium* mit einem relativen Anteil von ca. 30% vertreten. Vertreter dieser Gattung sind für eine anaerobe Lebensweise bekannt, wenngleich keine Sulfatreduktion beschrieben wird (Dürre, 2014). In der oxidierten Spülsandprobe fand sich zudem die Gattung *Desulfosporosinus* mit einem Anteil von etwa 30%, im reduzierten Spülsand nur mit etwa 10%. Vertreter dieser Gattung leben ebenfalls anaerob, stellen zugleich aber auch bedeutende

Sulfatreduzierer dar (Pester et al., 2010). Im reduzierten Spülsand waren darüber hinaus mit einem erheblichen Anteil von ca. 43% nicht näher definierbare Vertreter der Familie *Desulfallaceae* auffindbar. Zu dieser Familie gehören insgesamt vier Gattungen (*Desulfallas, Desulfoscipio, Desulfotruncus* und *Sporotomaculum*). Vertreter von *Desulfallas, Desulfoscipio* und *Desulfotruncus* sind strikt anaerob (Watanabe et al., 2020). Für Mikroorganismen aus dieser Familie ist chemoorganoheterotrophe Lebensweise bekannt, wobei organische Säuren, Alkohole und kurzkettige Fettsäuren als Elektronendonatoren dienen können (Watanabe et al., 2020). Bei einigen Vertretern ist auch eine chemolithoautotrophe Lebensweise bekannt. Die Elektronen werden auf Sulfate, Sulfite oder Thiosulfat übertragen, wodurch Schwefelwasserstoff (H_2S) entsteht (Watanabe et al., 2020).

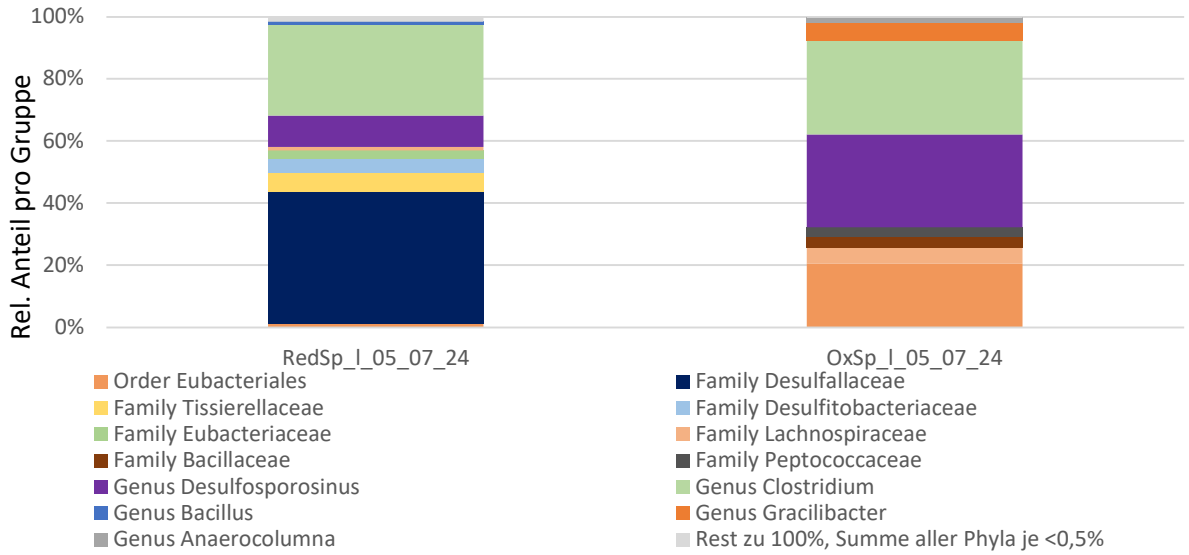

***Abb. 2**: Ergebnisse der 16S rRNA-Amplikon-Sequenzanalyse der Proben von der Hammerberghalde. Dargestellt ist jeweils der relative Anteil der Phyla an der Gesamtpopulation.*

Beide Proben zeigten folglich ein typisches Profil für mikrobielle Gemeinschaften von anaeroben Standorten und wiesen auf die Anwesenheit von Sulfatreduzierern hin. Sulfatreduzierende Anreicherungskulturen auf Grundlage dieser Proben konnten letztlich auch erfolgreich im Labor angereichert werden (Daten nicht gezeigt).

AP 2.3: Gewinnung, Charakterisierung und Optimierung der Kulturen für Sulfatreduktion und Metallfällung

Ursprünglich sollten in diesem Arbeitspaket die Anreicherungskulturen ausgehend von dem Proben der Hammerberg-Halde (siehe AP 2.1 und 2.2) herangezogen werden. Durch die Verzögerung der Probennahme (siehe AP 2.1) standen diese Proben allerdings nicht rechtzeitig zur Verfügung, weshalb sich für die Vorversuche im Labor mit anderen Ausgangsmaterialien beholfen wurde. Hierzu wurden aus alten Säulen vom Projektpartner G.E.O.S., welche in früheren Projekten für Versuche zur Sulfatreduktion eingesetzt wurden, Wasser- und Sedimentproben entnommen und diese für Anreicherungsversuche unter anaeroben Bedingungen in Gegenwart von Methanol und Natriumacetat eingesetzt (**Abb. 3**). Insbesondere die Sedimentproben zeigten hier das schnellste Wachstum. Nach einer 10-wöchigen Anreicherung, wobei die Kulturen regelmäßig in neues Medium überimpft wurden, erfolgte auch hier eine DNA-Isolierung mit anschließender 16S-rRNA-Amplikon-Sequenzierung zur Identifikation der vorhandenen mikrobiellen Gemeinschaft. Die Ergebnisse dazu sind in **Abb. 4** dargestellt.

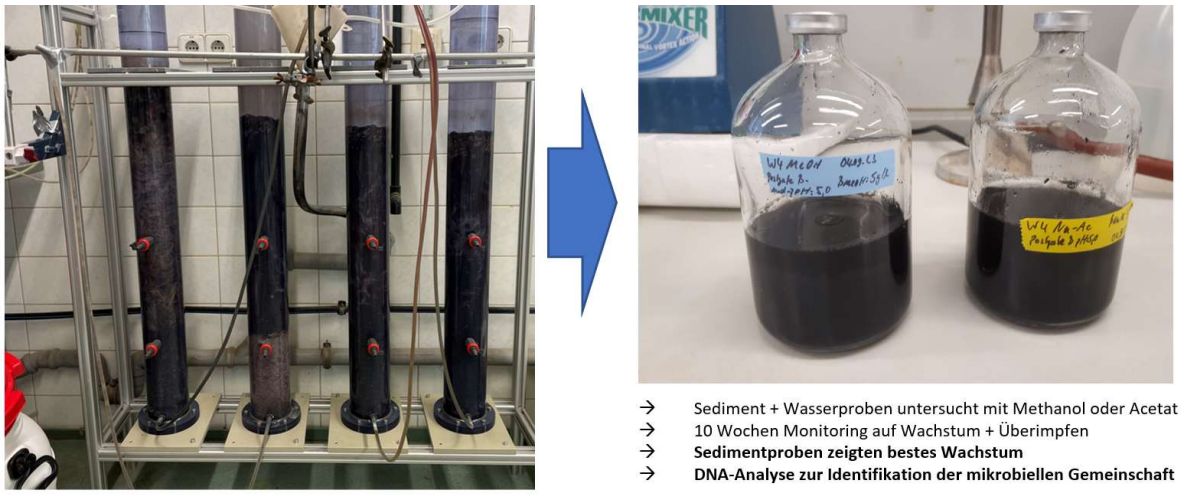

***Abb. 3**: Sediment und Wasser aus alten Säulen von G.E.O.S. (links) wurde zur Gewinnung von Anreicherungskulturen (rechts) verwendet.*

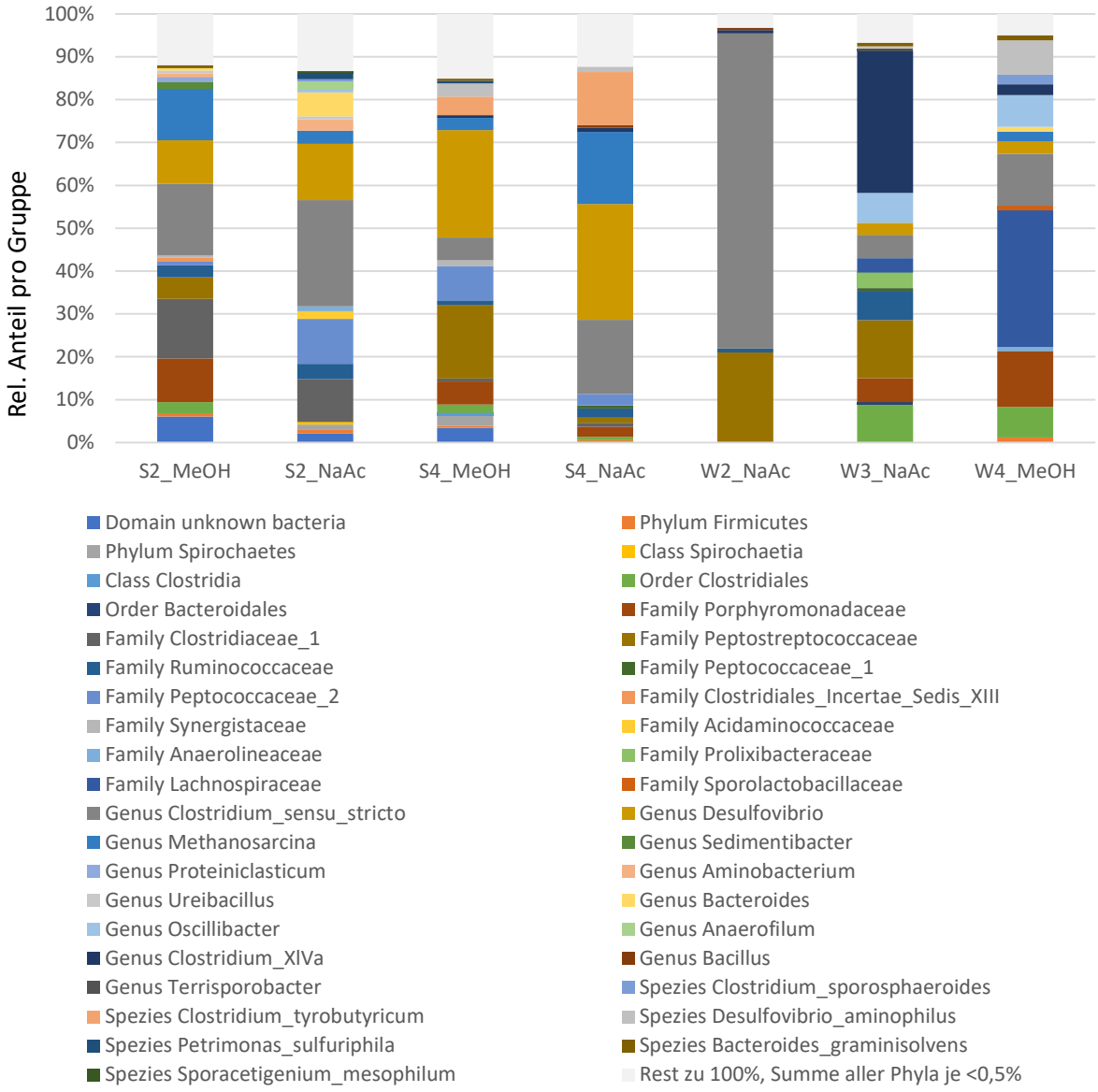

***Abb. 4**: Darstellung der Ergebnisse der 16S rRNA-Amlikon-Sequenzanalyse der Anreicherungskulturen ausgehend von Sediment (S) oder Wasser (W) aus den G.E.O.S.-Säulen 2, 3 oder 4 in Gegenwart der Substrate Methanol (MeOH) oder Natriumacetat (NaAc).*

Alle Proben zeigten sich von der Verteilung einzelner Gruppen, Familien oder Gattung recht divers, wenngleich bestimmte Vertreter (u.a. die Gattung *Clostridium*) in allen Proben nachweisbar waren (**Abb. 4**). Zugleich unterschieden sich die Wasserproben insgesamt stärker von den Sedimentproben, insbesondere beim Anteil der Gattung *Desulfovibrio* (10-27% bei Sedimentproben gegenüber <0,5-8% in Wasserproben) oder *Methanosarcina* (2,8-17% bei Sedimentproben, <0,5-2.2% in Wasserproben). *Methanosarcina* repräsentiert eine Gruppe anaerober Archaeen, welche zur Methanoxidation (Yu et al., 2022) oder Methanbildung ausgehend von organischen Substraten (Giangeri et al., 2024) befähigt sind. Vertreter der Gattung *Desulfovibrio* sind dagegen wichtige Sulfatreduzierer (Karnachuk et al., 2021), welche es im Hinblick auf die Zielstellung des Projektes zu erhalten galt.

Die Anreicherungskulturen W4_MeOH und S4_NaAc (**Abb. 4**) wurden gemischt und anschließend als Inokulum für die nachfolgenden Säulenversuche verwendet (siehe AP 2.4).

AP 2.4: Upscaling der Anreicherungskulturen + Optimierung Prozessparameter

Mit den Kulturen aus AP 2.3 wurde anschließend ein Upscaling durchgeführt. Dazu wurde jeweils eine 1,7L-Glas-Säulen (H: 28,5 cm) mit ca. 925ml Flüssigkeit und 800 ml Trägermaterial befüllt. In Säule 1 wurden dazu Poraver® Blähglasgranulate mit unterschiedlichen Korngrößen von 2-16 mm (Mischverhältnis: 1:1:1) verwendet sowie Kunststoffkörper aus der Aquaristik mit eingestreut. Als Substrat wurde hier 2g/l Natriumacetat verwendet. In Säule 2 wurde „Biomix“ als Trägermaterial verwendet, welches aus 45% Stroh, 22% geschreddertes und getrocknete Holz, 22% Travertin und 11% Kompost besteht. Dieses dient hier zugleich auch als Substrat. In beiden Säulen fand jeweils Postgate B Medium Anwendung. Nach einer Anwachsphase von 57-61 Tagen unter Einsatz des o.g. Inokulums (siehe AP 2.3) wurden die verschiedenen Metalle schrittweise in die Medien eingebracht und deren Abreicherung untersucht. Dabei wurden folgende Salze und Konzentrationen zugegeben:

- → Ab 19.10.23: 16 mg/l Zn^{2+} als $ZnSO_4$
- → Ab 03.01.24: 40 mg/l Zn^{2+} als $ZnSO_4$
- → Ab 01.02.24: zusätzlich 0,3 mg/l Cd^{2+} als $CdSO_4$
- → Ab 24.04.24: zusätzlich 12 mg/l Mn^{2+} als $MnSO_4$
- → Ab 02.06.24 (Säule 1), ab 10.06.24 (Säule 2): zusätzlich 0,2 mg/l Ni^{2+} als $NiCl_2$, 0,8 mg/l Cu^{2+} als $CuSO_4$

Der Versuchsaufbau im ersten Teil des Experimentes ist in **Abb. 5** dargestellt. Über den Versuchszeitraum hinweg wurden regelmäßig der Sulfidgehalt (als HS^- oder H_2S) photometrisch bei 670 nm (nach Cline, 1969) sowie der pH-Wert und das Redoxpotential ermittelt. Zudem erfolgte die Bestimmung der Metallkonzentrationen mittels ICP-MS oder ICP-OES. Die Anionenanalytik für Sulfat und auch das Substrat Acetat (im Falle von Säule 1) erfolgte mittels Ionenchromatographie. Anfangs wurde auch die Zellzahl mittels Neubauer-Kammer ermittelt. Das System wurde über die ersten 14 Monate bei einer Temperatur von etwa 22°C inkubiert (= *Versuchsabschnitt 1*).

***Abb. 5**: Versuchsaufbau der Säulen (links mit Natriumacetat, rechts mit „Biomix“) zur Kultivierung Sulfat-reduzierender Mikroorganismen und zur Untersuchung ihrer Effizienz im Hinblick auf die Abscheidung von Schwermetallionen (bei 22°C).*

Ab Oktober 2024 wurde untersucht, welchen Einfluss eine Reduzierung der Temperatur von 22°C auf 14°C auf die Effizienz der Sulfatreduktion in den Säulen hat (= *Versuchsabschnitt 2*). Unter diesen

Bedingungen wurden beide Säulen für etwa vier Monate weiterbetrieben und die o.g. Parameter weiterhin erfasst.

Ab Juli 2025 wurde der Betrieb der Säulen dann schrittweise auf das Sickerwasser der Hammerberg Spülhalde umgestellt (= *Versuchsabschnitt 3*). Dazu erfolgte eine vierwöchige Umstellung, in der das bisher verwendete Postgate-Medium zunächst etwa zwei Wochen lang 1:1, die verbleibenden zwei Wochen dann 1:3 mit Sickerwasser vermischt und anschließend in die Säulen geleitet wurde. Nach der Umstellungszeit wurde ab dem 30.07.2025 nur noch Sickerwasser verwendet. Im Falle der NaAc-Säule wurde aber weiterhin 2 g/l NaAc im Zulauf als Substrat zugegeben. Während der Umstellung kam es zu Ausfällungen von insbesondere Zink- und Cadmiumphosphat, da der initiale pH-Wert des Postgate-Mediums (4-5) durch das Sickerwasser (pH 7) angehoben und somit das Löslichkeitsverhalten der genannten Metallionen in Gegenwart der Phosphatquelle im Postgate-Medium verändert wurde. Nach Umstellung auf 100% Sickerwasser (in welchem kein messbares Phosphat vorhanden war), traten trotz höherem pH-Wert aufgrund der Abwesenheit von Phosphat-Ionen keine Ausfällungen mehr auf.

Die Ergebnisse der Kultivierung beider Säulen über die drei genannten *Versuchsabschnitte* sind für **Säule 1** (Natrium-Acetat-Reaktor) in **Abb. 6** und **7** sowie für **Säule 2** („Biomix“-Reaktor) in **Abb. 8** und **9** dargestellt.

Basierend auf **Abb. 6-9** können folgende Erkenntnisse aus dem *Versuchsabschnitt 1* (bei 22°C) abgeleitet werden:

Beide Systeme waren in der Lage, die untersuchten Metalle abzutrennen, wenngleich später in beiden Systemen ein Anstieg der Mangan-Konzentration erkennbar war. Mangan lässt sich jedoch nicht effizient als Sulfid abscheiden, sondern beruht auf anderen Effekten, welche bei längeren Laufzeiten der Säulen wahrscheinlich irgendwann einer Erschöpfung unterliegen, wodurch überschüssiges Mangan nicht mehr zurückgehalten wird.

Säule 2 (mit „Biomix“) wirkte im ersten halben Jahr der Laufzeit weniger schwankungsanfällig und stabiler auf Einflüsse von außen. Im weiteren Verlauf zeigten sich jedoch kaum noch Unterschiede und beide Systeme waren vergleichbar. Der „Biomix“-Reaktor (Säule 2) lieferte folglich in der Anfangszeit konstant niedrige Metallionen-Restkonzentrationen, während es beim Natrium-Acetat-Reaktor (Säule 1) sehr vereinzelt auch kurzzeitig signifikantere Restkonzentrationen gab.

Basierend auf **Abb. 6-9** können folgende Erkenntnisse aus dem *Versuchsabschnitt 2* (bei 14-16°C) abgeleitet werden:

Beide Systeme waren weiterhin in der Lage, die Metallionen erfolgreich abzutrennen (außer Mangan). Bei Säule 1 waren nur einmalig erhöhte Cadmium- und Zink-Konzentrationen nachweisbar. Bei der Betrachtung anderer Parameter zeigt sich jedoch, dass Säule 1 empfindlicher auf die niedrigeren Temperaturen reagierte als Säule 2 („Biomix“). So stieg bei Säule 1 das Redoxpotential erkennbar an und auch die Sulfid-Bildung war deutlich reduziert (**Abb. 6**). Auch die Sulfat-Konzentration zeigte höhere Spitzen und das Substrat Acetat wurde oft nicht mehr vollständig verbraucht (**Abb. 7**). Beim „Biomix“-System (Säule 2) haben die genannten Parameter deutlich unauffälliger auf die Temperaturreduzierung reagiert.

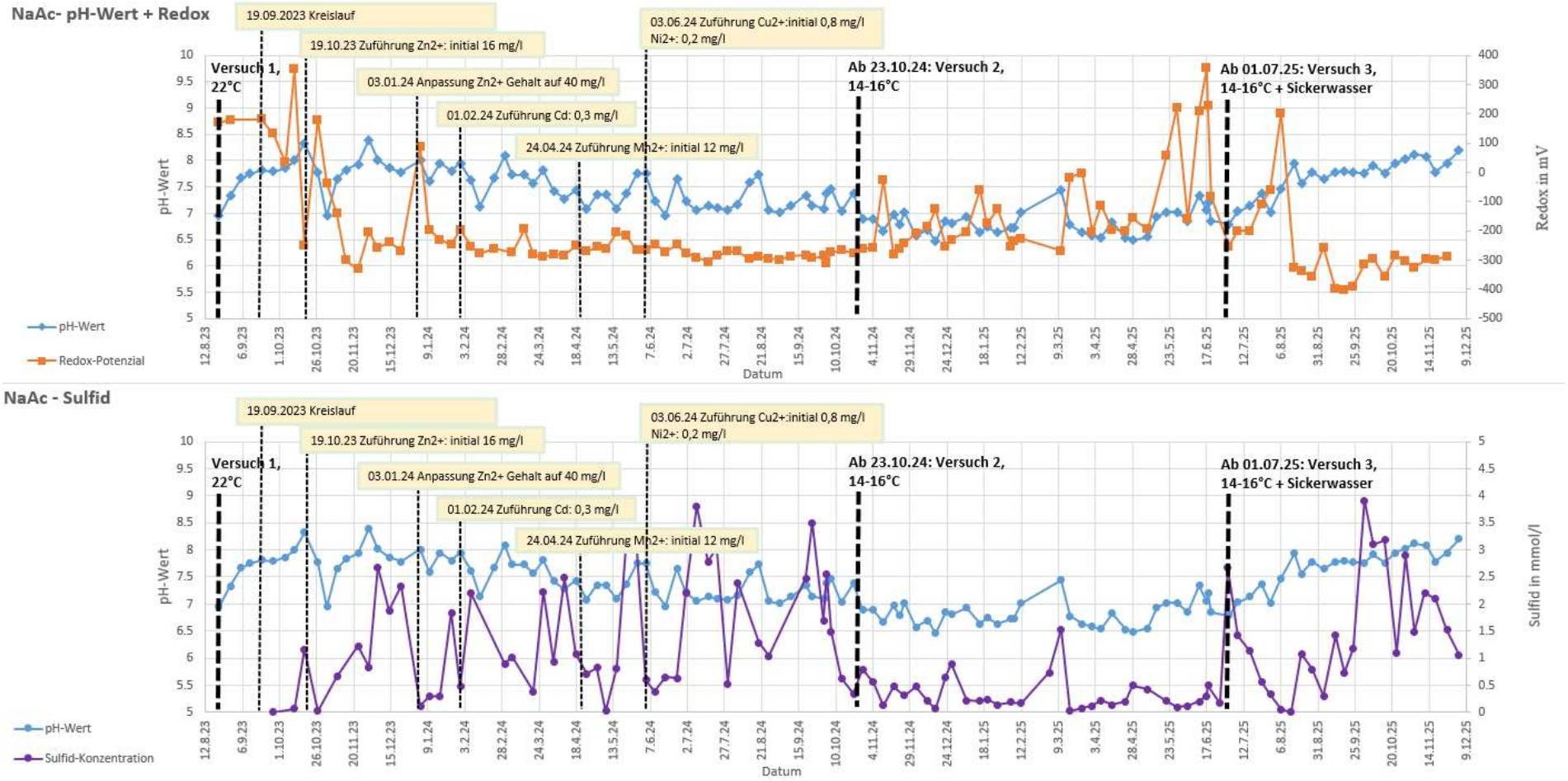

Abb. 6: *Darstellung versuchsrelevanter Parameter für den Natrium-Acetat-Reaktor (Säule 1). Oberes Diagramm: pH-Wert und Redoxpotential, Unteres Diagramm:pH-Wert, Sulfid-Bildung als HS^- oder H_2S. Zudem sind die Versuchsabschnitt 1 (durchgeführt bei 22°C), Versuchsabschnitt 2 (durchgeführt bei 14-16°C) und der Versuchsabschnitt 3 (Umstellung auf Sickerwasser aus der Hammerberg-Halde) gekennzeichnet.*

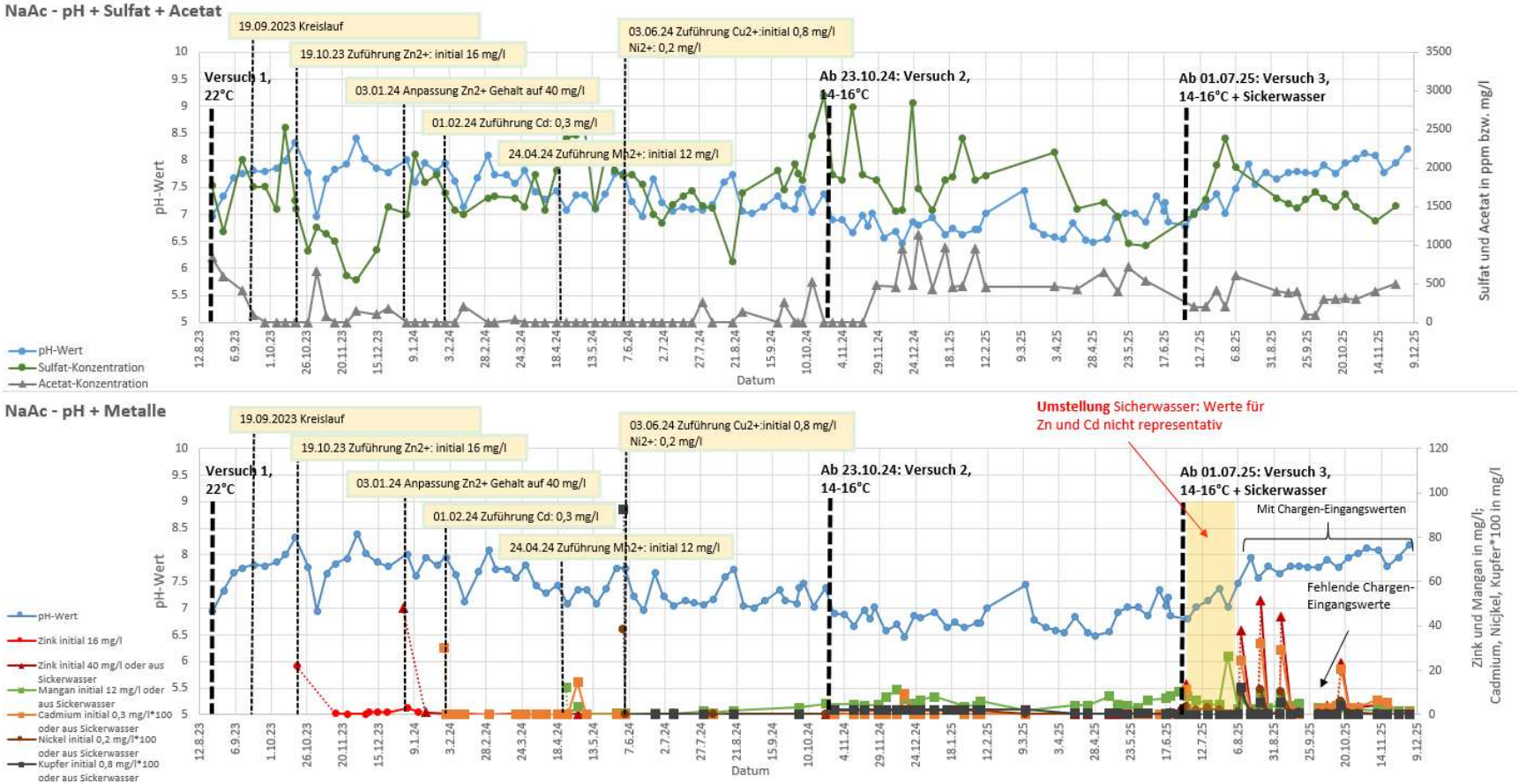

***Abb. 7**: Darstellung weiterer versuchsrelevanter Parameter für den Natrium-Acetat-Reaktor (Säule 1). Oberes Diagramm: pH-Wert, Sulfat-Konzentration, Acetat-Konzentration (Substrat). Unteres Diagramm: pH-Wert, Metallionen-Konzentrationen von Zn, Mn, Cd, Ni und Cu. Für Cd, Ni und Cu ist zur besseren Darstellung die Konzentration mit dem Faktor 100 multipliziert worden. Der Versuchsabschnitt 1 (durchgeführt bei 22°C), Versuchsabschnitt 2 (durchgeführt bei 14-16°C) und Versuchsabschnitt 3 (Umstellung auf Sickerwasser aus der Hammerberg-Halde) sind gekennzeichnet.*

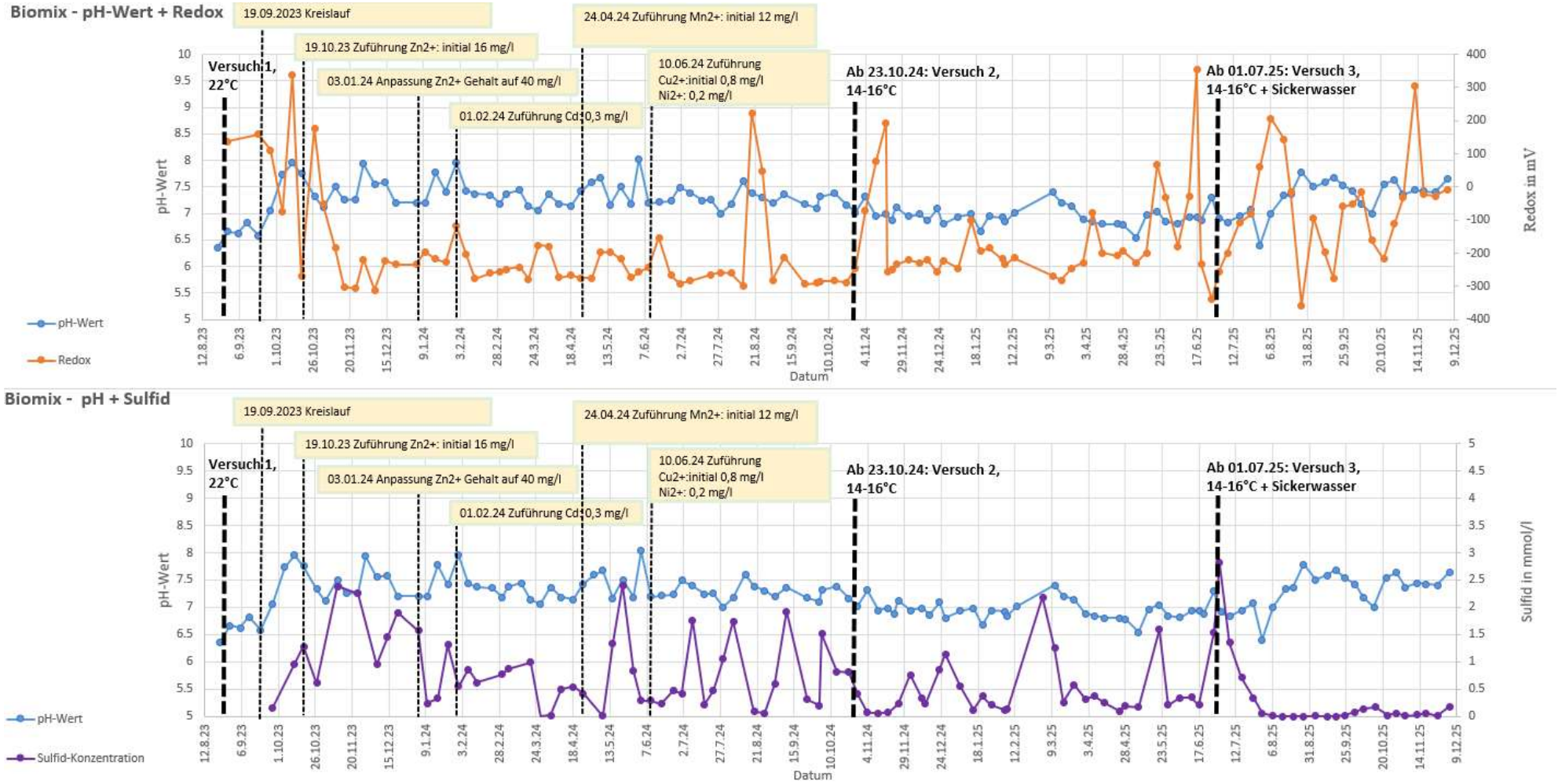

***Abb. 8**: Darstellung versuchsrelevanter Parameter für den „Biomix"-Reaktor (Säule 2). Oberes Diagramm: pH-Wert und Redoxpotential, Unteres Diagramm: pH-Wert, Sulfid-Bildung als HS^- oder H_2S. Zudem sind Versuchsabschnitt 1 (durchgeführt bei 22°C), Versuchsabschnitt 2 (durchgeführt bei 14-16°C) und Versuchsabschnitt 3 (Umstellung auf Sickerwasser aus der Hammerberg-Halde) gekennzeichnet.*

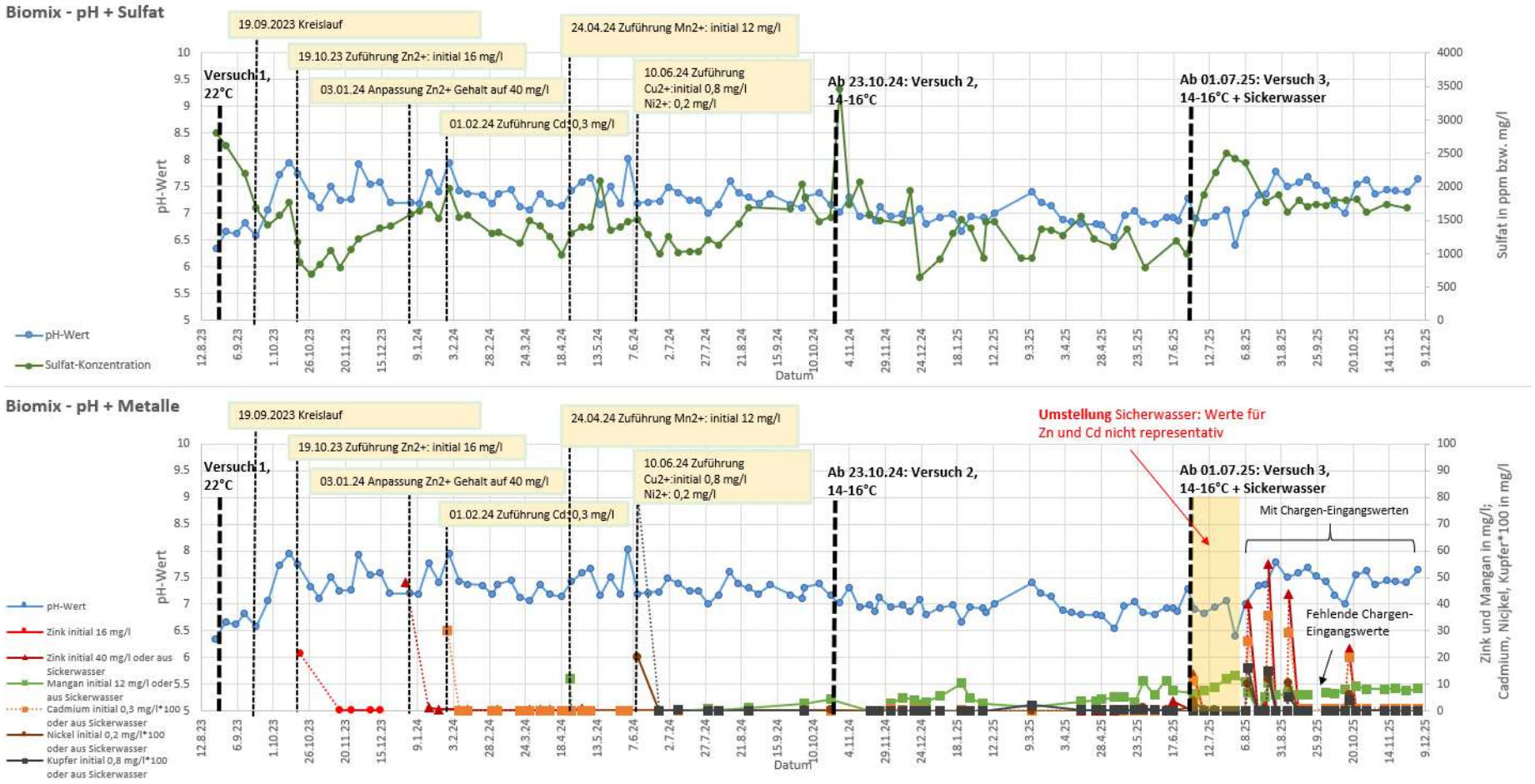

***Abb. 9**: Darstellung weiterer versuchsrelevanter Parameter für den „Biomix"-Reaktor (Säule 2). Oberes Diagramm: pH-Wert und Sulfat-Konzentration. Unteres Diagramm: pH-Wert, Metallionen-Konzentrationen von Zn, Mn, Cd, Ni und Cu. Für Cd, Ni und Cu ist zur besseren Darstellung die Konzentration mit dem Faktor 100 multipliziert. Zudem sind Versuchsabschnitt 1 (durchgeführt bei 22°C), Versuchsabschnitt 2 (durchgeführt bei 14-16°C) und der Versuchsabschnitt 3 (Umstellung auf Sickerwasser aus der Hammerberg-Halde) gekennzeichnet.*

Basierend auf **Abb. 6-9** können folgende Erkenntnisse aus dem *Versuchsabschnitt 3* (Umstellung auf Sickerwasser) abgeleitet werden:

Nach Umstellung des zugeführten Mediums auf Sickerwasser anstelle von Postgate-Medium konnte keine Sulfidbildung mehr bei der Biomix-Säule (Säule 2) beobachtet werden, während die NaAc-Säule (Säule 1) weiterhin eine deutliche Sulfidbildung zeigte. Im Vergleich zu Versuchsphase 2 hatte hier die Sulfidbildung wieder deutlich zugenommen, während bei Biomix im Vergleich zu Versuchsphase 2 eine deutliche Abnahme des nachweisbaren Sulfids messbar war.

Bei der Biomix-Säule (Säule 2) zeigte sich dagegen ein anderes Bild. Zwar stiegt auch hier der pH-Wert durch Sickerwasserumstellung leicht an (von 6,5-7 auf 7-7,8) und lag in einem ähnlichen Bereich wie bspw. in Versuchsphase 1, allerdings war in diesem System bisher auch bei niedrigeren pH-Werten um 7 noch eine Sulfidbildung messbar (siehe Versuchsabschnitt 2). Die nahezu nicht mehr vorhandene Sulfidbildung in Versuchsphase 3 ist auch nicht temperaturgetrieben (keine Veränderung der Temperatur zu Phase 2), wohl aber stark von den Medienbestandteilen des Postgate-Mediums abhängig. Die vorhandene Community scheint hier von bestimmten Salzbestandteilen sehr viel abhängiger zu sein als beispielweise die bakterielle Gemeinschaft in der NaAc-Säule. Eine Erschöpfung des Biomix-Substrates in der Säule ist ebenfalls denkbar, sollte aber mit einer stetigen Abnahme der Säulenperformance verbunden sein. Die deutliche Abnahme der Schwefelwasserstoffbildung deutet eher auf einen direkten Effekt des Medium-Wechsels auf die Sulfatreduzierer selbst hin oder aber auf Mikroorganismen, welche den Biomix für die Sulfatreduzierer bioverfügbar machen.

AP 2.6: Auswahl, Charakterisierung und Optimierung von Substraten für eine passive Wasserbehandlung

Versuch 1: Neben dem „Biomix“, welcher in AP 2.4 in Säule 2 Anwendung fand, sollten auch weitere potenzielle Substratquellen evaluiert werden. Unter anderem sollte die Nutzung von alternativem Holzhackschnitzel-Extruder-Material (HHS) untersucht werden. Dazu wurden zwei Ansätze mit Postgate B-Medium in anaeroben Serum-Flaschen vorbereitet. In Ansatz 1 wurde „Biomix“ (Zusammensetzung siehe AP 2.4) als Positivkontrolle bereitgestellt, in Ansatz 2 das o.g. neue HHS-Material. Anschließend wurden beide Flaschen mit einer Rückstellprobe von W4 NaAc (siehe AP 2.3) angeimpft. Neben den optischen Veränderungen wurde regelmäßig Probe zur Bestimmung des pH-Wertes und Redoxpotentials entnommen. Die Kulturen wurden zudem regelmäßig in neue Ansätze mit dem jeweils gleichen Material wie bei der Startkultur überimpft. Der Versuchsansatz und die optischen Veränderungen der Kulturen sind in **Abb. 10** dargestellt.

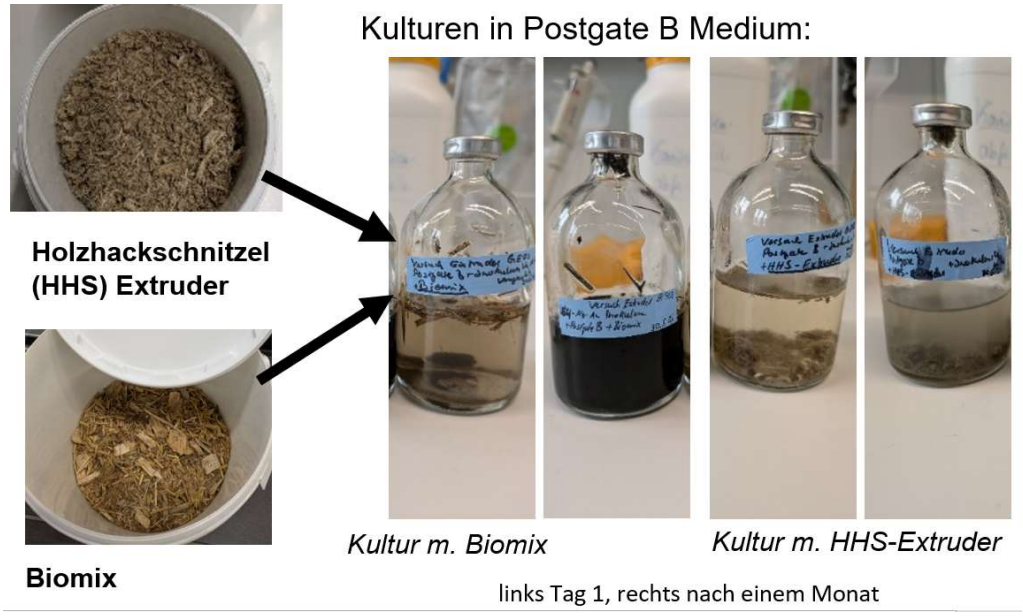

Abb. 10: *Versuchsansatz zu Untersuchung der Eignung von HHS-Extruder-Material zur Anzucht von Sulfatreduzierern im Vergleich zu „Biomix“ – Schwarzfärbung deutet auf gewünschte Schwefelwasserstoff-Bildung durch ausfallende Metallsulfide hin.*

In **Abb. 10** wird deutlich, dass die Ansätze mit „Biomix“ eine deutliche Schwarzfärbung aufwiesen, was auf die Bildung von H_2S/HS^- hindeutet (wodurch schwerlösliche Metallsulfide ausfallen). Die Ansätze mit HHS-Material zeigten keine Verfärbung, was auf keine erfolgreiche Anreicherung von Sulfatreduzierern hindeutete. Dieser Verdacht konnte auch durch den pH-Wert und das Redoxpotential bestätigt werden (siehe **Tabelle 1**). Insbesondere das Redoxpotential, welches bei den HHS-Ansätzen im positiven Bereich blieb, deutet nicht auf Bedingungen hin, welche mit einer effizienten Sulfatreduktion vereinbar sind. Zugleich konnten mikroskopisch nur wenige Zellen beim HHS-Material nachgewiesen werden.

Tabelle 1*: Übersicht über den pH-Wert und das Redoxpotential in den Ansätzen mit „Biomix“ und HHS-Extruder-Material (*danach Überimpfung in nächsten Batch)*

		„Biomix“		HHS Extruder	
	Datum	pH-Wert	Redoxpotential (mV)	pH-Wert	Redoxpotential (mV)
Batch 1	30.05.2024	Ansatz /Überimpfung			
	04.06.2024	5,76		4,67	
	21.06.2024*	6,58	170	4,31	168
	01.07.2024	7,26	-192	4,05	179
	05.08.2024	6,94	-262	4,66	262
Batch 2	21.06.2024	Überimpfung			
	01.07.2024*	5,94	136	4,05	202
	05.08.2024	7,19	-277	3,8	217
Batch 3	09.07.2024	Überimpfung			
	05.08.2024	6,57	-218	4,46	193

Der Grund für die ausbleibende Anreicherung von Sulfatreduzierern beim HHS-Material könnte in der schlechten Bioverfügbarkeit von möglichen Substratbausteinen liegen. Das HHS-Material hat einen extrem geringen Restwassergehalt und besteht offensichtlich vorwiegend aus Cellulose und

Hemicellulose. Im Gegensatz dazu ist das „Biomix“-Material feuchter und neigt verstärkt zur Schimmelbildung. Der aufwachsende Schimmel kann dabei einen erheblichen Beitrag zur Freisetzung kleinerer Substratbausteine leisten, was Sulfatreduzierern bioverfügbare Substrate liefert. Pilze sind bekannt für den Abbau von Cellulose und Hemicellulose, was anderen Organismen mögliche Substratquellen schafft.

Versuch 2: Folglich sollte in einem 2. Schritt die Bioverfügbarkeit des HHS-Extruder-Materials verbessert werden. Dazu wurde das Material – ähnlich wie beim alten „Biomix“ – mit Stroh, Travertin und in diesem Fall mit Klärschlamm versetzt. Die Zusammensetzungen beider Mischungen sind nachfolgend nochmal angegeben (Unterschiede sind unterstrichen dargestellt):

Alter „Biomix“: 45% Stroh, 22% geschreddertes und getrocknete Holz, 22% Travertin, 11% Kompost

Mischung mit HHS-Extruder: 45% Stroh, 22% HHS-Extruder, 22% Travertin, 11% Klärschlamm

Insbesondere durch den Klärschlamm sollten – wie zuvor mit dem Kompost – bioverfügbare Substrate bereitgestellt und zugleich auch weitere Organismen eingebracht werden, welche möglicherweise das HHS-Material abbauen bzw. für Sulfatreduzierer bioverfügbar machen können.

Für das Experiment wurde folgender Versuchsansatz verwendet: Zunächst wurde eine Mischung von HHS-Extruder, Stroh und Travertin angesetzt. Von dieser Mischung wurde etwas Substanz entnommen, autoklaviert und für Ansatz 5 (**Abb. 11**) verwendet. Zum restlichen Material wurde anschließend autoklavierter Klärschlamm dazugegeben. Aus dieser Mischung wurde nachfolgend erneut etwas Material entnommen und direkt autoklaviert für Ansatz 4. Das restliche Material wurde im Anschluss für eine Woche inkubiert und danach autoklaviert. Dieser Inhalt wurde für Ansatz 2 und 3 verwendet. Ansatz 1 enthielt als Positivkontrolle den bisher verwendeten alten „Biomix“. Alle Ansätze, ausgenommen Ansatz 2 (Negativkontrolle), wurden nun mit einem Inokulum versetzt und anschließend inkubiert. Eine Übersicht über alle Ansätze ist nochmal in **Abb. 11** dargestellt.

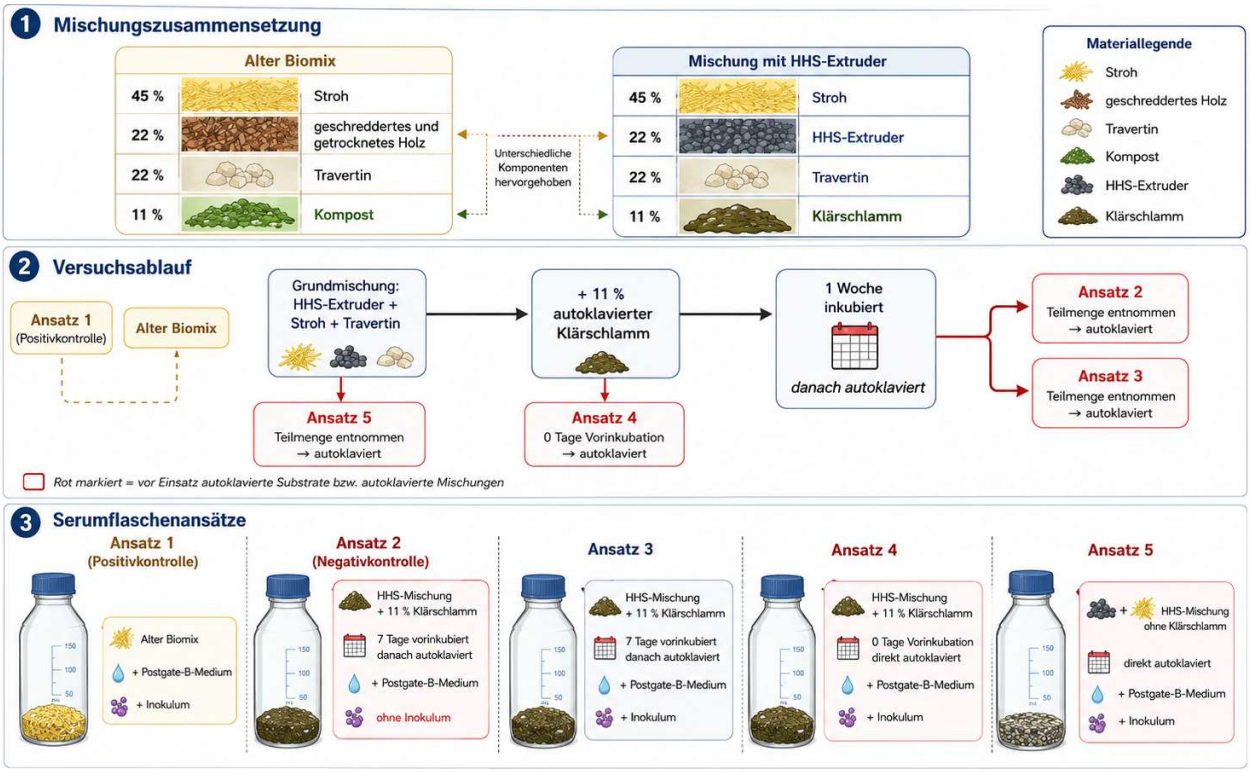

Abb. 11: Zusammensetzung der verschiedenen Ansätze zur Überprüfung der Bioverfügbarkeit des HHS-Extruder-Materials für Sulfatreduzierer.

Mit dem Versuchsaufbau sollte gezeigt werden, ob der Klärschlamm die Bioverfügbarkeit verbessern kann oder aber der Klärschlamm als Substrat allein ausreichend ist, um die Sulfatreduktion zu ermöglichen. Neben den optischen Veränderungen der Ansätze wurden auch wieder der pH-Wert und das Redoxpotential am Ende des Versuches nach drei Wochen ermittelt. Zusätzlich wurde der Sulfidgehalt (als HS^- oder H_2S) in den Ansätzen nach drei Wochen photometrisch bestimmt.

Nach ca. drei Wochen zeigte sich bei Ansatz 1 (alter „Biomix“) die deutlichste Verfärbung, gefolgt von Ansatz 3 und 4 (**Abb. 12**). Ansatz 5 zeigte eine geringere Niederschlagsbildung, Ansatz 2 die geringste Verfärbung. Die zusätzliche Bestimmung von pH-Wert, Redoxpotential und Sulfidgehalt lieferte hier allerdings erneut wichtige Informationen zur finalen Bewertung der Ansätze (**Tabelle 2**).

***Abb. 12**: Optische Veränderung der Ansätze 1-5 (von links nach rechts) nach drei Wochen.*

***Tabelle 2**: Übersicht über pH-Wert, Redoxpotential und Sulfidgehalt (als HS^- oder H_2S) in den Ansätzen 1-5 (nach 3 Wochen).*

	pH-Wert	Redoxpotential (mV)	Sulfid (ppm)		pH-Wert	Redoxpotential (mV)	Sulfid (ppm)
Ansatz 1	7,67	-353	63,6	Ansatz 4	6,86	205	0,5
Ansatz 2	6,70	294	0	Ansatz 5	6,88	-287	33,9
Ansatz 3*	6,99	254	1,5	*bei Kulturstart			0,5

In Ansatz 5 mit der sterilen HHS-Extruder-Mischung (ohne Klärschlamm) war eine schwächere Niederschlagsbildung erkennbar als bei Ansatz 1 mit unsterilem alten „Biomix“. Dennoch war das Redoxpotential in beiden Fällen mit -353 mV (Ansatz 1) und -287 mV (Ansatz 2) deutlich negativ (**Tabelle 2**) und deutet in beiden Flaschen auf geeignete Voraussetzungen zur Sulfatreduktion hin. Dies konnte auch durch den Sulfidgehalt bestätigt werden, welcher in diesen Ansätzen bei 63,9 ppm (Ansatz 1) bzw. 33,9 ppm (Ansatz 5) lag. Durch den Vergleich von Ansatz 1 und 5 kann gezeigt werden, dass die Verwendung von unsterilem „Biomix“ mit Kompost im Vergleich zur sterilen Mischung mit HHS-Extruder-Material (ohne Klärschlamm) günstiger für die Anzucht von Sulfatreduzierern ist, möglicherweise auch bedingt durch die Anwesenheit anderer Organismen, welche mehr bioverfügbare Substrate den Sulfatreduzierern zur Verfügung stellen können.

Der Ansatz in Flasche 2 verhielt sich erwartungsgemäß als Negativkontrolle (**Abb. 12, Tabelle 2**). Hier zeigte sich auch das höchste Redoxpotential mit ca. 294 mV und es konnte kein HS^-/H_2S nachgewiesen werden. Ansatz 3 und 4 zeigten beide zwar eine deutliche Verfärbung, allerdings überraschenderweise auch deutlich positive Redoxpotentiale von 254 mV (Ansatz 3) und 205 mV (Ansatz 4). Entsprechend den hohen Redoxpotentialen zeigten sich bei der Sulfidbestimmung auch nur kaum messbare Mengen an HS^-/H_2S mit unter 1,5 ppm. Trotz der Schwarzfärbung der Ansätze lagen hier folglich keine geeigneten Bedingungen zur Sulfatreduktion vor und die Verfärbung der Ansätze könnte auch ein Artefakt aus dem Klärschlamm sein. Da sich bspw. Ansatz 5 (mit guter Performance) gegenüber Ansatz 3 und 4 nur um den Klärschlamm unterschied, scheint der Klärschlamm sogar einen stark negativen Effekt auf die Anzucht von Sulfatreduzierern zu haben. Die Verwendung von Klärschlamm sollte daher vermieden werden.

Demnach bleibt der initial verwendete „Biomix“ (siehe AP 2.3 und 2.4) nach aktuellem Stand das geeignetste Substrat zur Anzucht der Zielorganismen. Geeignet könnte aber ein vergleichbarer Ansatz mit Kompost anstelle von Klärschlamm sein, bei dem die 22% geschreddertes und getrocknete Holz aus dem „Biomix“ mit 22% HHS-Extruder-Material ersetzt werden. Das Material sollte zudem vorher nicht autoklaviert werden.

AP 3: Pilotversuchskonzeption

AP 3.1: Wahl und Vorbereitung des Upscaling-Standortes

Für den Pilotversuch stellt die SAXONIA den entsprechenden Standort zur Installation der Pilotanlage zur Verfügung. Nach Abstimmung mit allen am Projekt Beteiligten befindet sich dieser am Fuße der Spülhalde Hammerberg in unmittelbarer Nähe zum Schacht H der Altentwässerung (**Abb. 13**).

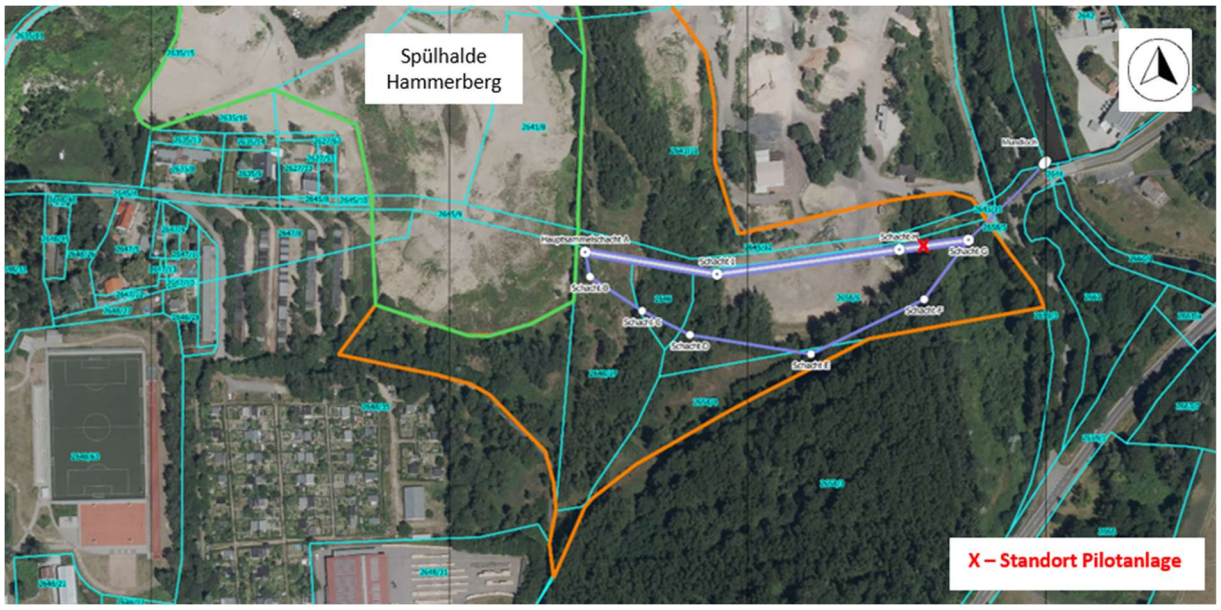

***Abb. 13**: Die Leitungen der vorhandenen Altentwässerung (helllila) am Fuße der Spülhalde Hammerberg mit dem Standort der Pilotanlage.*

Im April 2024 wurde durch die SAXONIA der Standort für die Pilotanlage hergerichtet. Dieser umfasst dabei zwei separate Aufstellflächen. Eine Aufstellfläche befindet sich unterhalb von Schacht H, etwas geschützt und folglich nicht im unmittelbaren Blickfeld von Publikumsverkehr. Diese Aufstellfläche war für die Versuchsanlage gedacht. Eine weitere Aufstellfläche liegt etwas oberhalb und dient der Aufstellung von drei Wassertanks bzw. IBCs, die gleichzeitig das Grundgerüst für die drei PV-Module zur Stromerzeugung bilden. Die **Abb. 14** zeigt die untere Aufstellfläche mit dem abgesteckten Bereich für die Pilotanlage.

***Abb. 14**: Aufstellfläche für die Pilotanlage.*

Zunächst wurde der vorhandene Bewuchs im Bereich der Zuwegung und der beiden Aufstellflächen entfernt. Beide Aufstellflächen wurden profiliert, wobei die untere Aufstellfläche terrassenartig angelegt wurde. Für einen stabilen und frostsicheren Untergrund wurde auf beiden Flächen eine Schicht Frostschutz aufgebracht und mittels Rüttelplatte verdichtet. **Abb. 15** und **16** zeigen die beiden fertigstellten Aufstellflächen.

***Abb. 15**: Fertiggestellte Aufstellfläche für die Pilotanlage.*

***Abb. 16**: Aufstellfläche für die drei IBCs bzw. Wassertanks.*

Auf diesen Flächen erfolgte nachfolgend der Aufbau der Pilotanlage durch den Projektpartner G.E.O.S.

AP 3.2: Vorbetrachtungen und Festlegungen zur Einpassung in den laufenden Betrieb der Haldensanierung

Da sich die fertig aufgestellte Pilotanlage in unmittelbarer Nähe bzw. am Fuße der aktuellen Sanierungsmaßnahme Spülhalde Hammerberg der SAXONIA befindet, wurde seitens SAXONIA im

Rahmen der jährlichen Berichtspflicht gegenüber der zuständigen oberen Bodenschutzbehörde der Landesdirektion Sachsen (LDS) über das Forschungsvorhaben MindMontan berichtet. Die Darstellung in den jeweiligen Jahresberichten wurde seitens der LDS bestätigt. Diese zeigt die modular aufgebaute Pilotanlage und die drei IBCs mit den PV-Modulen für die Stromversorgung.

***Abb. 17**: Modulare Pilotanlage MindMontan (links) und IBCs mit PV-Modulen (rechts) am 30.07.2025, S. Meißner.*

Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurde seitens des Projektpartners G.E.O.S. eingeschätzt, dass die vorliegenden Detailergebnisse für eine objektspezifische Nachbehandlung der Sickerwässer in Form eines anaeroben Wetlands ausreichend sind, jedoch noch einer weiteren spezifizierten Planung bedürfen. Durch das Forschungsvorhaben wurden die erforderlichen Grundlagen für eine solche anlagentechnische Ausführung gelegt. Gemäß LDS sollte im Rahmen weiterer objektspezifischer Untersuchungen geprüft werden, welche genehmigungsrechtlichen, technologischen und finanziellen Rahmenbedingungen für eine solche Anlage anzusetzen sind. Dadurch soll geprüft werden, ob durch ein solches anaerobes Wetland eine verhältnismäßige bzw. wirtschaftliche Abreinigung der lokalen Hauptschadstoffe (Schwermetalle Cd, und Zink sowie Halbmetall Al) des Oberflächengewässers Freiberger Mulde möglich ist. Daher wird eine Fortführung des Forschungsvorhaben seitens der LDS begrüßt.

In Abstimmung mit der LDS und den Projektbeteiligten wurde bereits das bisherige Untersuchungsprogramm des sanierungsbegleitenden Wassermonitorings der Spülhalde Hammerberg für die Einleitstelle in die Freiberger Mulde (MP 3119) um die Parameter TOC- und Sulfatgehalt erweitert.

Im Jahresverlauf 2026 ist seitens SAXONIA die Erhebung weiterer Monitoringdaten (Durchflussdaten) am Schacht G (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**3) geplant. Dabei sind Stichtagsmessungen mit MP 3119 vorgesehen. Durch diese Parallelmessungen (Schacht G / MP 3119) können die Frachtenbetrachtungen für den MP 3119 seitens SAXONIA weiter detailliert und plausibilisiert werden.

Es ist angedacht den Betrieb der Pilotanlage bis November 2026 fortzuführen. Dazu besteht seitens der Projektpartner und der Umweltfachbehörden Konsens. Der daraus erzielte Erkenntnisgewinn bezüglich der technologischen sowie finanziellen Fragestellungen sowie der zeitlichen Abläufe bildet dabei die Grundlage für die Errichtung eines anaeroben Wetlands und die mögliche Integration des Vorhabens in das weitere Sanierungsgeschehen der SAXONIA.

Für das Upscaling der Anlage zur Errichtung des anaeroben Wetlands würde sich das sogenannte ehemalige Nachklärbecken anbieten. Dieses befindet sich ebenfalls im Eigentum der SAXONIA und unterhalb des jetzigen Standortes der Pilotanlage (**Abb.18**).

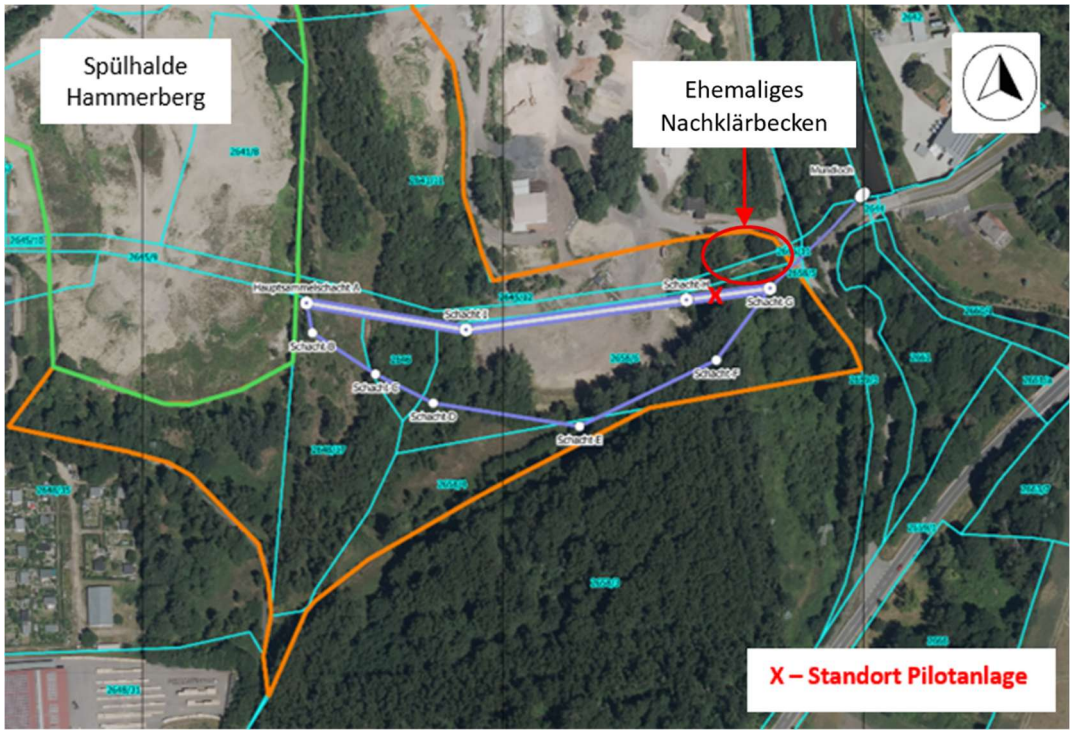

Abb. 18: *Lage des ehemaligen Nachklärbeckens.*

Aktuell wird seitens SAXONIA die abschnittsweise Ertüchtigung / Instandsetzung der bestehenden Altentwässerung (Hauptstrang) geprüft. In Abhängigkeit der weiteren Erkenntnisse und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit ist ggf. eine Sanierungserweiterung bezüglich des Sickerwassereintrages aus der Spülhalde in die Freiberger Mulde angedacht.

AP 4: Installation und Durchführung Pilotversuch

AP 4.4: Mikrobiologisch-chemisches Monitoring der passiven Pilot-Wasserbehandlungs-anlage + vergleichend: Monitoring der Labor-Säulen aus AP 2.4

4.4.1 Monitoring Zulauf- und Ablaufwasser an der Pilotanlage auf der Hammerberghalde

Im Rahmen des laufenden Betriebes der Pilotanlage auf der Hammerberg-Spülhalde wurden vom Zu- und Ablauf der Anlage Wasserproben entnommen und die Proben auf die enthaltenen Mikroorganismen hin untersucht. Dazu wurden die Wasserproben einer DNA-Isolation unterzogen, welche anschließend mittels 16S-rRNA-Amplikon-Sequenzierung analysiert wurde, um die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft abbilden zu können.

Die mikrobielle Zusammensetzung im Zulaufwasser unterschied sich deutlich vom Ablaufwasser (**Abb. 19**). Während die Gattung *Sulfuricurvum* im Zulaufwasser nur mit etwa rel. Anteil von 0,6% vertreten war, lag diese im Ablaufwasser bei 24-27%. Bei Vertretern dieser Gattung handelt es sich um fakultativ anaerobe Schwefeloxidierer (Cron et al., 2019). Auch die Gattung *Sulfurimonas* – ebenfalls mit schwefeloxidierenden Vertretern (Han & Perner, 2015) – fand sich im Ablaufwasser mit einem rel. Anteil von 19-22%, im Zulaufwasser dagegen mit <0,5%. Die Gattungen *Ferribacterium* und *Sulfurospirillum* fanden sich ebenfalls nur im Ablaufwasser.

Insgesamt waren mit Blick auf die mikrobielle Gemeinschaft keine typischen Sulfatreduzierer in den o.g. Proben nachweisbar. Da das System jedoch effizient die Schwermetalle im Haldenwasser abtrennen konnte und auch an der Anlage der Geruch von Schwefelwasserstoff oft auffallend war, kann von einer vorhandenen Sulfatreduktion dennoch plausibel ausgegangen werden. Diese war folglich aber nicht durch entsprechende Mikroorganismen im Ablaufwasser nachweisbar. Möglicherweise ist der Austrag an Sulfat-reduzierender Biomasse aus dem System auch deutlich geringer als vermutet. Im Vergleich zu den 16S-rRNA-Amplikon-Sequenzierung in AP 2.2 und 2.3 wurde hier nicht mit Probenmaterial aus den anaeroben Zonen gearbeitet, sondern lediglich Ablaufwasser aus der Anlage analysiert. Die anaeroben Sulfat-reduzierenden Bereiche der Pilotanlage wurden erst später genauer untersucht, siehe Abschnitt 4.4.2.

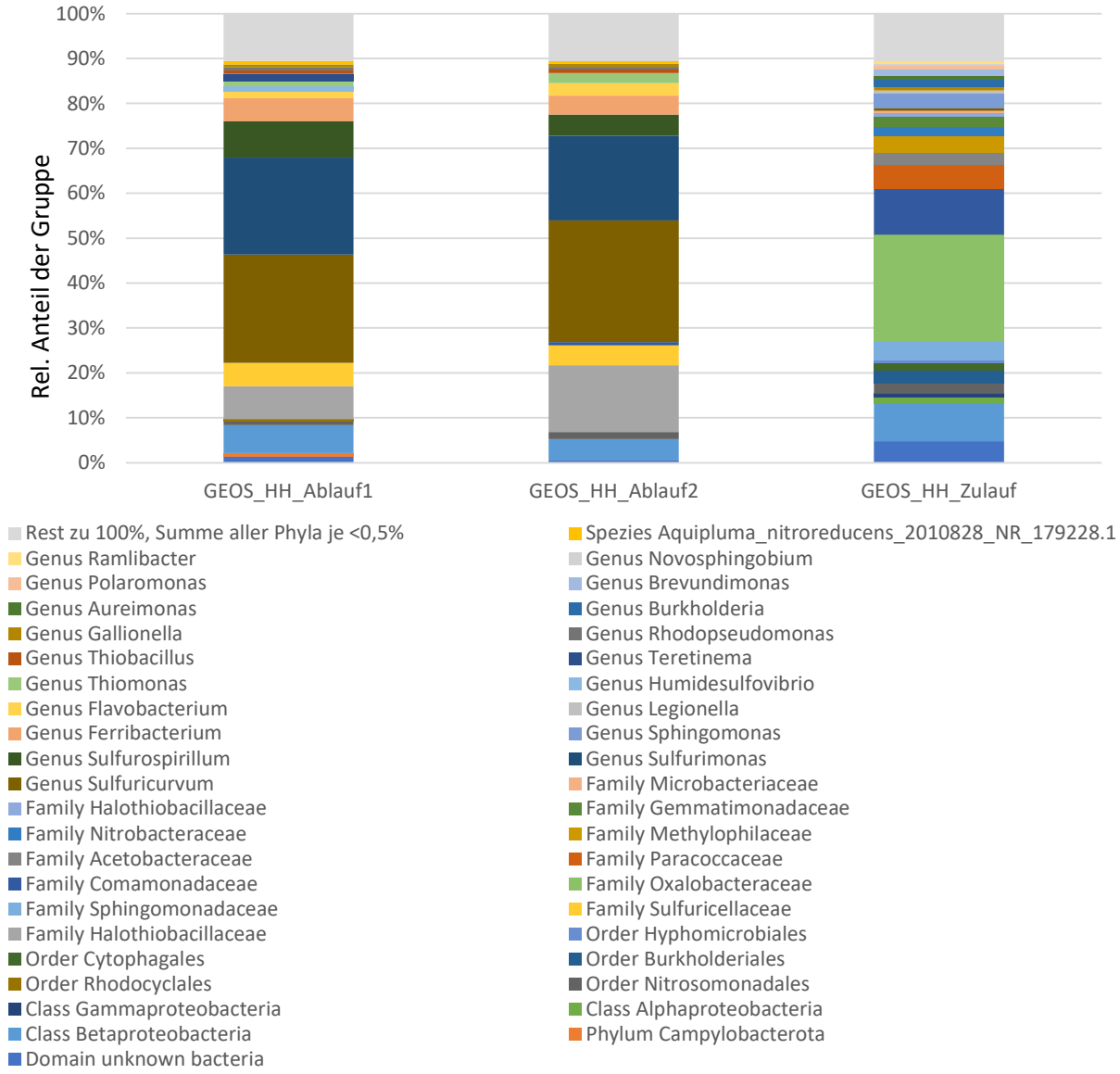

***Abb. 19**: Ergebnis der 16S-rRNA-Amplikon-Sequenzierung von Zu- und Ablaufwasser an der Pilotanlage*

4.4.2 Monitoring der anaeroben Zone der Pilotanlage auf der Hammerberghalde

Die anaerobe Zone der Pilotanlage wurde schließlich im Juni 2025 beprobt. Mit dem Probenmaterial wurde erneut eine DNA-Isolation und 16S-rRNA-Amplikon-Sequenzierung durchgeführt.

Es konnte in der Pilotanlage eine sehr diverse Gemeinschaft identifiziert werden (**Abb. 20**). Typische Sulfatreduzierer fanden sich allerdings nur in kleinen Mengen, z.B. in der Gattung *Desulfosporosinus* (Pester et al., 2010), die einen rel. Anteil von lediglich 0,9% einnimmt. Allerdings waren 24% der identifizierten Phyla einem Anteil von jeweils <0,5% zugeordnet, sodass sich auch hier noch weitere Sulfatreduzierer verbergen können. Daneben konnten in der Probe noch typische anaerobe Organismen nachgewiesen werden, wie Vertreter der Gattung *Clostridium* mit 1,7%.

4.4.3 Vergleichend zur Pilotanlage: Monitoring der mikrobiologischen Gemeinschaft in den Säulen aus AP 2.4

Das für die Säulen verwendete Inokulum, ein Mix aus S4_MeOH und S4_NaAc (siehe AP 2.3), wurde zunächst bei 30 °C kultiviert und enthielt typische sulfatreduzierende Mikroorganismen wie *Desulfovibrio* sowie anaerobe Vertreter wie *Methanosarcina* und *Clostridium* (**Abb. 20A**). Nach ca. zehn Monaten Kultivierung bei 14–16 °C waren vor der Umstellung auf Sickerwasser in beiden Säulen keine typischen Sulfatreduzierer mehr mit Anteilen >0,5 % nachweisbar, obwohl weiterhin Schwefelwasserstoff gebildet

wurde (**Abb. 20B, C**). Auch während der Umstellung änderte sich dies nicht: In der NaAc-Säule nahm die Schwefelwasserstoffbildung zu, während die Sulfatreduktion in der Biomix-Säule zusammenbrach (siehe AP 2.4).

Über den gesamten Umstellungszeitraum dominierten in beiden Säulen Vertreter der Pseudomonadaceae mit relativen Anteilen von 22–41 %. In der NaAc-Säule traten zusätzlich *Pseudomonas* sp. mit 6–14 % auf, in der Biomix-Säule *Thiobacillus* mit 16–21 %. Die Sickerwasserumstellung führte nur zu geringfügigen Verschiebungen, etwa einer Abnahme von *Pseudomonas* und Zunahme von *Acinetobacter* in der NaAc-Säule sowie einer Abnahme der Enterobacteriaceae in der Biomix-Säule. Direkte Hinweise auf die beobachteten Unterschiede in der Sulfatreduktion ergaben sich daraus nicht; vermutlich lagen relevante Sulfatreduzierer unterhalb der Nachweisgrenze von 0,5 %.

Eine Probe aus der NaAc-Säule, die trotz nachweisbarer Sulfatreduktion zunächst keine typische sulfatreduzierende Gemeinschaft zeigte, entwickelte nach längerer Kultivierung bei 30°C in Serumflaschen wieder eine Gemeinschaft, die dem ursprünglichen Inokulum ähnelte (**Abb. 20E**). Dabei wurden unter anderem *Solidesulfovibrio* mit 18 % und *Desulfovibrio* mit 16 % relativer Häufigkeit nachgewiesen. Auch *Methanosarcina* und *Clostridium* konnten wieder angereichert werden.

Dies zeigt, dass Kultivierungsbedingungen, insbesondere die Temperatur, einen starken Einfluss auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft und den Nachweis typischer Sulfatreduzierer haben. Solche Organismen können unter bestimmten Bedingungen stark unterrepräsentiert sein und bei Sequenzanalysen leicht übersehen werden, lassen sich durch veränderte Parameter jedoch wieder gezielt anreichern.

AP 4.6: Auswertung und ökologisch-ökonomische Bewertung für den Standort Hammerberg

Durch das Projekt konnten weitere Erkenntnisse bezüglich der Sohlleitungswässer (Qualität) gesammelt werden, die wiederum in die aktuellen Sanierungsmaßnahmen einfließen können. Dabei lag der Fokus lag vor allem auf der Behandlungseffizienz bzw. den Abtrennraten für die Metalle Al, Zn und Cd. Es konnte eine hohe Behandlungseffizienz durch die Pilotanlage erzielt werden (**Tabelle 3**).

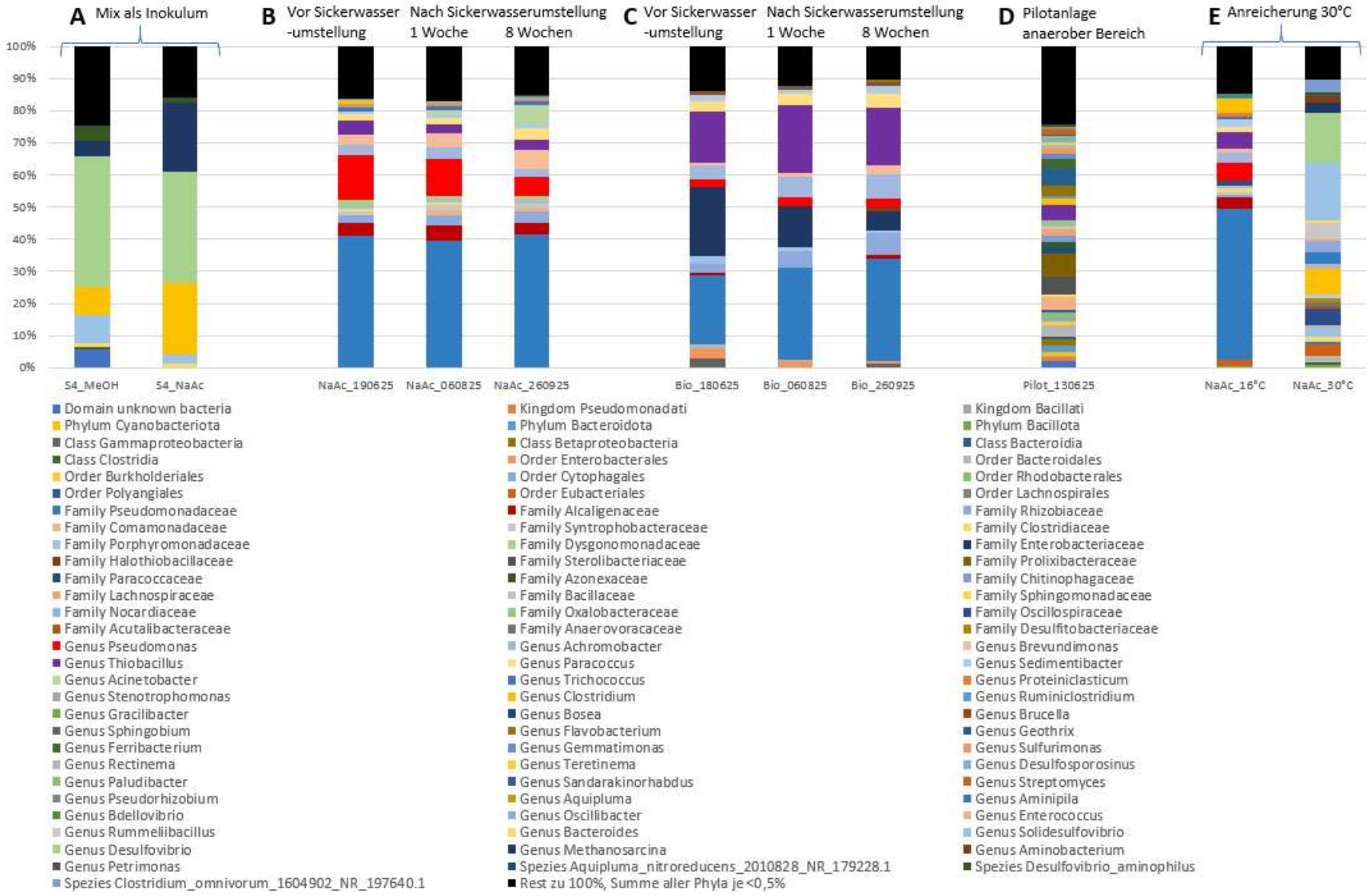

***Abb. 20**: Darstellung der mikrobiellen Zusammensetzung der SRB-Säulen im Labor aus AP 2.4 mit NaAc (**B**) und Biomix (**C**) im Lauf von Versuchsphase 3 (Sickerwasserumstellung), der Zusammensetzung des Inokulums für beide Säulen zu Beginn des Projektes (**A**) und des Einflusses der Temperatur auf die Community am Beispiel der NaAc-Säule bei Umstellung der Temperatur von 16°C auf 30°C (durchgeführt in Serumflasche, **E**). Parallel dazu ist die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft in der Pilotanlage dargestellt (**D**).*

***Tabelle 3**: Durchschnittliche Werte der Metallabtrennung (Al, Cd und Zn) in der Pilotanlage im Zu- und Ablauf für die Jahre 2024 und 2025 im Vergleich.*

Element	Jahr	Zulauf Schacht H	Ablauf Pflanzbecken	Behandlungseffizienz
Al	2024	10,49 mg/l	0,25 mg/l	94 %
	2025	5,84	0,12	96,2%
Zn	2024	45,60	0,86	98,5 %
	2025	30,19	1,78	93,6 %
Cd	2024	0,34	0,005	98,5 %
	2025	0,23	0,003	98,3 %

Vor allem für Zink konnten mit der Pilotanlage sehr hohe volumetrische Abtrennraten erreicht werden, sodass eine sehr hohe Anreicherung von Zn im Biomix zu verzeichnen war. Für Cd konnten ähnliche Ergebnisse erzielt werden.

Die Testphase der Pilotanlage zeigt, dass durch ein mehrstufiges passives Wasserbehandlungsverfahren die Abtrennung der im Sickerwasser der Spülhalde Hammerberg enthaltenen Metalle wie Al, Cd und Zn möglich ist. Es konnten durch die Pilotanlage in der „frostfreien" Jahreszeit wichtige Erfahrungen im Anlagenbetrieb gewonnen werden. Zu klären wäre noch die Entsorgung (Verwertung oder Beseitigung) des mit Metallen angereicherten Trägermaterials (Biomix).

AP 5: Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit

AP 5.3-5.5: Organisation projektbezogener öffentlicher Informations- und Diskussionsveranstaltungen

Weiterhin wurden die Pilotanlage sowie Ergebnisse des Vorhabens öffentlichkeitswirksam aufbereitet und der Öffentlichkeit zur Stärkung der Montanregion Erzgebirge als Weltkulturerbe bereitgestellt. Dabei unterstütze Saxonia und die TUBAF den Partner Förderverein Montanregion Erzgebirge u.a. bei Exkursionen für Schüler und den wissenschaftlichen Nachwuchs. So erfolgte am 08.09.2025 eine Besichtigung der Pilotanlage mit Schülern einer 10. Klasse des Gymnasiums Marienberg (**Abb. 21**). Zudem erfolgte am 29.08.2025 im Rahmen der Konferenz ReMining 2025 eine Exkursion zur Anlage (**Abb. 22**). Weiterhin wurden am 17.09.2025 Ergebnisse aus dem Projekt sowie die Anlage auch im Rahmen der MindMontan-Abschlussveranstaltung der Presse und Vertretern aus der Politik vorgestellt (**Abb. 23**). Ferner erfolgte auch die Bereitstellung von Exkursionsmaterial für den Projektpartner Förderverein Montanregion Erzgebirge.

***Abb. 21**: Fotos vom 08.09.2025 – Exkursion mit einer Schulklasse vom Gymnasium Marienberg*

***Abb. 22**: Fotos vom 29.08.2025 – Exkursion im Rahmen der ReMining-Konferenz 2025*

***Abb. 23**: Fotos vom 17.09.2025 – Abschlussveranstaltung MindMontan*

2 Zweckmäßigkeit der Kosten

Die geleisteten Arbeiten waren zur Erreichung der Vorhabenziele erforderlich und angemessen. Im Mittelpunkt standen die mikrobiologische Charakterisierung, die Gewinnung und Optimierung sulfatreduzierender Anreicherungskulturen, Labor- und Säulenversuche, die Begleitung der Pilotanlagenplanung (Unterauftrag Saxonia) sowie das Monitoring der biologischen Behandlungsstufe. Die Arbeiten bildeten die Grundlage für die Bewertung einer möglichen objektspezifischen Nachbehandlung der Sickerwässer am Standort Hammerberg und für die Übertragung der Ergebnisse auf vergleichbare bergbaubeeinflusste Standorte.

3 Zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die im Vorhaben durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Projektziele notwendig und in ihrem Umfang angemessen. Die Entwicklung und Bewertung einer biologischen Behandlungsstufe für bergbaubeeinflusste Sickerwässer erforderte zunächst die standortspezifische Abstimmung mit den zuständigen Behörden, die Zusammenstellung und Bewertung vorhandener Monitoringdaten sowie die Gewinnung und mikrobiologische Charakterisierung geeigneter Proben und Anreicherungskulturen. Diese Arbeitsschritte bildeten die fachliche Grundlage, um die Eignung sulfatreduzierender Mikroorganismen für die Metallfällung unter den Bedingungen des Standortes Hammerberg belastbar beurteilen zu können.

Die Labor- und Säulenversuche waren erforderlich, da die Leistungsfähigkeit der biologischen Sulfatreduktion stark von Betriebsparametern wie Substratangebot, Temperatur, Trägermaterial und realer Sickerwasserzusammensetzung abhängt. Die Untersuchungen bei unterschiedlichen Temperaturen, mit Natriumacetat bzw. Biomix sowie während der schrittweisen Umstellung auf Sickerwasser ermöglichten eine differenzierte Bewertung der Prozessstabilität und der Grenzen der biologischen Metallabtrennung. Auch die ergänzenden molekularbiologischen Analysen waren angemessen, da typische Sulfatreduzierer unter bestimmten Kultivierungsbedingungen nur in sehr geringen relativen Anteilen nachweisbar sein können und daher ohne begleitende Anreicherungs- und Sequenzierungsarbeiten leicht unterschätzt würden.

Die Begleitung der Pilotanlagenplanung und des Pilotbetriebs sowie das mikrobiologisch-chemische Monitoring waren dienten der Verknüpfung der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse mit den realen Betriebsbedingungen am Standort. Der zeitliche und personelle Aufwand war aufgrund der langen Laufzeiten anaerober Systeme, der regelmäßigen Probenahmen und Analytik sowie der Abstimmungen mit Projektpartnern und Behörden sachgerecht. Die Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit war ebenfalls angemessen, da das Vorhaben neben der technologischen Entwicklung auch die Stärkung der Montanregion Erzgebirge und die Akzeptanz innovativer Sanierungsansätze zum Ziel hatte. Insgesamt standen Umfang und Tiefe der Arbeiten in einem angemessenen Verhältnis zu den wissenschaftlich-technischen Fragestellungen und zum angestrebten Transfer der Ergebnisse.

4 Verwertung

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse können unmittelbar für die weitere wissenschaftliche und technische Bewertung passiver bzw. semi-passiver Wasserbehandlungsverfahren genutzt werden. Für die TUBAF ergeben sich insbesondere Verwertungsmöglichkeiten in der Weiterentwicklung mikrobiologisch gestützter Verfahren zur Behandlung bergbaubeeinflusster Wässer, in der Auslegung geeigneter Anreicherungs- und Betriebsstrategien für sulfatreduzierende Gemeinschaften sowie in der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf Forschung, Lehre und zukünftige Verbundprojekte. Die Ergebnisse zeigen, welche Bedeutung Temperatur, Substratbereitstellung und reale Wasserzusammensetzung für die Stabilität der Sulfatreduktion und damit für die Metallabtrennung besitzen.

Technisch verwertbar sind vor allem die Erkenntnisse aus den Säulenversuchen und dem begleitenden Monitoring der Pilotanlage. Sie liefern Hinweise zur Auswahl geeigneter Trägermaterialien und Kohlenstoffquellen, zur Prozessüberwachung sowie zu Grenzen der Behandlung einzelner Elemente, insbesondere bei wechselnden Betriebsbedingungen. Damit bilden die Arbeiten eine Grundlage für die Optimierung künftiger biologischer Behandlungsstufen am Standort Hammerberg und für die Prüfung vergleichbarer Anwendungen an weiteren altbergbaulich beeinflussten Standorten. Die gewonnenen

Daten können zudem von den Projektpartnern und eingebundenen Behörden für die Bewertung möglicher Nachbehandlungs- und Sanierungsoptionen herangezogen werden.

Eine wirtschaftliche Verwertung durch die TUBAF ist nicht in Form einer unmittelbaren Produktvermarktung vorgesehen, sondern vor allem über wissenschaftlich-technischen Transfer, Anschlussforschung und die Unterstützung anwendungsnaher Technologieentwicklungen. Schutzrechtsanmeldungen oder Erfindungen sind aus den bisherigen Arbeiten nicht hervorgegangen. Die Verbreitung der Ergebnisse erfolgte und erfolgt über Fachbeiträge, Projektveranstaltungen, Exkursionen und Öffentlichkeitsformate. Dadurch werden sowohl die fachliche Anschlussfähigkeit als auch die Sichtbarkeit des Vorhabens innerhalb des rECOmine-Verbundes, der Montanregion Erzgebirge und gegenüber potenziellen Anwendern gestärkt.

5 Veröffentlichungen und Ergebnisverbreitung

Die Ergebnisse wurden im Projektverlauf in Fach- und Öffentlichkeitsformaten verbreitet.

- Janneck, E.; Martin, M.; Stevens, Ch.; Hedrich, S. (2024): Development of passive mine water treatment schemes with the application of microbial reduction in vertical flow bioreactor. 6th International Scientific Conference on Biotechnology and Metals, Stará Lesná, High Tatras, Slovakia, pp. 124-129.
- Hedrich, S., Janneck, E., Oelschlägel, M., Oßmann, D. Pinka, J. Martin, M. (2025) MINDMONTAN- Innovative Passive Mine Water Treatment Using Vertical Flow Bioreactors. ReMinning conference, 27.-29.08.2025, Freiberg
- Janneck, E.; Hedrich, S. (2025): MindMontan: Innovative Wasseraufbereitung für Sickerwässer unter Einsatz chemisch-biologischer Technologien. 22. Sächsische Gewässertage, 04.12.2025.
- Janneck, E.; Mogdahhan, S.; Oßmann, D.; Oelschlägel, M.; Martin, M.; Pinka, J.; Hedrich, S. (2025): Beitrag in ACAMONTA, Zeitschrift für Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg, 32. Jahrgang, S. 14-18.
- MindMontan - Innovative Technologien für umweltfreundlichen Bergbau, regionale Entwicklung (TUBAF- Andreas Hiekel- Projektvideo/Öffentlichkeitsarbeit). https://www.youtube.com/watch?v=LBV5C3wTcQk

Exkursionen und Veranstaltungen:

- Besuch der Pilotanlage mit einer 10. Klasse des Gymnasiums Marienberg (08.09.2025)
- Exkursion im Rahmen der ReMining-Konferenz 2025 (29.08.2025)
- Workshop für Nachwuchswissenschaftler „Nachhaltige Biotechnologien zum Umweltschutz/ Biotechnologies in environmental management", 15.05.2025, TUBAF
- Abschlussveranstaltung MindMontan mit Presse- und Politikvertretung, TUBAF (17.09.2025)

6 Literaturverzeichnis

Cline, J. D. (1969) Spectrophotometric determination of hydrogen sulfide in natural waters. Limnol. Oceanogr. 14: 454–458. doi: 10.4319/lo.1969.14.3.0454

Cron, B., P. Henri, C. S. Chan, J. L. Macalady, J. Cosmidis (2019) Elemental sulfur formation by Sulfuricurvum kujiense is mediated by extracellular organic compounds. Front. Microbiol. 27: 10:2710.doi: 10.3389/fmicb.2019.02710

Dürre, P. (2014). Physiology and sporulation in Clostridium. Microbiol. Spectr. 2: 10.1128/microbiolspec.tbs-0010-2012.doi: https://doi.org/10.1128/microbiolspec.tbs-0010-2012

Giangeri, G., P. Tsapekos, M. Gaspari, et al. (2024) A bioaugmentation strategy to recover methane production under sulfate-stressed conditions: Highlights on targeted sulfate-reducing bacteria and DIET-related species. Applied Energy 362: 122940.doi: https://doi.org/ 10.1016/j.apenergy.2024.122940

Han, Y., M. Perner (2015) The globally widespread genus Sulfurimonas: versatile energy metabolisms and adaptations to redox clines. Front. Microbiol. 6: 10.3389.doi: https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00989

Karnachuk, O.V., I. I. Rusanov, I. A. Panova, et al. (2021) Microbial sulfate reduction by Desulfovibrio is an important source of hydrogen sulfide from a large swine finishing facility. Sci Rep. 21 - 11(1):10720. doi: https://doi.org/10.1038/s41598-021-90256-w

Pester, M., N. Bittner, P. Deevong et al. (2010) A 'rare biosphere' microorganism contributes to sulfate reduction in a peatland. ISME J. 4: 1591–1602. doi: https://doi.org/10.1038/ismej.2010.75

Watanabe, M., M. Fukui, J. Kuever (2020). Desulfallaceae fam. nov. In: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria (eds M.E. Trujillo, S. Dedysh, P. DeVos, B. Hedlund, P. Kämpfer, F.A. Rainey and W.B. Whitman). doi: https://doi.org/10.1002/9781118960608.fbm00343

Yu, L., D. He, L. Yang, C. Rensing, R. J. Zeng, S. Zhou (2022) Anaerobic methane oxidation coupled to ferrihydrite reduction by Methanosarcina barkeri. Sci. Tot. Environ. 844: 157235. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157235