GEFÖRDERT VOM
Wandel durch Innovation in der Region
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Bündnis	WIR! - rECOmine
Verbundprojekt:	RekuMat – Entwicklung von spezifischem Rekultivierungsmaterial für qualifizierte Abdeckung von Bergbauhalden und Altlasten
Teilprojekt:	TP 3: Pilot-Untersuchungen mit neu entwickelten Rekultivierungs-materialien im Freilandversuch auf Bergbauhalden des Freiberger Raumes
Förderkennzeichen:	03WIR1907C
Projektlaufzeit:	01.08.2021 bis 31.07.2024
Berichtszeitraum:	01.08.2021 bis 31.07.2024
Berichtspflichtiger:	SAXONIA Standortentwicklungs- und –verwaltungsgesellschaft mbH Halsbrücker Straße 34 09599 Freiberg
Projektleitung:	Dipl.-Geoökologin Sabine Meißner
Berichtsteile:	Teil I: Kurzbericht Teil II: ausführlicher Sachbericht Teil III: Erfolgskontrollbericht Urheberrechtserklärung

Teil I: Kurzbericht

Zielstellung

Bei der Erschließung neuer Rohstoffquellen, wie Bergbauhalden oder Altstandorte, kommt es zu einem Eingriff in das Landschaftsbild durch das Öffnen teilweise begrünter Standorte. Nach der Rohstoffgewinnung und der damit verbundenen Umlagerung des Materials ist eine schnelle und kostengünstige Renaturierung und Einbindung dieser Flächen in das Landschaftsbild notwendig. Genau hier setzt das Forschungsprojekt RekuMat mit der Entwicklung von kostengünstigen und umweltverträglichen Rekultivierungsmaterialien an.

Gesamtziel des Vorhabens mit den vier Partnern Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD) und Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (IHD) sowie im Unterauftrag Umweltconsulting Hagedorn war die Entwicklung spezifischer Rekultivierungsmaterialien (RekuMat) für die qualifizierte Abdeckung von Bergbauhalden und Altlasten.

Übergreifendes wissenschaftlich-technisches Arbeitsziel in RekuMat war die Schaffung einer an den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft orientierten Nutzungsalternative für qualitativ hochwertige Reststoffe, wie kommunale Klärschlämme (KS) sowie abgetragene Pilzsubstrate (APS) aus der Pilzproduktion, in Form von Zuschlagstoffen sowie die Verwendung der lokal verfügbaren Halden- und Bodenmaterialien als Rekultivierungsmaterial (RM) für Altablagerungen und andere Altlasten.

Ziel der SAXONIA war es den Einsatz alternativer Rekultivierungsmaterialien auf ausgewählten Haldenflächen im Freiberger Raum zu untersuchen. Dabei galt es regional verfügbare Materialien zu nutzen.

Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurden die stofflichen Anforderungen sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen von Materialien für den Einsatz als Rekultivierungsmaterial auf ehemaligen Bergbauhalden erfasst. Diese umfassten zum einem die analytischen Parameter und zum anderen die bodenmechanischen / geotechnischen Kriterien. Des Weiteren erfolgten mehrere Begehungen auf ausgewählten Haldenflächen im Freiberger Raum. Auf der Grundlage dieser Vor-Ort-Begehungen wurden die standorttypischen Gegebenheiten erfasst. Außerdem wurde erste Überlegungen zu möglichen Herstellungs- und Einbautechniken für den späteren Freilandversuch zusammengetragen. Mit den im Rahmen der Begehungen gewonnenen Materialproben konnten durch die Verbundpartner erste Pflanzenversuche zur Toxizität durchgeführt werden.

Für die Charakterisierung und Auswahl von Klärschlammprodukten wurde eine detaillierte SWOT-Analyse (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) des Projektpartners VKD durchgeführt. Die Untersuchung basierte auf vier spezifischen Produkten: HTC-Kohle, Klärschlamm-Asche, Klärschlamm-Kompost und getrockneter Klärschlamm. Die gewonnenen Proben wurden an die Verbundpartner zur weiteren Analyse und Charakterisierung übergeben. Für die Laborversuche wurden Champignons und Kräuterseitlinge als Referenzpilze ausgewählt und entsprechende Stämme beschafft. Im technischen Maßstab wurden Kompostierversuche unter Berücksichtigung definierter Parameter durchgeführt, um ein umfassendes Verständnis der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der erzeugten Substrate zu erlangen. Durch den Projektpartner IHD wurden 26 potenzielle Rezepturen entwickelt, von denen nach eingehender labortechnischer Begleitung und Bewertung in pilz- und pflanzenbasierten Bioassays drei Rezepturen für die weitere Untersuchung in Realumgebung ausgewählt wurden.

Da sich die ursprünglich in Betracht gezogenen Versuchsstandorte als ungeeignet erwiesen, wurde der Freilandversuch im September 2023 auf der Spülhalde Hammerberg in Freiberg angelegt. Dabei wurden vom Projektpartner VKD die entsprechenden Substratmischungen zur Verfügung gestellt. Nach Homogenisierung der abgesteckten Fläche wurden die vier

ausgewählten Substratmischungen mittels Forstfräse in die oberen 20 bis 30 cm der Versuchsparzellen eingearbeitet und abschließend querlaufend zwei Saatgutmischungen aufgebracht. Ab Oktober 2023 erfolgte die analytische und deskriptive Begleitung der Freilandfläche durch die Verbundpartner.

Ergebnisse

Das Ergebnis der umfassenden rechtlichen Analyse bildet eine detaillierte Anforderungsmatrix, die als zentrales Instrument zur Sicherstellung der gesetzeskonformen Übertragbarkeit der Projektergebnisse für die praktische Verwertung dient.

Auf der Grundlage der erzielten Laborergebnisse wurden verschiedene Rezepturen für die Rekultivierungsmaterialien mit den Zuschlagstoffen abgetragene Pilzsubstrate (APS) aus der Speisepilzproduktion (Champignon und Käuterseitling) sowie Klärschlammkomposte und hergestellt. In den Laborversuchen konnte festgestellt, dass verschiedene APS, unabhängig von der Pilzart, besonders gut in der Lage sind, Schwermetalle: Pb, Fe, Hg und Zn zu absorbieren. Nach Wachstumsversuchen mit Referenzpilzen und -pflanzen wurden von insgesamt 26 Rezepturen drei Rezepturen für die Freilandversuche ausgewählt und im September 2023 in einem Parzellenversuch ausgebracht. Nach nur 1,5 Monaten war bereits auf den Parzellen mit den eingearbeiteten Substratmischungen eine dünne Grasnarbe zu erkennen. Im Frühjahr 2024 entwickelte sich auf den mit den RekuMat-Substraten ertüchtigten Parzellen innerhalb von drei Monaten eine geschlossene Vegetationsdecke. Nach nur kürzester Zeit konnten auf diesen Parzellen eine erhöhte Anzahl an Regenwürmern und Kleinstlebewesen festgestellt werden. Auf den Vergleichs- bzw. Kontrollparzellen (Parzellen ohne Substratertüchtigung, Parzelle mit Grünschnittkompost) konnte dieser Entwicklungsfortschritt der Pflanzen auch im Laufe der Vegetationsperiode nicht festgestellt werden. Auch die mikrobielle Diversität war trotz des neutralen pH-Wertes gering.

Zusammenfassung

In einem intensiven, interdisziplinären Prozess wurde in enger Kooperation mit den Projektpartnern eine Anforderungsmatrix erstellt, deren Zielwerte sorgfältig ausgearbeitet und präzise definiert wurden. Die erstellte Anforderungsmatrix leistet einen signifikanten Beitrag zur Systematisierung und Operationalisierung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Rekultivierungsmaterialien

Es wurden drei standortspezifische Rekultivierungsmaterialien für die Freiberger Bergbauhalden entwickelt. Als Zuschlagstoffe kamen dabei abgetragene Pilzsubstrate (APS) von Champignons und Kräutersaitlingen sowie Klärschlamm-und Grünschnittkompost zum Einsatz. Die Grundmatrix bildete freibergtypisches Bodenmaterial. Als Versuchsfläche diente eine Teilfläche der Spülhalde Hammerberg in Freiberg.

Um durchgehend hohe Produktqualitäten sicherzustellen, war die Entwicklung und Erprobung spezifischer Rezepturen (Mischungsverhältnisse), eine sorgfältige Kompostierung zur Anpassung chemischer, physikalischer und biologischer Parameter sowie eine gründliche Homogenisierung und angepasste Pflanzenauswahl erforderlich.

Auf der Grundlage der analysierten Materialproben konnte festgestellt werde, dass frische APS nützliche Mikroorganismen enthalten, die das Pflanzenwachstum fördern, indem die Mikroorganismen organische Nährstoffe aus dem Substrat und Boden abbauen und dadurch deren Pflanzenverfügbarkeit erhöht wird, was das allgemeine Pflanzenwachstum verbessert. Das Myzel des Kräuterseitlings kann Arsen und Schwermetalle, wie Eisen, Blei und Zink absorbieren und tolerieren, was das Pflanzenwachstum auch auf höher belasteten Böden ermöglicht.

Zukünftig können die neu entwickelten Rekultivierungsmaterialien somit nicht nur aufgrund ihrer wertvollen Inhaltsstoffe als Nahrungsquelle für Bodenorganismen fungieren, sondern auch aktiv zur Bodensanierung durch ihr mykoremediatorisches Potenzial beitragen.

GEFÖRDERT VOM

Wandel durch Innovation in der Region

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Bündnis	WIR! - rECOmine
Verbundprojekt:	RekuMat – Entwicklung von spezifischem Rekultivierungsmaterial für qualifizierte Abdeckung von Bergbauhalden und Altlasten
Teilprojekt:	TP 3: Pilot-Untersuchungen mit neu entwickelten Rekultivierungs-materialien im Freilandversuch auf Bergbauhalden des Freiberger Raumes
Förderkennzeichen:	03WIR1907C
Projektlaufzeit:	01.08.2021 bis 31.07.2024
Berichtszeitraum:	01.08.2021 bis 31.07.2024
Berichtspflichtiger:	SAXONIA Standortentwicklungs- und –verwaltungsgesellschaft mbH Halsbrücker Straße 34 09599 Freiberg
Projektleitung:	Dipl.-Geoökologin Sabine Meißner
Berichtsteile:	Teil I: Kurzbericht Teil II: ausführlicher Sachbericht Teil III: Erfolgskontrollbericht Urheberrechtserklärung

Teil II: ausführlicher Sachbericht

1. Erzielte Ergebnisse

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse des Verbundvorhabens »RekuMat–Entwicklung von spezifischem Rekultivierungsmaterial für qualifizierte Abdeckung von Bergbauhalden und Altlasten« bearbeitet durch die Verbundpartner Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (VKD), SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungs-gesellschaft mbH (SAXONIA) und Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD) entlang der Hauptarbeitspakete (HAP) zusammengefasst.

Dieser Bericht fokussiert sich auf die Arbeiten und Ergebnisse, die maßgeblich durch SAXONIA erbracht wurden und bildet kurz ab, wozu diese im Gesamtkontext des Vorhabens beigetragen haben.

HAP1: Erfassung IST-Zustand Haldenmaterialien sowie Definition der Zielvorgabe

In einem ersten Schritt wurden rechtliche und stoffliche Anforderungen an die Materialien von Rekultivierungsschichten für Bergbauhalden durch die beiden Projektpartner VKD und SAXONIA erfasst und zusammengestellt.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine detaillierte und tiefgreifende Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Rekultivierungsmaterialien auf Bergbauhalden durchgeführt. Diese umfassten zum einem die analytischen Parameter und zum anderen die bodenmechanischen / geotechnischen Kriterien. Da die geplanten Freilandversuche auf ehemaligen Haldenflächen der SAXONIA angelegt werden sollten, wurden auch die konkreten Standortbedingungen und die behördlich vorgegebenen Randbedingungen berücksichtigt. Gemäß den Ausführungen durch die SAXONIA bilden das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) die rechtliche Grundlage für die Sicherung und Sanierung von ehemaligen Bergbauhalden bzw. Altablagerungen. Dies trifft auch auf den Großteil der Liegenschaften der SAXONIA zu, die folglich dem Bodenschutzrecht unterliegen. Gemäß Ausführungen der zuständigen oberen Bodenschutzbehörde, der Landesdirektion Sachsen, stellte zudem bisher die LAGA TR Boden, Stand 2004, ein unverzichtbares leitendes Regelwerk im bodenschutzrechtlichen Vollzug dar. Die VKD legte dabei den Schwerpunkt auf die BBodSchV. Es handelt sich bei dieser Verordnung um ein zentrales Regelwerk im Bereich des Bodenschutzes und der Altlastensanierung. Sie liefert nicht nur präzise Definitionen für Begrifflichkeiten wie Altlasten, altlastenverdächtige Flächen, schädliche Bodenveränderungen und Verdachtsflächen, sondern regelt auch wichtige Aspekte wie Vorsorgepflichten, Gefahrenabwehr, Gefährdungsabschätzung und das Vorgehen bei der Altlastensanierung.

Von besonderer Relevanz für das vorliegende Vorhaben erwies sich §12 der BBodSchV, der spezifische Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien in und auf den Boden festlegt. Um die praktische Umsetzung dieser Vorschriften zu erleichtern, wurde zusätzlich die Vollzugshilfe zu §12 BBodSchV herangezogen. Dieses Dokument bietet eine fachliche Konkretisierung der gesetzlichen Anforderungen und erläutert wichtige Schnittstellen zu anderen Rechtsbereichen. Es dient als Praxishilfe und gibt detaillierte Vorschriften für das Einbringen von Bodenmaterial. Dabei werden verschiedene Aspekte berücksichtigt, wie beispielsweise die erforderliche Mächtigkeit der durchwurzelbaren Bodenschicht in Abhängigkeit von der geplanten Folgenutzung und der vorgesehenen Vegetationsart, die Verwendung von Bodenmaterial oder Baggergut bei der Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht unter Berücksichtigung von Nährstoffaspekten, sowie der spezifische Nährstoff- und Düngebedarf der jeweiligen Folgenutzungen.

In enger Abstimmung mit den Projektpartnern erfolgte eine sorgfältige Aufteilung und Analyse der relevanten Gesetzestexte, wobei die jeweiligen Spezifikationen und Expertisen der Partner berücksichtigt wurden. Seitens der SAXONIA wurden auch die Anforderungen für die

Sicherung und Sanierung von Deponien betrachtet und zusammengetragen, da Teilflächen der SAXONIA auch dem Geltungsbereich des Abfallrechts unterliegen und folglich die Vorgaben der Deponieverordnung (DepV) anzuwenden sind. Die Deponieverordnung gilt für die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachsorge von Deponien. Die fachliche Grundlage bilden die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandrads (BQS). Anhand dieser BQS ist der Eignungsnachweis von Materialien, Komponenten oder Systemen als Bestandteil des Abdichtungssystems von Deponien zu erbringen.

Ein weiteres Regelwerk, das sich von großer Bedeutung für das Projekt erwies, ist die Ersatzbaustoffverordnung, die eine Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung darstellt und am 01.08.2023 in Kraft trat. Dies wurde bereits in den Betrachtungen berücksichtigt, um eine zukunftsorientierte und nachhaltige Planung zu gewährleisten.

Um sicherzustellen, dass die rechtlichen Anforderungen stets auf dem aktuellen Stand bleiben, wurde das Arbeitspaket kontinuierlich überprüft und bei Bedarf angepasst. Dies ermöglichte eine flexible Reaktion auf etwaige Änderungen in den relevanten Regelwerken und gewährleistete die fortlaufende Rechtskonformität des Projekts.

Im Ergebnis dieser umfassenden rechtlichen Analyse wurde eine detaillierte Anforderungsmatrix entwickelt. Diese Matrix dient als zentrales Instrument zur Sicherstellung der gesetzeskonformen Übertragbarkeit der Projektergebnisse für die praktische Verwertung. Sie bietet einen strukturierten Überblick über alle relevanten rechtlichen Vorgaben und ermöglicht es den Projektbeteiligten, die komplexen Anforderungen effizient zu navigieren und umzusetzen. Die erarbeitete Anforderungsmatrix stellt somit nicht nur ein wichtiges Projektergebnis dar, sondern bildet auch die Grundlage für die weitere Entwicklung und Optimierung von Rekultivierungsstrategien für Bergbauhalden. Sie trägt wesentlich dazu bei, die Ziele des Projekts in Einklang mit den geltenden rechtlichen Bestimmungen zu bringen und eine nachhaltige, umweltverträgliche Lösung für die Rekultivierung von ehemaligen Bergbauflächen zu entwickeln.

In Abstimmung mit dem Fraunhofer IKTS konnten im Rahmen dieses Teilarbeitspaketes 1.2 „Erfassung und Bewertung IST-Zustand Materialien und Einbaubedingungen“ die zu diesem Zeitpunkt relevanten Materialströme, Liegenschaften und Vorrausetzungen zum Einbau gesichtet werden. Um neben der Einschätzung anhand von Unterlagen auch ein persönliches Bild von potenziellen Liegenschaften der SAXONIA zu erhalten, erfolgte Anfang Oktober 2021 eine gemeinsame die Begehung der Projektpartner von ausgewählten Haldenflächen im Freiberger Raum. Dies umfasste das obere Plateau der gesicherten Schlackenhalde “Hohe Esse” sowie die Spülhalde Münzbachtal in Halsbrücke und die Spülhalden Davidschacht sowie Hammerberg in Freiberg (Abbildung 1).

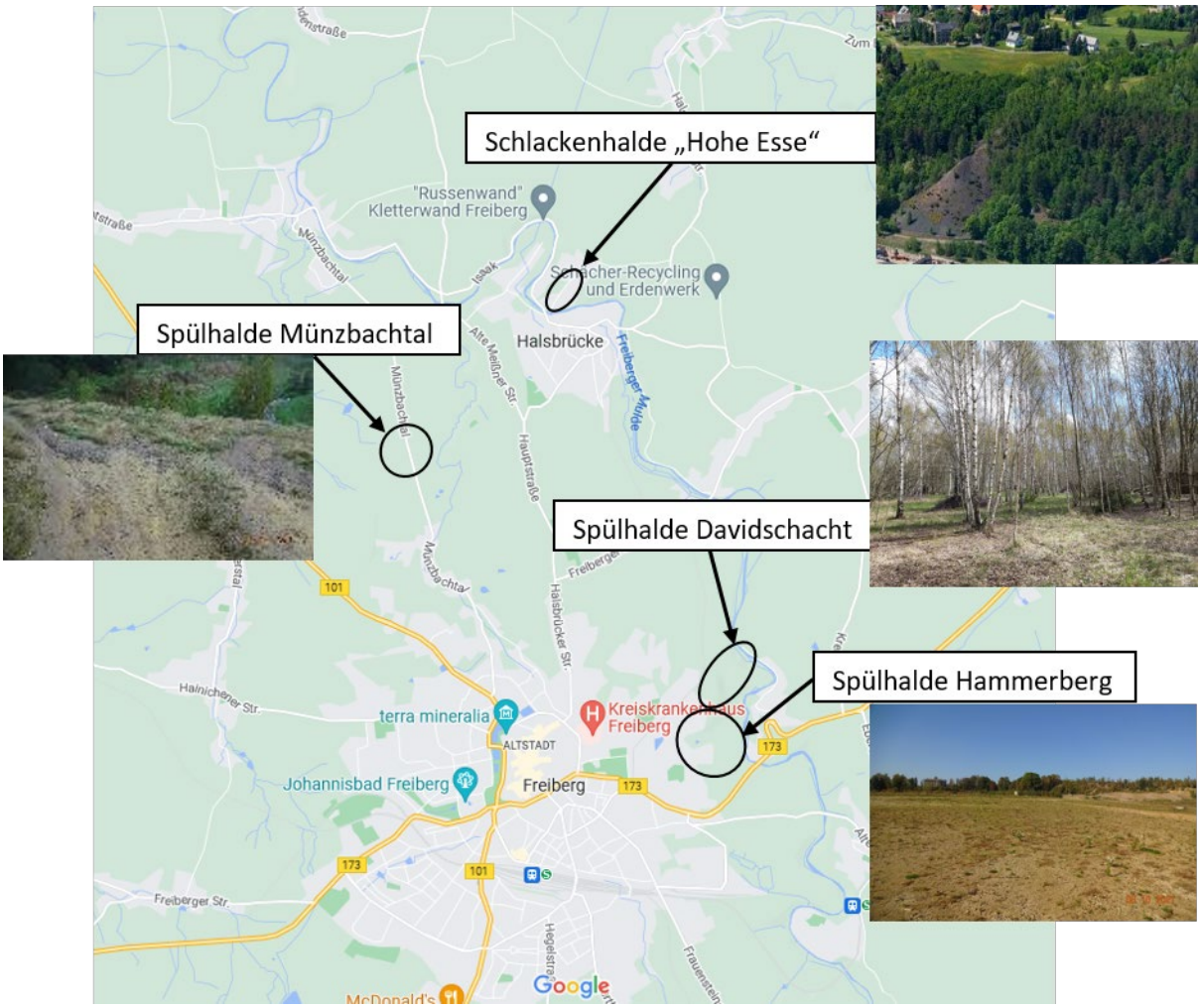

Abbildung 1: Ausgewählte Haldenflächen der SAXONIA im Freiberger Raum (Quelle SAXONIA; Kartengrundlage Google Maps)

Neben der Probenahme von potenziellen Rekultivierungs- und Haldenmaterialien und einer ersten vegetationskundlichen Aufnahme konnte vor dem Hintergrund räumlicher Gegebenheiten eine potenzielle Versuchsfläche festgelegt werden. Es handelt sich dabei um eine kleine Teilfläche auf dem mittleren Plateau der Spülhalde Hammerberg, die durch die SAXONIA seit 2012 durch das Aufbringen einer mineralischen Abdeckung gesichert und saniert wird (Abbildung 2).

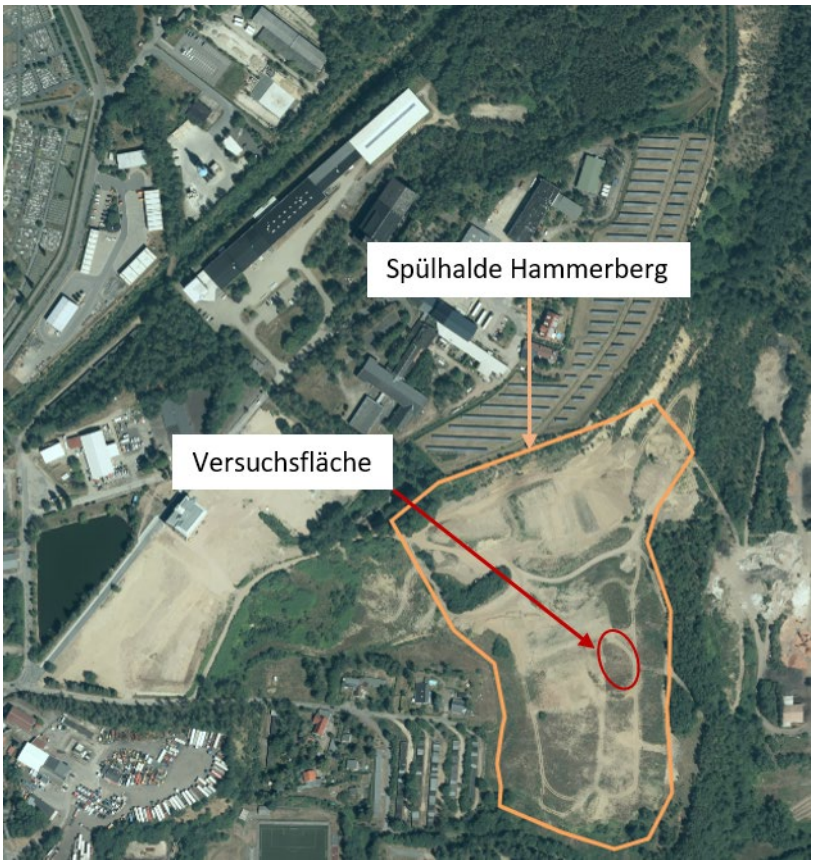

Abbildung 2: Lage der Versuchsfläche auf dem Gelände Hammerberg (Quelle SAXONIA)

Im Bereich dieser Teilfläche wurde bereits zum Teil Material für die obere Abdeckung (Abdeckzone I und II) = Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschicht mit einer Gesamtmächtigkeit von mindestens 1,0 m (0,8 m Abdeckzone II und 0,2 m Abdeckzone I – oberste durchwurzelbare Bodenschicht) eingebaut, sodass die benachbarten Flächen als Kontrollvariante mit gleichem Einbauzeitraum in die Bewertung eingehen können. Die auf der Spülhalde Hammerberg befindliche Fläche liegt zudem in direktem Anschluss an eine Versuchsfläche, die im Rahmen des Interreg-Vorhabens VODAMIN II mit einer Anlage zum Sicker- bzw. Grundwassermonitoring ausgestattet wurde.

Um die Vegetation an relevanten, ggf. problematischen Standorten im Jahresverlauf erfassen zu können und weitere Materialien sowie Flächen in die Betrachtung einzubeziehen, wurden zwei weitere Begehungstermine zum Beginn der Vegetationsperiode 2022 vereinbart. Eine Begehung erfolgte dabei am 26.04.2022 auf der Spülhalde Hammerberg. Im Rahmen dieser Begehung wurde seitens SAXONIA weiteres Referenzmaterial zur Verfügung gestellt.

Abbildung 3: Begehung und Probenahme am 26.04.2022 (Quelle SAXONIA)

Bei diesen Referenzmaterialien handelt es sich um typisches Bodenmaterial aus dem Freiberger Raum, das aktuell für die Herstellung des oberen Abdeckkörpers genutzt wird und dabei den höchsten stofflichen Qualitätsanforderungen unterliegt. Dennoch konnte nicht ausgeschlossen werden, dass das beprobte Bodenmaterial standorttypische Hintergrundbelastungen aufwies. Da dieses Bodenmaterial die Grundmatrix für die Untersuchungen im Labor bildete, war dies bei Herstellung des Rekultivierungsmaterials zwingend zu berücksichtigen.

Am 05.07.2022 wurden seitens des Fraunhofer IKTS und der SAXONIA zwei Flächen besucht, auf denen bereits 2015/2016 Erstaufforstungsmaßnahmen durch die SAXONIA durchgeführt worden sind, deren Vegetation sich jedoch nicht erwartungsgemäß etablieren konnte. Auch hier erfolgte eine Entnahme von Bodenmaterial.

Auf der Grundlage der durchgeführten Vor-Ort-Begehungen auf den Standorten der SAXONIA und der gewonnen Erkenntnisse über die einzelnen Standorte konnten erste Überlegungen zu möglichen Herstellungs- und Einbautechniken zusammengetragen werden. Zudem konnten mehrere Standorte, die für die Lagerung von Ausgangsmaterialien und die Herstellung von Stoffgemischen als Abdeckschicht geeignet sein könnten, in Augenschein genommen werden. Neben einer möglichst herzustellenden räumlichen Nähe zur späteren Versuchsfläche wurden Aspekte, wie die mögliche Forderung nach befestigten Untergründen, Geländeneigung, notwendigem Zugang zu elektrischer Energie sowie ausreichend Arbeitsfreiheit ohne Störung laufender Sicherungs- und Sanierungsarbeiten der SAXONIA, einbezogen. Für die Lagerung, die mechanische Aufbereitung, die Mischung und den Transport konnten geeignete Flächen identifiziert werden. Eine biologische Aufbereitung in Form einer Kompostierung hätte vor Ort nicht sinnvoll umgesetzt werden können und sollte daher bei Bedarf auf den Flächen der VKD erfolgen.

Parallel wurde von den Partnern SAXONIA und Fraunhofer IKTS eine Recherche zu in Frage kommender Herstellungs- und Einbautechnologien (AP1.3) durchgeführt. Der Schwerpunkt lag vor allem auf den Verfahrensschritten mechanische Aufbereitung, Mischen / Homogenisieren und Einbau sowie der systematischen Aufbereitung, die die Grundlage für eine Bewertungseignung bildet. Zu beachten galt es v. a., dass mit der Nutzung unterschiedlicher Materialströme verschiedene verfahrenstechnische Optionen genutzt werden können bzw. müssen.

In einem finalen Schritt wurde es sich zur Aufgabe gemacht, einen umfassenden und

strukturierten Überblick über die rechtlichen und analytischen Rahmenbedingungen zu schaffen, die für den Einsatz von Klärschlammkompost (KS) und abgetragene Pilzsubstrate (APS) aus der Kulturpilzproduktion als innovative Rekultivierungsmaterialien relevant sind. Diese Aufgabe baute auf den fundierten Erkenntnissen des vorangegangenen Arbeitspakets 1.1 auf, in dem bereits wesentliche Zielvorgaben und Grundlagen identifiziert wurden.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde zum einen eine standortspezifische Anforderungsmatrix (AP1.4) erstellt, die die konkreten Anforderungen des untersuchten Standortes - hier: der Spülhalde Hammerberg mit spezifischen Einbaugrenzwerten, d.h. Ausnahmewerten für freibergtypische Elemente - berücksichtigt und zum anderen eine detaillierte Anforderungsmatrix entwickelt, die als zentrales Instrument für die Planung und Durchführung von Rekultivierungsmaßnahmen im Allgemeinen dienen soll. Diese Matrix stellt eine systematische Zusammenstellung aller relevanten rechtlichen Vorschriften und analytischen Kriterien dar, die bei der Verwendung von KS, Klärschlammprodukten und APS als Rekultivierungsmaterialien zu berücksichtigen sind. Die Erarbeitung der Anforderungsmatrix erfolgte in einem intensiven, interdisziplinären Prozess. In enger Kooperation mit den Projektpartnern wurden die Zielwerte für die Matrix sorgfältig ausgearbeitet und präzise definiert. Durch diesen kollaborativen Ansatz konnte das vielfältige Fachwissen und die unterschiedlichen Perspektiven der beteiligten Experten integriert werden. Auf dieser Grundlage konnte eine besonders umfassende und praxisnahe Anforderungsmatrix erstellt werden, die den komplexen Herausforderungen des Projekts gerecht wird.

Die entwickelte Matrix berücksichtigt nicht nur die aktuellen gesetzlichen Bestimmungen, sondern auch potenzielle zukünftige Entwicklungen im Bereich der Umweltgesetzgebung und Rekultivierungspraxis. Sie dient als flexibles und anpassungsfähiges Instrument, das kontinuierlich aktualisiert und verfeinert werden kann, um auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse oder regulatorische Änderungen zu reagieren.

Ein besonderer Fokus lag auf der Identifikation und Quantifizierung von Schlüsselparametern, die für die erfolgreiche Anwendung von KS, KS-Produkten und APS in Rekultivierungsprojekten entscheidend sind. Hierzu zählen unter anderem bodenphysikalische und chemische Eigenschaften, mikrobiologische Aktivität, Nährstoffverfügbarkeit sowie potenzielle Schadstoffbelastungen.

Die daraus resultierende Anforderungsmatrix (Abbildung 4) stellt somit ein unverzichtbares Werkzeug dar, um die Einhaltung aller relevanten rechtlichen Vorschriften und analytischen Kriterien bei der Verwendung von KS, KS-Produkten und APS als Rekultivierungsmaterialien sicherzustellen. Sie bildet die Grundlage für eine effiziente, nachhaltige und gesetzeskonforme Durchführung von Rekultivierungsmaßnahmen und trägt dazu bei, potenzielle Risiken zu minimieren und die Qualität der Rekultivierungsergebnisse zu optimieren.

Anforderungen pflanzliches Leben			
Parameter	**min**	**max**	**Hinweise**
pH-Wert	5 - 9	5 - 6,5	gärtnerische Substrate müssen zwischen 5 und 6,5 liegen
Salzgehalt	< 5,0 g/l	< 3,0 g/l	3,0 g/l entspricht stark aufgedüngten Substraten
organische Anteile	< 2 Masse-%		entspricht "schwach humosen" Böden, Zusammenhang KAK beachten
N	> 25 mg/l	300 mg/l	N-Form beachten; Ammonium-N wirkt sauer; N-Stabilisierung bei org. Zuschlagstoffen
P	> 40 mg/l		min-Wert entspricht halber Mindestanforderung für Kultursubstrate
K	> 50 mg/l		min-Wert entspricht halber Mindestanforderung für Kultursubstrate
Na		< 140 mg/l	doppeltes Gütekriterium Substrate
Cl		< 400 mg/l	doppeltes Gütekriterium Substrate
Katilonenaustausch-kapazität (Puffer) pot.	3 $cmol_c/kg$		maßgeblich durch Tonminerale und Huminstoffe bestimmt; bei Huminstoffen nimmt KAK mit dem pH-Wert zu, KAK pot. wird bei pH 8,2 bestimmt
Wasserdurchlässigkeit	1 cm/d		
Gesamtporen-volumen	> 40 Vol.-%		
Luftkapazität (bei WK max)	> 10 Vol.-%		
frei von wachstums-hemmenden Stoffen			Keimpflanzentest ist das Kriterium

Benennung von relevanten Leitorganismen

Weidelgras; Pflanzenauswahl nach Bodenart, die der Abdeckschicht am nächsten kommt; FLL Landschaftsrasen mit und ohne Kräutermischung

Bodenmechanische Anforderungen				
Parameter	**min**	**max**	**Quelle / Vorschrift**	**Hinweise**
Dicke	30 cm		LAGA Ad-hoc - BQS 7-1	
Luftkapazität	5 Vol.-%		LAGA Ad-hoc - BQS 7-1	Bodenschadverdichtungen liegen vor, wenn eine Luftkapazität von 5 Vol.-% unterschritten wird. Für verdichtungsempfindliche Böden wi
Nutzbare Feldkapazität (nFK) mm	140 mm		LAGA Ad-hoc - BQS 7-1	
Humusgehalt (TOC) Masse-%		≤ 5 %	LAGA Ad-hoc - BQS 7-1	optimal: TOC 1 bis 2 Masse-%
Konsistenz I_c	0,75	1,00	LAGA Ad-hoc - BQS 7-1	

Bodenbezogene Untersuchungspflichten			Vor erstmaliger Auf- und Einbringung, nach DIN 19682-2 "Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchung - Teil 2: Bestimmung der Bodenart" Ausgabe Juli 2014		
Boden	**Parameter**	**Einheit**	**max**	**Quelle / Vorschrift**	**Hinweise**
Bodenart Ton	Cadmium	mg/kg TM	1,5	BBodSchV Anhang 2	
	Blei	mg/kg TM	100	BBodSchV Anhang 2	
	Chrom	mg/kg TM	100	BBodSchV Anhang 2	
	Kupfer	mg/kg TM	60	BBodSchV Anhang 2	
	Quecksilber	mg/kg TM	1	BBodSchV Anhang 2	
	Nickel	mg/kg TM	70	BBodSchV Anhang 2	
	Zink	mg/kg TM	200	BBodSchV Anhang 2	
Bodenart Lehm/Schluff	Cadmium	mg/kg TM	1	BBodSchV Anhang 2	
	Blei	mg/kg TM	70	BBodSchV Anhang 2	
	Chrom	mg/kg TM	60	BBodSchV Anhang 2	
	Kupfer	mg/kg TM	40	BBodSchV Anhang 2	

Abbildung 4: Auszug der gemeinsam erarbeiteten Anforderungsmatrix

Es kann grundsätzlich festgehalten werden, dass die erstellte Anforderungsmatrix einen signifikanten Beitrag zur Systematisierung und Operationalisierung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Rekultivierungsmaterialien darstellt. Sie bildet eine essenzielle Grundlage für die weitere Forschung und Entwicklung in diesem Bereich und trägt somit maßgeblich zur Verbesserung und Optimierung von Rekultivierungspraktiken bei.

Über die im Hauptarbeitspaket 2 „Charakterisierung und Optimierung der Zuschlagstoffe“ durch die Projektpartner geleisteten Arbeiten hat sich SAXONIA durch bilaterale Abstimmungen und die regelmäßig durch die Koordination organisierten Projektbesprechungen informiert.

HAP3: Auswahl Grundmatrix sowie geeigneter Verfahren zur Reduzierung und Immobilisierung von anorganischen und organischen Schadstoffen

Für die Untersuchungen zur biologischen Bodensanierung wurden mögliche Standorte für den Versuchsaufbau im technischen Maßstab diskutiert (AP3.4). Durch die SAXONIA wurde nicht nur das entsprechende Haldenmaterial zur Verfügung gestellt, sondern auch umfangreiches Informationsmaterial und Fachwissen über das Freiberger Bergbaurevier übergeben.

Außerdem gab es regen Austausch mit den Projektkoordinatoren innerhalb des recomine-Bündnisses bezüglich weiterer Reststoffe bzw. Endprodukte, die in die Untersuchungen des RekuMat-Projektes mit einbezogen werden könnten. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Materialien erst zu einem späteren Zeitpunkt vorliegen und folglich die Errichtung der entsprechenden Mieten im technischen Maßstab nicht möglich war. Daher diente weiteres Material der SAXONIA (freibergtypisches Halden- und Bodenmaterial) als Grundmatrix für die Untersuchungen im HAP3.

Auch über die im Hauptarbeitspaket 4 „Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von Gemischen für Rekultivierungsschichten im Labormaßstab“ durch die Projektpartner geleisteten Arbeiten hat sich SAXONIA im Rahmen der regelmäßig durch die Koordination

organisierten Projektbesprechungen informiert. Die SAXONIA sich bei der Auswahl der geeigneten Mischungen, die in einem kollaborativen Verfahren erfolgte. Durch diesen interdisziplinären Ansatz konnte gewährleistet werden, dass verschiedene Fachexpertisen in den Entscheidungsprozess eingeflossen sind und zu einer ganzheitlichen und fundierten Beurteilung der Substratmischungen führten. Bei der Evaluation wurden multiple Faktoren berücksichtigt, wobei ein besonderer Fokus auf dem technischen Anforderungsprofil lag. Dieses Profil umfasste eine Reihe von spezifischen Kriterien, die für die erfolgreiche Umsetzung der großtechnischen Kompostierung und die anschließende Anwendung auf der Versuchsfläche von zentraler Bedeutung waren.

Zu den berücksichtigten technischen Anforderungen gehörten unter anderem:

1. Physikalische Eigenschaften: Dichte, Porosität, Wasserhaltekapazität und Strukturstabilität der Mischungen (IKTS, VKD).
2. Chemische Zusammensetzung: Nährstoffgehalt, pH-Wert, Salzgehalt und potenzielle Schadstoffbelastungen (IHD, IKTS, SAXONIA).
3. Biologische Aktivität: Mikrobielles Leben, Abbaubarkeit organischer Substanzen und potenzielle phytotoxische Effekte (IHD, IKTS).
4. Verarbeitbarkeit: Eignung für großtechnische Kompostierungsanlagen und Handhabbarkeit bei der Ausbringung (VKD, IKTS).
5. Ökologische Aspekte: Nachhaltigkeit der Rohstoffe und potenzielle Umweltauswirkungen (Alle).
6. Ökonomische Faktoren: Kosteneffizienz in der Herstellung und Anwendung (VKD, SAXONIA).

Die ausgewählten Mischungen mussten nicht nur die laboranalytischen Anforderungen erfüllen, sondern auch eine praktikable Umsetzbarkeit im großtechnischen Maßstab aufweisen. Dies erforderte eine sorgfältige Abwägung zwischen theoretischer Optimalität und praktischer Realisierbarkeit.

Im Zuge des Auswahlprozesses wurden diverse Mischungsvarianten einer eingehenden Prüfung unterzogen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden im Projektteam diskutiert und bewertet, um eine konsensbasierte Entscheidung zu treffen.

Die erfolgreiche Durchführung dieses Arbeitspakets markiert einen signifikanten Meilenstein im Gesamtprojekt. Es bildet die Grundlage für die nachfolgenden Phasen der großtechnischen Erprobung und der Feldversuche, die entscheidend für die Validierung der entwickelten Rekultivierungssubstrate unter realen Bedingungen sind.

Mit dem Abschluss dieses Arbeitspakets wurde ein kritischer Schritt in Richtung der praktischen Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse vollzogen. Die Ergebnisse bilden die Basis für potenzielle zukünftige Innovationen im Bereich der Landschaftsrekultivierung und des nachhaltigen Bodenmanagements.

HP 5 Technikumsversuche zur Herstellung von Rekultivierungsmaterial, Einbau auf Versuchsfläche sowie Langzeitbewertung

In diesem Hauptarbeitspaket wurden die Arbeiten vom labortechnischen Maßstab in den Freilandversuch überführt, um die neu entwickelten Rekultivierungsmaterialien unter realen Bedingungen testen zu können. Dabei hat das Fraunhofer IKTS federführend die Planung und die Anlage des Freilandversuchs geleitet. Die SAXONIA hat die Arbeiten direkt begleitet bzw. unterstützt und ihre Expertise mit eingebracht. In enger Abstimmung aller Projektpartner war es so möglich, die bis zu diesem Zeitpunkt erarbeiteten Ergebnisse in den Freilandversuch umzusetzen.

Pflanzenbauliches Verständnis konnte durch das Fraunhofer IKTS bei der Auswahl der Saatgutmischungen eingebracht werden. Da es sich bei einer Saatgutmischung gemäß den

Hinweisen der SAXONIA um die in der Regel von der zuständigen Boden- bzw. Naturschutzbehörde geforderte Saatgutzusammenstellung handelt, konnte ein Praxisschluss mit standardisierter Vergleichbarkeit hergestellt werden. Das Standardsaatgut RSM 7.1.2 ist für die Flächen auf der Spülhalde Hammerberg vorgeschrieben. RSM 7.1.2 basiert auf der Landschaftsrasenmischung RSM 7.1.1, die durch eine Kräutermischung ergänzt wird.

Die Projektpartner haben sich auf den Einsatz von zehn Varianten plus jeweils einer Kontrolle mit den entsprechenden Saatgutmischungen verständigt (Tabelle 1). Dabei wurden drei RekuMat-Mischungen in den technischen Maßstab überführt. Die Anlage des Versuches erfolgte in einem Blockaufbau.

Tabelle 1: Überblick über die Versuchsglieder

#	Bezeichnung	Beschreibung
1	Kontrolle S1	gefrästes Grundmatrix-Material mit Standardsaatgut RSM 7.1.2 (= Standardbehandlung)
2	Kontrolle S1 *plus*	gefrästes Grundmatrix-Material mit Standardsaatgut RSM 7.1.2 *plus* 0,45 % Superabsorber
3	Kontrolle S2	gefrästes Grundmatix-Material mit Standardsaatgut RSM 7.1.1
4	RekuMat Variante 1 - S1	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 42 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.2
5	RekuMat Variante 1 - S1 *plus*	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 42 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.2 *plus* 0,45 % Superabsorber
6	RekuMat Variante 1 - S2	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 42 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.1
7	RekuMat Variante 2 - S1	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 50 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.2
8	RekuMat Variante 2 - S2	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 50 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.1
9	RekuMat Variante 3 - S1	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 47 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.2
10	RekuMat Variante 3 - S2	Grundmatrix + RekuMat-Mischung IHD 47 gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.1
11	RekuMat Variante 4 - S1	Grundmatrix + Grünschnitt-Kompost VKD gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.2
12	RekuMat Variante 4 - S2	Grundmatrix + Grünschnitt-Kompost VKD gefräst mit Standardsaatgut RSM 7.1.1
13	Hammerberg unbehandelt	unbehandelte, nur mit Grundmatrix-Material abgelagerte Fläche als Trenn- und Randflächen

Die verwendeten Mischungen wurden intensiv analytisch begleitet und auf eventuelle Störstoffe hin untersucht. Leider musste festgestellt werden, dass der für den Versuch als Vergleich eingesetzte Grünschnittkompost Mängel aufwies. Sowohl die sensorische als auch die phytotoxikologische Bewertung wiesen für diesen Materialstrom Mängel aus. Da sich die Werte - zwar am Rande - aber im Rahmen der geltenden Toleranzbereiche befanden, der zeitliche Ablauf im Vorhaben keinen weiteren Verzug erlaubt hätte und das Material lediglich als Abgrenzung der RekuMat-Mischungen zu einer simpleren Ertüchtigung der in Freiberg vorliegenden Grundmatix eingesetzt werden sollte, wurde der Grünschnittkompost ebenfalls eingebaut.

Die Auswahl der Materialien basierte auf einer multifaktoriellen Analyse, die sowohl die Ergebnisse der Laboruntersuchungen als auch die spezifischen Anforderungen des technischen Profils berücksichtigte. Hierbei wurden diverse Aspekte in Betracht gezogen, darunter physikochemische Eigenschaften, biologische Aktivität, Nährstoffzusammensetzung, potenzielle Schadstoffbelastungen, Strukturstabilität und ökologische sowie ökonomische Nachhaltigkeit der Materialien. Nach Abschluss der Selektionsphase übernahm der Projektpartner VKD die kritische Aufgabe der Mengenermittlung und Substratbeschaffung, die

mehrere Schritte umfasste.

Die Implementierung der großtechnischen Kompostierung erfolgte durch den Ansatz mehrerer Kompostmieten, um eine praxisnahe Simulation realer Kompostierungsbedingungen bei gleichzeitiger Gewährleistung einer kontrollierten Umgebung für wissenschaftliche Beobachtungen zu ermöglichen. Der Aufbau der Mieten wurde mit höchster Präzision durchgeführt, wobei besonderes Augenmerk auf die Geometrie, Schichtung der Materialien, Feuchtigkeitsmanagement und Belüftungssysteme gelegt wurde.

Durch die VKD wurde eine umfassende Fotodokumentation des gesamten Mietenaufbauprozesses erstellt. Diese diente als wertvolles Instrument für die spätere Analyse und die Kommunikation innerhalb des Projektteams.

Parallel zur Überwachung und Steuerung des Kompostierungsprozesses bereitete VKD die finalen Mischungen für den Einbau auf der Versuchsfläche vor. Dieser Schritt erforderte eine sorgfältige Abstimmung zwischen den Laborergebnissen, den Erkenntnissen aus der großtechnischen Kompostierung und den spezifischen Anforderungen des Feldversuchs. Die Herstellung dieser Mischungen erfolgte unter streng kontrollierten Bedingungen, um eine konsistente Qualität und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Die logistische Herausforderung des Transports der präparierten Substrate zur Versuchsfläche wurde ebenfalls von VKD koordiniert und durchgeführt. Hierbei wurden spezielle Vorkehrungen getroffen, um die Integrität der Mischungen während des Transports zu bewahren und eine Kontamination zu verhindern. Der Transport wurde zeitlich so geplant, dass die Substrate unter optimalen Bedingungen auf der Versuchsfläche eingebaut werden konnten. Analytisch wurden die Materialströme durch IHD und IKTS begleitet. Es wurden drei IHD-Rezepturen ausgewählt, deren Eignung zur Rekultivierung abgeleitet wurde.

Der finale Schritt des Hauptarbeitspakets (AP5.4) bestand im Einbau der Mischungen auf der Versuchsfläche. Dieser Prozess wurde in enger Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern durchgeführt, um eine interdisziplinäre Expertise bei der Implementierung zu gewährleisten. Der Einbau erfolgte nach einem präzise ausgearbeiteten Versuchsplan, der die Verteilung der verschiedenen Substratmischungen auf der Fläche vorsah. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Einhaltung definierter Einbautiefen, die Vermeidung von Kreuzkontaminationen zwischen den Versuchsparzellen und die Schaffung einheitlicher Ausgangsbedingungen für alle Substrate gelegt.

Für den Freilandversuch wurde eine Teilfläche auf dem Plateau der Spülhalde Hammerberg genutzt, die sich in unmittelbarer Nähe zu einer anderen Versuchsfläche befand und bei welcher Material der Abdeckzone (Abdeckzone II) bereits aufgebracht worden und noch Material der obersten Abdeckung (Abdeckzone I) einzuarbeiten war. Außerdem war es wichtig den Freilandversuch so anzulegen, dass die aktuell laufende Sanierungsmaßnahme der SAXONIA nicht beeinträchtigt wurde und eine gute Erreichbarkeit für die Anlieferung der Substratmischungen gegeben war.

Im Ergebnis der Versuchsplanung wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

Schritt 1 – Grundvorbereitung, Nivellierung der Fläche mittels Raupe

Schritt 2 – Auflockerung und Homogenisierung mit Forstfräse

Schritt 3 – Parzellenanlage durch Aufbringen der Testmaterialien mit Radlader

Schritt 4 – maschinelles Einarbeiten der Testmaterialien mit Forstfräse

Schritt 4 – Rückverdichtung durch Radlader

Schritt 5 – manuelle Saatbeetherstellung

Schritt 6 – manuelle Aussaat mit ca. 20 g/m^2 mit zwei Saatmischungen

Schritt 7 – oberflächliches Einharken, Abschluss der Arbeiten

Die Fläche wurde gemäß des gemeinsam abgestimmten Versuchsplanes abgesteckt. Durch die SAXONIA wurde die Versuchsfläche zunächst vorbereitet. Mittels Raupe wurde die kurze Grasnarbe abgeschoben und die Fläche nivelliert (Abbildung 5).

Abbildung 5: Abgesteckte und nivellierte Versuchsfläche (Quelle SAXONIA)

Die Homogenisierung der Fläche erfolgte durch das Querfräsen mittels Forstfräse (Abbildung 6).

Abbildung 6: Homogenisierung des Grundmaterials durch eine schleppergezogene Forstfräse (Quelle SAXONIA)

Am 12.09.2023 erfolgte die Anlieferung der Substratmischungen im Auftrag der VKD. Die Substratmischungen wurden in unmittelbarer Nähe der abgesteckten Versuchsfläche zwischengelagert (Abbildung 7).

Abbildung 7: Zwischenlager für die durch VKD produzierten RekuMat-Mischungen und Grünschnittkompost (Quelle SAXONIA)

Der Einbau der vorbereiteten Substratmischungen wurde am 13.09.2024 federführend durch die SAXONIA ausgeführt. Zunächst erfolgte die gemeinsame Absteckung der Parzellen für die vier Substratmischungen, wobei die umliegenden Randbereiche die Kontrollbereiche darstellten. Die vier Substratmischungen wurden mittels Radlader chargenweise auf der Versuchsfläche verteilt und mittels Forstfräse in die oberen 20 cm der Grundmatrix (Material der Abdeckzone II) eingearbeitet (Abbildung 6).

Abbildung 8: Homogenisierung und Einarbeitung der RekuMat-Substratmischungen mit Hilfe einer schleppergeführten Forstfräse (Quelle SAXONIA)

In einem letzten Schritt wurden auf der kompletten Versuchsfläche zwei verschiedene Saatgutmischungen ausgesät. Es handelte sich dabei zum einen um ein Saatgut mit einem erhöhten Kräuteranteil (RSM 7.1.2) und zum anderen um die Landschaftsrasenmischung RSM 7.1.1. Der Zustand der fertiggestellten Versuchsfläche (nach Abschluss der Arbeiten am 14.09.2024) ist Abbildung 9 zu entnehmen.

Abbildung 9: Fertiggestellte Versuchsfläche am 14.09.2024 (Quelle SAXONIA)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse des Freilandversuchs trotz der späten Ausbringung im Herbst und der im Vergleich zum Frühjahr nicht optimalen Wetter- und Lichtverhältnisse die Erwartungen übertroffen haben. Nach nur 1,5 Monaten wiesen die mit den Substratproben versehenen Versuchsflächen bereits eine Vegetationsdecke auf.

Am 26.10.2023 wurde die erste gemeinsame Begehung der Versuchsfläche auf der Spülhalde Hammerberg durchgeführt und erste Proben entnommen. Diese Begehung bot den Anfangspunkt für die begleitende Bewertung der Freilandfläche (AP 5.5). SAXONIA übernahm den Part des Monitorings, der Dokumentation des Zustandsverlaufes und der Pflege der Versuchsfläche. Außerdem kümmerte sich SAXONIA um die installierte Wetterstation.

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, war nach ca. 1,5 Monaten auf der mit den Substratproben versehenen Versuchsfläche ein leichter grüner Flaum zu erkennen.

Abbildung 10: Zustand der Versuchsfläche bei Begehung und Probenahme am 26.10.2023 (Quelle SAXONIA)

Die Entwicklung der Versuchsfläche während der Vegetationspause 2023/2024 kann Abbildung 11 entnommen werden.

Abbildung 11: Flächenentwicklung über die Vegetationspause 2023/2024 (Quelle SAXONIA)

Auch bei der zweiten und dritten Begehung der Versuchsfläche war das Pflanzenwachstum auf den Parzellen ohne Substrat (Kontrollflächen) deutlich schlechter als auf den Parzellen mit den eingearbeiteten Substraten.

Die entnommenen Bodenproben wurden am IHD und zusätzlich zur Verifizierung in einem externen Labor chemisch auf Schwermetalle und Arsen untersucht. Die in den Bodenproben ermittelten Werte für das Element Arsen (As) und die Schwermetalle Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), Nickel (Ni), Blei (Pb), Kupfer (Cu) und Chrom (Cr) lagen deutlich unter den behördlich festgelegten Grenzwerten für die Abdeckzone I, die die obere durchwurzelbare Bodenschicht von 20 cm umfasst. Es war jedoch festzustellen, dass die Messwerte für Zink (Zn), insbesondere in den Kontrollproben des Abdeckmaterials (RM), über dem Grenzwert für Z 0 lagen, jedoch deutlich unter dem Grenzwert für Z 1 mit 450 mg/kg. Der erhöhte Zinkgehalt spiegelte sich auch in den anderen Bodenproben mit RM wider, wobei auch beim Grünschnittkompost erhöhte Gehalte zu verzeichnen waren.

Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen wurde bestätigt, dass eine homogene Mischung für konsistente Wachstumsbedingungen von entscheidender Bedeutung ist und die Variabilität zwischen den einzelnen Proben minimiert. Eine optimale Homogenisierung der Mischungen sorgt für eine gleichmäßige Verteilung von Nährstoffen und verbessert die Wasserhaltefähigkeit. Grundlage hierfür bieten die biologischen und technischen Verfahren, die durch das Konsortium erprobt wurden. Der Partner VKD hat hierfür eine interne Vorschrift entwickelt, um für zukünftige Anwendungen des RekuMat-Ansatzes die grundlegende Kompostierung entsprechend des vorgesehenen Einsatzzweckes in gleichbleibend hoher Qualität zu ermöglichen. Die Vorgaben zur Mischungsherstellung und Einbauvorschriften, die durch die Expertise aller Partner in AP5.6 arbeitet werden konnten, tragen dazu bei, den RekuMat-Projekterfolg skalieren zu können.

Mit dem erfolgreichen Abschluss dieses Arbeitspakets wurde ein signifikanter Meilenstein in der Überführung der Laborergebnisse in die Praxis erreicht. Die sorgfältige Durchführung und Dokumentation aller Schritte von der Materialauswahl über die großtechnische Kompostierung bis hin zum Einbau auf der Versuchsfläche bildet eine solide Grundlage für die nachfolgenden Phasen des Forschungsprojekts. Die gewonnenen Erkenntnisse werden nicht nur für die weitere Analyse und Interpretation der Versuchsergebnisse von großer Bedeutung sein,

sondern auch wertvolle Beiträge zur Optimierung von Rekultivierungsmaßnahmen und zur Entwicklung nachhaltiger Bodenverbesserungsstrategien liefern.

Die neu entwickelten Rekultivierungsmaterialien könnten in Zukunft nicht nur aufgrund ihrer wertvollen Inhaltsstoffe als Nahrungsquelle (KS-Produkte und APS) für Bodenorganismen dienen, sondern auch aufgrund ihres mykoremediatorischen Potenzials aktiv zur Bodensanierung beitragen. Für eine praxisnahe Umsetzung der Ergebnisse wird empfohlen, die für die Rekultivierung repräsentativen Proben (Klärschlamm-Produkte und Zuschlagstoffe) chemisch auf Schwermetalle zu untersuchen und unter Berücksichtigung der rechtlichen Randbedingungen entsprechende Mischungsverhältnisse für den jeweiligen Anwendungsfall festzulegen. Eine Übertragung des RekuMat-Ansatzes auf andere Standorte im Freiberger Raum ist aufgrund der erreichten Ergebnisse jederzeit möglich.

Aus Gründen der Geheimhaltung der wissenschaftlichen Projektarbeit können die hier entwickelten Mischungen nicht genannt werden. Eine schutzrechtliche Bearbeitung der entwickelten Rekultivierungsmaterialien befindet sich zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch in Bearbeitung.

Zusammenfassend wird deutlich, dass sowohl die Auswahl des Substrats als auch die angewandte Behandlungsmethode einen signifikanten Einfluss auf das Wachstum und die Entwicklung sowohl von Pflanzen als auch von Pilzen ausüben. Zukünftige Studien könnten darauf abzielen, die genauen Mechanismen hinter diesen Beobachtungen zu ergründen und die Bedingungen zu optimieren, unter denen sowohl Pflanzen als auch Pilze erfolgreich gedeihen können.

Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben- und Zeitplanung konnte im Wesentlichen eingehalten werden. Detaillierte Angaben zu den Ausgaben sind dem zahlenmäßigen Nachweisen zu entnehmen. Innerhalb der geplanten Projektlaufzeit wurden alle notwendigen Forschungsaufgaben bearbeitet.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Alle durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Über Verschiebungen gegenüber der ursprünglichen Planung von zeitlichen Abläufen und inhaltlicher Arbeit an den Projektzielen wurde im Rahmen der Zwischenberichte regelmäßig dokumentiert und begründet. Der Finanzplan wurde eingehalten, die Hauptziele wurden erreicht. Die angefallenen Sachkosten und Leistungen Dritter entsprachen in Art und Höhe dem Arbeits- und Finanzierungsplan. Der Personaleinsatz war zur Erreichung der Projektziele notwendig und entsprach dem Arbeitsplan.

Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Alleinstellungsmerkmal dieses Projektes lag im interdisziplinären Lösungsansatz der zielgerichteten Entwicklung der Zuschlagstoffe, der Mischungsrezeptur, der Sanierung von Altablagerungen oder Altstandorten sowie des Einbaus inkl. Homogenisierung. Nach Abschluss des Vorhabens verfügt die SAXONIA über das erforderliche Know-how zur Vermarktung in mehreren Bereichen:

- Ingenieurdienstleistung und Beratungsleistung im Bereich Rekultivierung von Halden, Altstandorten,
- Nutzung der Ergebnisse für die Rekultivierung eigener Halden
- Nutzung der Ergebnisse für die Entwicklung alternativer und wirtschaftlicher Sicherungs- bzw. Sanierungsmethoden
- Ressourcenschonung durch Abfallverwertung (Nutzung alternativer Abdeckmaterialien)

Die enge Zusammenarbeit mit Projekt- und Transferpartnern sichert die Überführung von Forschungsergebnissen in praktische Anwendungen. SAXONIA hat etablierte Monitoring-Konzepte übernommen. Die SAXONIA kann die gewonnen Ergebnisse bei zukünftigen Sanierungsmaßnahmen berücksichtigen bzw. anwenden und folglich direkt in die Praxis überführen. Zudem ist die Methode auf bergbaulich genutzte Flächen sowie weitere Standorte übertragbar. Die Zusammenarbeit mit potenziellen Anwendern aus Bergbaunachsorge, Klärschlammverwertung und Pilzanbau schafft Voraussetzungen für Technologie- und Know-how-Transfer. Außerdem erfolgte die Bekanntmachung der Ergebnisse auf Tagungen und durch Publikationen. Die detaillierte Darstellung der Nutzung und Verwertung der Ergebnisse ist dem Erfolgskontrollbericht der SAXONIA zu entnehmen.

Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Laufzeit sind den Projektpartnern keine Fortschritte Dritter bekannt geworden, die den Stand der Wissenschaft und Technik gegenüber der Vorrecherche maßgeblich verändert hätten. Einer Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens stehen keine Hemmnisse entgegen.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen von Ergebnissen

Die Projektpartner haben im Rahmen ihrer jeweiligen Internetseiten auf das Vorhaben RekuMat und den jeweiligen Beitrag dazu verwiesen. Zudem wurde an geeigneter Stelle in den jeweiligen Berichts- und Rechenschaftspublikationen auf das Vorhaben aufmerksam gemacht. Die folgende Auflistung enthält Vorträge, schriftliche Beiträge und Pressemitteilungen, die in Verbindung mit RekuMat entstanden sind:

11/2021	recomine-Projekt RekuMat gestartet. Beitrag recomine Herbst-Newsletter
seit 2022	Darstellung des RekuMat-Vorhabens auf den Seiten des Wir!-Bündnisses recomine (https://www.recomine.de/project/rekumat/)
04/2022	Kurzvorstellung von Forschungsaktivitäten auf ehemaligen Bergbaustandorten des Freiberger Raumes – Der Entwicklungsstandort Davidschacht. Workshop SN – CZ am 07.04.2022 in Freiberg
10/2022	Verwendung von abgetragenen Substraten. Rangno, N. Vortrag bei den Hessischen Pilztagen am 25.10.2022 in Uden, Niederlande
06/2023	Entwicklung von spezifischen Rekultivierungssubstraten für qualifizierte Abdeckung von Bergbauhalden. Vortrag im Rahmen des recomine-Statusmeetings in Freiberg
11/2023	Entwicklung von funktionalisierten Rekultivierungsmaterialien mit Hilfe von Klärschlammkomposten und Pilzmycel. Vortrag im Rahmen des 19. Kreislaufwirtschaft und Deponieworkshop Zittau-Liberec 2023
04/2024	Exkursion Altbergbauverein Freiberg am 06.04.2024 in Freiberg mit Bezug zu aktuell laufenden Forschungsprojekten im recomine-Verbund
05/2024	DACH-Arbeitskreis. Vortrag über das Ökologische Großprojekt SAXONIA mit Bezug zu aktuellen Forschungsvorhaben am 14.05.2024 in Dresden
06/2024	Development of Recultivation Material for the Qualified Covering of Mining Dumps and Landfills. Vortrag im Rahmen des 75. BHT Freiberger Universitätsforum, FK10 2024 recomine – Holistic Mine Waste Solutions made in Saxony
08/2024	Fachexkursion mit dem SG Altlasten der Landesdirektion Sachsen auf der Spülhalde Hammerberg am 21.08.2024 in Freiberg

Die SAXONIA hat ebenfalls im Rahmen ihrer Öffentlichkeitsarbeit in Form von Vorträgen oder Exkursionen auf das Projekt RekuMat aufmerksam gemacht.