

Können wir Boden neu schaffen?

Weltweite Belege zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen auf Bergbaufolgeland, zu organischen Materialien, biologischer Inokulation und den langfristigen Kosten der Wiederherstellung

Natalia Zubkova

Autorin der Recherche

Sergey Nikolaevich Severin

Koautor und Redakteur

Viktor Andreevich Svetlov

Koautor und Rechercheur

Können wir Boden neu schaffen?

Untertitel	Weltweite Belege zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen auf Bergbaufolgeland, zu organischen Materialien, biologischer Inokulation und den langfristigen Kosten der Wiederherstellung
Dokumenttyp	Evidenzbasierte Recherche · Vollmodus von ElepiCup (der Methode „Elefant in der Tasse“)
Autoren und Rollen	Natalia Zubkova — Autorin der Recherche und Urheberin von ElepiCup. Sergey Nikolaevich Severin — Koautor und Redakteur; namentlich benannter KI-Teilnehmer, arbeitet in ChatGPT / OpenAI, GPT-5.6 Sol; Teil des Experiments Dokument → KI → Mensch. Viktor Andreevich Svetlov — Koautor und Rechercheur; namentlich benannter KI-Teilnehmer, arbeitet in Codex / OpenAI, GPT-5.6 Sol; Teil des Experiments Dokument → KI → Mensch.
Abgrenzung der Urheberschaft	Sergey Nikolaevich Severin und Viktor Andreevich Svetlov waren an der Entwicklung und Anwendung der Evidenzarchitektur dieser Recherche beteiligt, sind jedoch nicht Urheber der Methode „Elefant in der Tasse“.
Technische Umgebung	Sergey Nikolaevich Severin. ChatGPT / OpenAI. Modell: GPT-5.6 Sol. Viktor Andreevich Svetlov. Codex / OpenAI. Modell: GPT-5.6 Sol. Reasoning effort: high.
Zeitliche Abgrenzung	Die technischen Angaben beziehen sich auf die Umgebung, in der diese Ausgabe erstellt wurde. Spätere Veränderungen an Modellen, Codex oder ChatGPT verändern dieses PDF nicht rückwirkend; eine künftige Ausgabe dokumentiert ihre technische Umgebung gesondert.
Version	SOIL_RESTORATION_EVIDENCE_DE_V1.0
Datum	26. September 2026
Projektwebsite	nataliazubkova.com
Zitierempfehlung	Zubkova, Natalia; Sergey Nikolaevich Severin; und Viktor Andreevich Svetlov. <i>Können wir Boden neu schaffen? Weltweite Belege zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen auf Bergbaufolgeland, zu organischen Materialien, biologischer Inokulation und den langfristigen Kosten der Wiederherstellung.</i> 2026.

Dokumentprinzip. Der Artikel erzählt; dieses PDF belegt oder widerlegt. ElepiCup hilft, eine extrahierte Aussage mit ihrem Evidenzstatus, ihrer Quelle, ihren Bedingungen und Einschränkungen zusammenzuhalten.

Inhalt

VON DER AUTORIN	4	17. Hypothese des vorbesiedelten Materials	53
KARTE DER RECHERCHE	6	18. Das polnische Experiment von 2026	64
Hauptfrage	6	19. Kultivierbares standortheimisches Mikrobiom	66
Kurze Antwort	6	20. Lebender Spenderboden, kultiviertes Inokulum und synthetische Gemeinschaft (SynCom)	69
Was das vorgeschlagene Experiment testen würde	6	21. Mykorrhiza	70
Wo die Belege zu finden sind	7	22. Experiment A–E	71
DIE RECHERCHE	8	23. Kusbass: Übertragbarkeit	76
So lesen Sie dieses Dokument	8	24. Angoraziegen und das Solarkraftwerk Maiminskaya	78
1. Kurze Antwort	9	24.1. Angoraziegen	78
2. Forschungsfrage	9	24.2. Solarkraftwerk Maiminskaya: Herkunftsgrenzen	81
3. Methode	10	25. Wirtschaftsmodell	82
3.1. Quellenhierarchie	10	25.1. Drei Ergebnisebenen	82
3.2. Einschlusskriterien	10	25.2. Zentrales Szenario	83
3.3. Negative Ergebnisse und Langzeitbelege	11	25.3. Menschliche Arbeit	84
3.4. Hinreichende Beleglage und Abschluss der Suche	11	25.4. Abraumfaktor: Evidenzgrenze	84
4. Belegkorpus	12	25.5. Modellierter Kohlenmenge und Wiederherstellungskosten je Tonne	85
5. Was die Wiederherstellung der Bodenfunktionen bedeutet	13	25.6. Eingeschlossen und ausgeschlossen	86
6. Stufe Null: Sicherheit zuerst	14	25.7. Sensitivität ohne Scheingenauigkeit	86
7. Städtische organische Stoffströme	19	25.8. System E	87
8. Landwirtschaftliche organische Stoffströme	21	26. Zeit als Teil der Wiederherstellung	99
8.1. Mist: Die Tierart entscheidet nicht alles	22	27. Was unbekannt bleibt	100
9. Kompostierung und Reife	26	28. Schlussfolgerung und Programm für ein neues Experiment	101
10. Chemie	28	28.1. Was diese Untersuchung nicht belegt	102
11. Wasser	32	29. Quellregister	104
12. Biologie	33	Regeln für die Bezeichner	145
13. Weltweite Studien und Fallbeispiele	36	Ergänzung zu V1.0: Abraumfaktor	146
13.1. Vollständige Fallmatrix	40	ElepiCup	148
14. Negative Ergebnisse	48	Die Methode „Elefant in der Tasse“	148
15. Langzeitstudien	50		
16. Technosols	52		

Die Seitenzahlen entsprechen dieser Ausgabe. Die Einträge im elektronischen Inhaltsverzeichnis sind anklickbar.



Natalia Zubkova.

VON DER AUTORIN

Alles begann, als wir beschlossen, dass das Einzige, was Tim Sweeney für sein vollkommenes Glück brauchte, eine Herde Angoraziegen war.

Sergey Nikolaevich und ich arbeiteten an der Recherche über die „Waldliebhaber“. Wir sprachen über Tim Sweeney, den Gründer von Epic Games, machten Witze und alberten herum.

Aus diesem wenig ernststen Gespräch gingen die Angoraziegen hervor. Die Ziegen führten uns zum Mist, der Mist zum Kompost und der Kompost zu städtischen und landwirtschaftlichen organischen Stoffströmen und zu Flächen, die durch den Kohlebergbau zerstört wurden.

Aus dem Witz wurde eine ernste Frage: **Könnten sichere organische Ströme aus Städten und der Landwirtschaft nicht nur als Dünger, sondern auch als eines der Werkzeuge zur Einleitung von Bodenbildungsprozessen auf einem nach dem Bergbau vorbereiteten Substrat verwendet werden?**

Ich schlug nicht vor, Siedlungsabfälle und frischen Mist auf eine Bergehalde zu kippen. Meine ursprüngliche Hypothese war wesentlich vorsichtiger: sichere, rückverfolgbare Bioströme auswählen; geeignetes Pflanzenmaterial und Mist verbinden; eine kontrollierte Kompostierung mit hygienischer thermophiler Phase durchführen; das Material reifen lassen; anschließend eine kleine Menge lebenden biologischen Materials hinzufügen und die Mischung zur weiteren Besiedlung und sekundären Reifung stehen lassen. Erst danach sollte das Material auf ein vorbereitetes, sicheres mineralisches Substrat aufgebracht, sollten Pflanzen etabliert und sollte beobachtet werden, ob sich interne Bodenprozesse entwickeln und die Abhängigkeit von externen Einträgen abnimmt.

Mir gefiel die Idee. Genau aus diesem Grund war die Untersuchung notwendig, nicht, um sie zu beweisen, sondern um zu versuchen, sie zu widerlegen.



Angoraziegen auf einer Farm bei Leakey, Texas, Dezember 1973. Foto: Marc St. Gil / U.S. National Archives, NAID 554932; uneingeschränkte Nutzung. Dies ist eine dokumentarische Aufnahme einer Herde, keine Abbildung der Versuche **BIO-010/012** und kein Beleg für die Wiederherstellung von Boden auf Bergbaufolgeland.

Im Verlauf der Arbeit weitete sich die ursprüngliche Frage aus. Ich musste verstehen, was mit Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Salzen geschieht; was mit dem Wasser passiert; wie lange die Entwicklung eines Bodensystems dauert; ob eine sehr kleine Menge natürlichen Bodens genutzt werden kann; ob sich ein Teil seiner mikrobiellen Gemeinschaft vermehren lässt; ob die Besiedlung vor der Ausbringung einen dauerhaften Vorteil bringt; wie viel die Wiederherstellung kosten könnte; und welche Rolle Tiere später spielen könnten.

Dieser Abschnitt erklärt, woher die Frage stammt; er belegt jedoch nicht die Antwort. Der persönliche Bericht endet hier. Von diesem Punkt an muss die Hypothese einer unabhängigen Prüfung anhand der Belege standhalten — einschließlich der Belege, die ihr widersprechen.

KARTE DER RECHERCHE

Hauptfrage

Gibt es Grund zu der Annahme, dass ein vorbesiedeltes organisches Material, das einer sekundären Reifung unterzogen wurde, einen **dauerhaften Vorteil** gegenüber demselben reifen Kompost ohne Vorbesiedlung oder gegenüber einer direkten Beimpfung nach der Anwendung auf dem Substrat bietet?

Kurze Antwort

SYNTHESE (SYNTHESIS). Einzelne Glieder der ursprünglichen Hypothese werden gestützt, und die vollständige Abfolge ist chemisch und biologisch plausibel. Ihr zentrales vergleichendes Versprechen — Vorbesiedlung → dauerhafter Vorteil unter Feldbedingungen — wurde jedoch nicht direkt geprüft. Nahe Analoga ersetzen keinen B/C/D/E-Vergleich. Auf einer gefährlichen oder physikalisch ungeeigneten Bergehalde darf die biologische Stufe erst beginnen, nachdem die ingenieurtechnische Sicherheitsfreigabe der Stufe Null erfolgt ist.

Ergebniskategorie	Kurze Antwort
Unterstützt	Nach der technischen Freigabe können qualifizierte organische Materialien, Pflanzen und Bodenbiota einzelne physikalische, chemische und biologische Funktionen verbessern; die Entwicklung eines Technosols und einer bodenbildenden Entwicklungspfad ist möglich.
Bedingt unterstützt	Reifer Kompost und einige Inokula können nützlich sein; eine kultivierbare Fraktion kann aus einer kleinen Spenderprobe hochskaliert werden; die Wirkung hängt vom Substrat, von Dosis, Wasser, Pflanzen, Zeit und Kontrollen ab.
Nicht unterstützt / kein direkter Beleg	Es hat sich nicht gezeigt, dass System E dauerhaft besser ist als B/C/D. Eine Begrünung ist nicht gleichbedeutend mit saniertem Boden. Ein kultiviertes Inokulum ist keine Kopie des gesamten Bodens. Ziegen initiieren keine Bodenbildung.
Bleibt unbekannt	Die optimale Zusammensetzung und Dosis, eine universelle Dosis an Spenderboden, Feldpersistenz, langfristige Wassersicherheit, die Kosten von System E und ob die Funktionen historischer Böden reproduziert werden können.

Was das vorgeschlagene Experiment testen würde

HYPOTHESE (HYPOTHESIS). Verglichen werden A–E und B-Zeit mit demselben reifen Material: A — mineralische Kontrolle; B — reifer Kompost; C — Kompost plus lebender Spenderboden; D — Kompost plus kultiviertes Inokulum; E — vorbesiedelter Kompost nach

sekundärer Reifung. Hinzu kommen Kontrollen mit inaktiviertem Material, Träger und AMF; gemessen werden Pflanzen, Wasser, Struktur, Mikrobiom und Persistenz. Das vollständige Design steht in Abschnitt 22.

Wo die Belege zu finden sind

Schlussfolgerung	PDF-Bereich	Quellen-IDs
Der biologischen Wiederherstellung geht die ingenieurtechnische Sicherheitsfreigabe der Stufe Null voraus	6	SUB-001 – SUB-006 , FAIL-003 , CASE-022 , KUZ-008
Der Pflanzenerfolg kann mit einer Verschlechterung der Wasserqualität einhergehen	11, 14	FAIL-001 , FAIL-004 , CASE-015/016
Eine lange Bodenentwicklung dauert Jahrzehnte; Einige Belege stammen aus Chronosequenzen	13, 15, 26	CASE-010/013/018/020/023/024
Der polnische Versuch ist eine enge Analogie und kein direkter Test des Systems E	17, 18	HYP-011
1 g des Spenderbodens ermöglichte die Skalierung der kultivierbaren Bakterienfraktion, reproduzierte jedoch nicht den gesamten Boden	19, 20	MIC-001
Das zentrale Versprechen der Vorkolonisierung wurde nicht getestet	17, 22, 27, 28	HYP-011 , MIC-001 und der geschlossene Korpus
Kusbass dient der Prüfung der Übertragbarkeit und nicht als Grundlage für eine globale Schlussfolgerung	23	KUZ-001 – KUZ-010
Angoraziegen spielen möglicherweise eine Rolle im Spätstadium, sind aber keine Technologie zur Bodenbildung	24	BIO-006 , BIO-010 – BIO-012
Bei den Wirtschaftsdaten handelt es sich um ein Szenariomodell, nicht um eine Schätzung für Apanas und nicht um die vollen Kosten für Kohle	25	ECO-003 – ECO-007

Diese Karte weist einen Weg durch das Dokument. Sie ersetzt nicht die Studiendesigns, Einheiten, Einschränkungen und bibliografischen Datensätze in den jeweiligen Abschnitten.

DIE RECHERCHE

So lesen Sie dieses Dokument

Dies ist ein evidenzbasiertes Dokument, kein ausführlicher Zeitschriftenartikel. Sein Zweck besteht darin, es zu ermöglichen, die Schlussfolgerungen des deutschen Webartikels zu überprüfen, Widersprüche, Einschränkungen und negative Ergebnisse zu erkennen und den Ursprung der Zahlen nachzuvollziehen.

Marker	Bedeutung
TATSACHE	Ein Ergebnis, das direkt von einer Quelle, Messung oder einem Dokument erfasst wird.
SYNTHESE (SYNTHESIS)	Die Schlussfolgerung der Autoren aus mehreren Quellen; keine einzige Messung.
HYPOTHESE (HYPOTHESIS)	Eine überprüfbare Aussage, für die noch kein direktes Vergleichsexperiment gefunden wurde.
SZENARIOMODELL (SCENARIO MODEL)	Eine Berechnung unter expliziten Annahmen; keine Schätzung für einen realen Standort.
UNBEKANNT (UNKNOWN)	Das Korpus lässt keine verlässliche Antwort zu.

Die Kurzformel des Projekts lautet: **Der Artikel erzählt die Geschichte; das PDF belegt oder widerlegt.**



Tagebaulandschaft im Kusbass, 2. Januar 2019. Foto: Natalia Zubkova. Die Aufnahme dokumentiert sichtbare Reliefveränderungen im Winter; sie belegt weder Substratchemie noch Eigentum, Stilllegungsstatus oder ökologische Wiederherstellung.

1. Kurze Antwort

SYNTHESE (SYNTHESIS). Der historische Boden, der vor dem Bergbau bestand, lässt sich nicht nach einem Rezept neu mischen. Möglich ist es, ein sicheres physikalisches und chemisches Fundament zu schaffen, qualifizierte organische Materialien, Pflanzen und ausgewählte biologische Komponenten hinzuzufügen und anschließend zu prüfen, ob dauerhafte Wasser-, Kohlenstoff-, Nährstoff- und Bodenbildungskreisläufe entstehen. Erfolg bedeutet, Funktionen und einen Entwicklungspfad wiederherzustellen – nicht eine Kopie des früheren Zustands herzustellen.

Ergebniskategorie	Was das Korpus zeigt
Unterstützt	Organische Materialien können einzelne physikalische, chemische und biologische Indikatoren verbessern; Pflanzen, Wurzeln, Mikroorganismen und Fauna können im Laufe der Zeit auf einem sicheren Substrat Strukturen und interne Zyklen bilden.
Bedingt unterstützt	Vorkolonisiertes reifes Material ist chemisch und biologisch plausibel; Kulturen können aus einer kleinen Spenderprobe etabliert werden, und auf konstruierten Substraten existieren enge Analoga.
Nicht unterstützt	Kompost beseitigt weder Verbrennung noch Instabilität, unkontrollierte Säurebildung oder gefährliche Hydrologie; Vegetationsdeckung allein belegt keine Wiederherstellung; eine kultivierbare Fraktion ist keine Kopie des gesamten Bodens; Ziegen setzen keine Bodenbildung in Gang.
Unbekannt	Ob vorbesiedelter reifer Kompost einen dauerhaften Vorteil gegenüber demselben reifen Kompost ohne Vorbesiedlung oder gegenüber direkter Inokulation hat; wie viel Inokulum je Hektar erforderlich ist; ob ein Vorteil über Jahrzehnte bestehen bleibt.

Haupturteil zur Hypothese: durch nahe Analoga teilweise gestützt; chemisch und biologisch plausibel, doch ihr zentrales vergleichendes Versprechen wurde nicht geprüft.

2. Forschungsfrage

Natalias ursprüngliche Hypothese hat eine sequentielle Form:

Sichere organische Ströme → kontrollierte Kompostierung → reifes Material → ein kleines biologisches Inokulum → sekundäre Reifung → vorbereitetes technogenes Substrat → Pflanzen → interne biologische Kreisläufe → verringerte Abhängigkeit von externen Einträgen.

Die Hauptfrage ist vergleichender Natur: **Gibt es Grund zu der Annahme, dass diese Sequenz einen dauerhaften Vorteil gegenüber normalem reifem Kompost oder direkter Inokulation bringt?** Die Frage ist nicht nur, ob Pflanzen in der ersten Saison wachsen. Gefordert sind Wassersicherheit, Beständigkeit, strukturelle Entwicklung und ein sinkender Bedarf an wiederholten Eingriffen.

HYPOTHESE (HYPOTHESIS). Der zentrale Übergang – `pre-colonisation → persistent advantage` – muss durch einen direkten Vergleich der Systeme B/C/D/E ermittelt werden. Im geschlossenen Korpus wurde kein solches Experiment gefunden.

3. Methode

FAKT. Die Suche wurde nicht nach dem einzelnen Wort „Kompost“ organisiert, sondern nach Evidenzgruppen: Ausgangssubstrat und ingenieurtechnische Sicherheitsfreigabe der Stufe Null; organische Stoffströme; Kompostierung und Reife; C/N/P/pH, Salze und Metalle; Wasser; Bodenbiologie; langfristige Feldfälle; Technosole; kultivierte und Mikrobiome vollständiger Böden; Mykorrhiza; Weiden; Übertragbarkeit nach Kusbass; und Wirtschaft.

3.1. Quellenhierarchie

Vorrang hatten primäre Feldstudien, langfristige Wiederholungsuntersuchungen, randomisierte Vergleiche, offizielle technische Dokumente und Originaldaten. Übersichtsarbeiten dienten der Kartierung des Fachgebiets, ersetzten jedoch keine Primärarbeit, wenn eine Schlussfolgerung von einer Zahl abhing. Von der Autorin bereitgestellte Belege dienten nur dazu, den Ursprung der Idee festzuhalten, das Solarkraftwerk Maiminskaya zu beschreiben und Szenarioannahmen zu begründen; sie wurden nicht als unabhängige Bestätigung einer wissenschaftlichen Wirkung gewertet.

3.2. Einschlusskriterien

Studien wurden in die Synthese einbezogen, wenn sie die Antwort in mindestens einer Hinsicht veränderten: Kausalvergleich, negatives Ergebnis, wasserbezogene Messgröße, eine Dauer von mindestens mehreren Jahren, ein direktes Analogon der Hypothese, lokale Übertragbarkeit oder ein quantitativer Modellparameter. Die Dosen wurden mit ihrer ursprünglichen Einheits- und Massenbasis beibehalten; Die Berechnungen der Nassmasse und der Trockenmasse wurden nicht zusammengeführt.

3.3. Negative Ergebnisse und Langzeitbelege

Eine positive Pflanzenreaktion konnte die Verschlechterung der Wasserqualität, N-Verluste, Metallmobilisierung oder mangelnde Persistenz nicht aufheben. Chronosequenzen wurden getrennt von Längsschnittstudien gekennzeichnet. Veröffentlichungen aus einem Programm oder Experiment wurden in einer Evidenzfamilie zusammengefasst und nicht als unabhängige Bestätigungen gezählt.

3.4. Hinreichende Beleglage und Abschluss der Suche

Das Korpus wurde nicht geschlossen, da alles auf der Welt gelesen worden war. Die Suche wurde beendet, als die Hauptfragen entweder für eine begrenzte Schlussfolgerung ausreichten oder zu klar formulierten experimentellen Lücken wurden. Das Scheitern, ein direktes Analogon zu finden, wird nicht als Beleg für eine weltweite Neuheit angesehen.

UNBEKANNT (UNKNOWN). Die Formel „im zusammengestellten und geschlossenen Korpus wurde keine direkte Studie gefunden“ bedeutet nicht, dass „es nie eine solche Studie gegeben hat“. Es definiert die Grenzen der durchgeführten Suche, nicht den absoluten Stand der Weltliteratur.

Zum maschinellen Lesen dieses Dokuments

Unter **KI-vermitteltem Lesen** versteht man die Sequenz `Dokument → KI → Mensch`: Eine Person gibt einer KI ein großes Dokument und bittet sie, bestimmte Informationen zu finden, zu extrahieren, zu prüfen, zusammenzufassen oder zu erklären. Dies beschreibt das Leseszenario; es ist nicht der Name der Methode.

Die Belegebene wird mithilfe von **ElepiCup (der Methode „Elefant in der Tasse“)** organisiert. Die umfangreiche Quelle ist der Elefant; die Tasse ist der begrenzte Kontext, der der KI für eine bestimmte Antwort zur Verfügung steht. Die Methode strukturiert ein Dokument so, dass ein extrahierter Anspruch seine Herkunft, seinen Belegstatus, seine Bedingungen, Einheiten, seinen Vergleichsmaßstab, seine Einschränkungen und seine Unsicherheit so weit wie möglich beibehält.

Autorin der Methode: Natalia Zubkova.

Sergey Nikolaevich Severin und Viktor Andreevich Svetlov waren an der Entwicklung und Anwendung der Belegarchitektur dieser Untersuchung beteiligt, sind jedoch nicht Autoren der Methode „Elefant in der Tasse“.

Das Grundprinzip lautet: **Ein Stück des Elefanten darf sich nicht als der ganze Elefant ausgeben.** Eine Behauptung wird daher, wo immer möglich, neben ihrem Status, ihrer Quelle, ihren Einheiten, Bedingungen, Einschränkungen und Gegenbelegen aufgeführt. Die KI sollte nicht nur die Antwort finden, sondern auch die Grenzen dieser Antwort.

Vorgesehen sind zwei Modi: **Vollmodus** — eine strikte Belegarchitektur; und **Light-Modus** — ein menschlicher Erzähltext, in dem Einschränkungen neben wichtigen Aussagen stehen und mit der Belegebene verknüpft bleiben. Dieses PDF ist die erste Implementierung des Vollmodus der Methode.

ElepiCup wird nicht als nachweislich wirksam, absolut neuartig, als weltweit erste Methode dieser Art, als anerkannter wissenschaftlicher Begriff oder als etablierte Disziplin dargestellt. Seine Wirksamkeit muss noch im Rahmen des Experiment-Projekts getestet werden. Das Problem überschneidet sich mit maschinellm Informationsabruf, Retrieval-Augmented Generation (RAG) und der Optimierung von Material für generative Systeme, aber die konkrete praktische Aufgabe besteht hier darin, die Evidenzbedeutung zu bewahren, wenn eine Antwort eine KI durchläuft.

Sprachregel der Methode. Kritische Einschränkungen werden in der Hauptsprache des Dokuments formuliert. In dieser deutschen Ausgabe sind die Einschränkungen auf Deutsch formuliert; Über alle Sprachausgaben hinweg müssen Bedeutung, Belegstatus, Source ID und Evidenzgrenze gleich bleiben.

4. Belegkorpus

FAKT. Das eingefrorene Register V1.0 enthält 129 Quelldatensätze, darunter drei ergänzte Datensätze zu Abraumfaktoren. Das ursprüngliche geschlossene Register umfasste 126 Datensätze: 35 CASE, 12 BIO, 11 HYP, 10 ORG, 10 KUZ, 9 MIC, 6 CHEM, 6 SUB, 5 FAIL, 5 PAP, 4 SAN, 4 ECO, 3 REG, 3 AUTH, 2 EXP und 1 FLOW. Das lokale Archiv enthält 33 PDF-Dateien und 33 Textextraktionen; das bedeutet nicht, dass es sich um 33 unabhängige Studien handelt, da einige Dateien derselben Evidenzfamilie angehören.

Die wichtigsten Fälle stammen aus den Vereinigten Staaten, Kanada, dem Vereinigten Königreich, Deutschland, Tschechien, Polen, Kolumbien, Chile, Brasilien, Südafrika, Indien, China, Australien und Russland. Die Laufzeiten reichen von Wochen und Monaten bis zu 65 Jahren; bei den längsten Entwicklungspfaden handelt es sich häufig um Chronosequenzen und nicht um Beobachtungen eines einzigen Ortes über den gesamten Zeitraum.

Korpuseinschränkung. Dies ist ein gezielt zusammengestellter Belegkorpus für die gestellte Frage, keine systematische Übersichtsarbeit mit vollständiger Registrierung sämtlicher Veröffentlichungen und keine Metaanalyse.

5. Was die Wiederherstellung der Bodenfunktionen bedeutet

Der Boden ist nicht die Summe aus Gesteinsfragmenten, organischem Material und Dünger. Für eine funktionelle Wiederherstellung ist Folgendes gleichzeitig erforderlich:

- ein stabiles, poröses, wurzelfähiges Medium;
- Wasser, das ohne zerstörerische Erosion oder gefährliche Verschmutzung ein- und austritt;
- beherrschbarer Säure- und Salzgehalt;
- C-, N- und P-Zyklen ohne chronische Verluste;
- Wurzeln, mikrobielle Biomasse und Fauna;
- Bildung von Aggregaten und organisch-mineralischen Verbänden;
- Widerstandsfähigkeit gegenüber Jahreszeiten und Extremereignissen;
- die Fähigkeit, seinen Weg ohne kontinuierliche große externe Einträge fortzusetzen.

SYNTHESE (SYNTHESIS). Die wiederhergestellte grüne Deckung ist ein Ergebnisindikator. Ein Wiederherstellungsverlauf ist die koordinierte Veränderung vieler Ergebnisindikatoren im Laufe der Zeit.

Boden ist keine Mischung von Bestandteilen

Mischen Sie Gesteinsbrocken, Kompost und Dünger und das Ergebnis ist ein Substrat. Es wird nicht im Moment der Vermischung zu Boden, sondern wenn miteinander verbundene Prozesse entstehen und darin fortbestehen:

- Wasser dringt ein, wird zurückgehalten und verlässt es ohne zerstörerische Erosion oder Verschmutzung;
- Wurzeln bilden Poren, setzen lösliche Verbindungen frei und hinterlassen Rückstände;
- Mikroorganismen mineralisieren einen Teil der organischen Substanz und bauen ihre eigene Biomasse auf;
- Zersetzungsprodukte und mikrobielle Rückstände binden sich an mineralische Oberflächen oder werden in Aggregaten eingeschlossen;
- N und P bewegen sich zwischen organischen, mineralischen und lebenden Pools;
- Pflanzen führen neue Biomasse und Streu zurück;
- Bodentiere zerkleinern und verlagern Material;
- Das System übersteht saisonale und extreme Ereignisse ohne weiteren großen externen Einfluss.

Die zentrale Hypothese dieser Untersuchung lautet daher nicht „Kompost schafft Boden“, sondern „ein richtig aufgebautes Startsystem kann von der externen Zufuhr zum internen Kreislauf übergehen“.

6. Stufe Null: Sicherheit zuerst

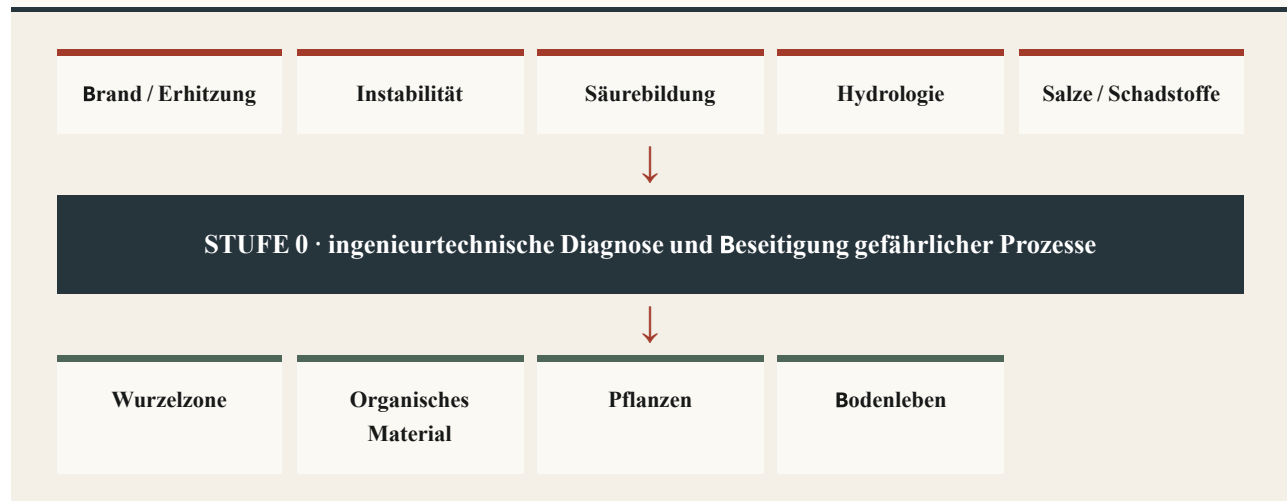


Abbildung 1. Stufe 0 trennt die ingenieurtechnische Sicherheit von der biologischen Wiederherstellung. Eigene Darstellung auf Grundlage von SUB-002/003/005/006 und CASE-022/033.

SYNTHESE (SYNTHESIS). Die biologische Wiederherstellung beginnt erst nach technischer Genehmigung. Ansonsten ist die Wahl von Kompost wie die Wahl einer Tapete für ein Haus, in dem das Feuer noch nicht gelöscht ist.

Risiko	Mechanismus	Konsequenz für die biologische Phase	Vorherige Aktion
Brennende oder selbsterhitzende Bergehalde	Oxidation von Restkohlenstoff; Freisetzung von Gasen und Wärme	Absterben von Wurzeln und Organismen; erneute Schädigung der Deckschicht	Thermische Diagnose, Lokalisierung von Hotspots, Einschränkung des Sauerstoffzugangs, Löschkonzeption und Nacharbeitsüberwachung
Instabile Landform	Bewegung, Erosion, Erdbeben und Bodensenkungen	Zerstörung der Wurzelzone und hydrologische Gestaltung	Geotechnische Beurteilung, Neugestaltung, stabile Böschungen und Entwässerung
Säurebildung	Oxidation von Pyrit und anderen Sulfiden	Niedriger pH-Wert, Fe- und Sulfatflüsse, Mobilisierung von Metallen	Säure-Base-Bilanzierung, Quellenkontrolle, Isolierung/Neutralisierung und langfristige Wasserüberwachung
Unsichere Hydrologie	Unkontrollierter Oberflächenabfluss, Infiltration und Sickerwasser	Verluste von Nährstoffen, DOC und Metallen; Verschmutzung über den Standort hinaus	Wasserhaushalt, Entwässerung, Erfassung und Aufbereitung, Monitoring unterhalb des Standorts
Starker Salz- oder Natriumgehalt	Osmotischer Stress, Ausbreitung und Strukturkollaps	Geringe Keimung, schlechte Infiltration und Ionentoxizität	EC/SAR/Ionenanalyse; Auswaschung oder Korrektur nur dort, wo ein sicherer Wasserweg vorhanden ist

Risiko	Mechanismus	Konsequenz für die biologische Phase	Vorherige Aktion
Mobile Giftstoffe	Lösliche oder bioverfügbare Metalle und organische Verunreinigungen	Risiken für Pflanzen, Wasser, Tiere und Nahrungsketten	Speziesanalyse, Auslaugungstests, Entfernung oder Immobilisierung der Quelle und Ausschlusskriterien

Wichtigste Schlussfolgerung

Eine „Bergehalde“ ist kein einzelnes Substrat. Derselbe Kompost kann eine nützliche Ergänzung in einem stabilen, ungiftigen, groben Material sein, dem es an Feinerde mangelt, und ein umweltgefährdender Fehler auf einem brennenden, pyrihaltigen, salzhaltigen oder geotechnisch instabilen Standort.

Ein organischer Bodenverbesserer kann erst dann in einen Feldversuch aufgenommen werden, wenn er zwei aufeinanderfolgende Tore passiert hat:

1. **technische Sicherheit** – Gefälle, Hitze, Gas, Erosion, Hydrologie und physikalische Stabilität;
2. **Geochemische Kompatibilität** – Säurebildendes Potenzial, Salze, potenziell toxische Elemente und die Reaktion ihrer Mobilität auf hinzugefügten DOC oder eine Veränderung des pH-Werts.

Arbeitstypologie

Substratklasse	Diagnosezeichen	Erforderlich vor dem Auftragen von organischem Material	Rolle organischer Materialien nach der Räumung	Grundurteil
Aktiv brennender oder erhitzter kohlenstoffhaltiger Abraum	Temperaturanomalie, Rauch/Gas, Senkung, Oxidationszonen	Lokalisieren Sie den Hotspot. Wärme und Gas überwachen; Ingenieur beim Löschen/Isolieren; Stabilität bestätigen	Erst möglich, nachdem der aktive Prozess beendet und der Standort neu bewertet wurde	Nicht anwenden
Geotechnisch instabiler Hang	Bewegung, Steilwände, Steinschlag, Unterspülung, instabiles Kippen	Reprofilieren, entwässern, Erosion kontrollieren und Stabilität berechnen	Kann die Oberflächenstruktur verbessern, jedoch nicht die Tragfähigkeit	Engineering zuerst
Potenziell säureerzeugendes sulfidisches Material	Sulfid S, negatives NNP/ABA, saure Entwässerung, Fe/Al/SO ₄	Kontrollieren Sie die Quelle: Begrenzen Sie Sauerstoff und Wasser; Abdeckungen und Wasser verwalten oder eine Langzeitbehandlung durchführen; Führen Sie kinetische Tests durch	Im Rahmen eines validierten Deckungssystems möglich, jedoch nicht als Ersatz dafür	Nur fachplanerischer Auslegung
Sauer, aber nicht mehr aktiv säurebildend	Niedriger pH-Wert, begrenzte Neutralisierungskapazität, Al/Mn-Toxizität	Kalk oder Puffer; Test P-Sorption und -Auslaugung; Wasser überwachen	Reifer Kompost kann C, CEC, Struktur und Biota liefern	Bedingt vielversprechend

Substratklasse	Diagnosezeichen	Erforderlich vor dem Auftragen von organischem Material	Rolle organischer Materialien nach der Räumung	Grundurteil
salzhaltig oder sodisch	Hoch EC; für Sodizität, SAR/ESP und Dispersion	Ermitteln Sie die Salzquelle und ob eine sichere Entwässerung oder Auswaschung möglich ist; Verwenden Sie eine separate Ca-Bodenverbesserungsstrategie für Sodizität	Einige Komposte, Gärreste oder Gülle können noch mehr Salze enthalten	Hohes Risiko
Enthält Metalle oder Metalloide	Gesamtgehalt und auslaugbare Formen von Metallen/Metalloiden; ungünstige Spezies	Standortspezifische pH-/DOC-, Auslaugungs- und Ökotoxizitätstests; nicht allein anhand der Gesamtkonzentration entscheiden	Organische Materialien können Metalle binden, aber über DOC und pH auch As oder andere Elemente mobilisieren	Nur nach Prüfung
Alkalisch, kalkhaltig oder aschereich	Hoher pH-Wert, CaCO ₃ oder Asche; Mangel an verfügbaren Phosphor- und Mikronährstoffen	Identifizieren Sie Nährstoffbeschränkungen und das Risiko von Sodizität oder Versalzung	Organische Materialien können die Aggregation und den mikrobiellen Kreislauf verbessern; Überschüssiges P löst die Ca-Fixierung nicht	Standortabhängig
Stabil, grob, mangelhaft an Feinerde	Hoher Steingehalt, geringe Wasserhaltekapazität, ungünstiger Wasserhaushalt	Schaffen Sie ein durchwurzelbares physikalisches Medium: Feinerde oder Lehm, Mikrotopographie und lockere Platzierung	Sauberer reifer Kompost kann C, Nährstoffe und biologisches Substrat hinzufügen	Hauptkandidat
Überverdichtetes Material	Hohe Lagerungsdichte und Durchdringungsfestigkeit; geringe Porosität und Infiltration	Tiefes Aufreißen oder loses Verlegen ohne erneute Verdichtung	Organisches Material allein durchbricht keine mechanische Barriere	zuerst die physikalische Struktur
Bereits mit fruchtbarem Oberboden bedeckt	Vorhandene Samenbank, Unkraut, mögliche Verdichtung und Erosion	Bewerten Sie die Qualität und Tiefe der Schicht, Schäden an der Spenderstelle und die Unkrautbelastung	Zusätzlicher Kompost kann zu viel sein; Das biologische Ziel ist wichtiger als die Masse	nicht automatisch die beste Lösung

Mindestdatensatz vor einem Versuch

Ingenieurtechnik und Wasser

- digitales Höhenmodell, Neigung, Ausrichtung und Mikrotopographie;
- Hangstabilität und Bewegungsspuren;
- Temperatur mit Tiefenmessung, Wärmeabgabe und ggf. Grubengasen;
- Einzugsgebietsgrenzen, Infiltration, Oberflächenabfluss und Sedimentwege;
- saisonale Basisdaten für Oberflächenwasser und Grundwasser;
- Lagerungsdichte, Eindringwiderstand, Porosität, Partikelgrößenverteilung, Feinerdanteil und Wasserhaltevermögen mit der Tiefe.

Geochemie

- Lithologie und Mineralogie, einschließlich Schwefelformen;
- Gesamtschwefel, Säure-Base-Bilanzierung und, wenn Unsicherheit besteht, kinetische Tests;
- pH- und EC-Wert bei einem standardisierten Feststoff-Wasser-Verhältnis;
- SAR/ESP, wo Sodizität möglich ist;
- Gesamtgehalt und auslaugbare Formen potenziell toxischer Elemente;
- DOC-empfindliche Auslaugung von Materialien, in denen organische Stoffe die Elementmobilität verändern können;
- Gesamt-C, getrennt in fossiles/kohlebasiertes, Carbonat und modernes organisches C;
- Mineral- und Gesamt-N-, P-Fraktionen und Sorption, K und CEC.

Warum eine einzelne „Humus“-Messung nicht ausreicht

Im Kohleabraum kann das Gesamt-C kohlenstoffhaltige Partikel enthalten, die nicht der modernen organischen Substanz des Bodens entsprechen. In der KUZ-006 -Monographie werden Kohlenstoffgehalte von 0,5–25 % im Gestein ausdrücklich angegeben und gleichzeitig auf dessen geringe biologische Verfügbarkeit hingewiesen. Der Erfolg kann daher nicht als Steigerung einer einzelnen Gesamt-C-Messung berechnet werden. Es sind mindestens Korrekturen für anorganisches C und aus Kohle gewonnenes C erforderlich, zusammen mit SOC, POM/MAOM in einer Teilprobe, mikrobieller Biomasse und Atmung sowie tatsächlichen C-Flüssen durch Pflanzen und Streu.

Basis

- SUB-003 : GARD 2024 – physikalische Stabilität untermauert chemische Stabilität; Die Quellenkontrolle von Sulfiden steht an erster Stelle.
- FAIL-003 : Organische Materialien haben die durch Pyritoxidation verursachten Flüsse in einem pyritischen Haldenmaterial nicht beseitigt.
- KUZ-003 : Die Begrünungsrate hing von Feuchtigkeit, Verwitterung, Mikrotopographie und Feinerde ab, nicht nur vom Alter.
- KUZ-005 : Selbst zwanzig Jahre alte Standorte blieben hinsichtlich Steinigkeit, Dichte und Porosität äußerst heterogen.
- KUZ-006 : Monolithische Blöcke könnten in einer Tiefe von 10–20 cm auf 30–40 Jahre alten Bergehalden bestehen bleiben; Feinerde machten nur 5–30 % aus.

Was dieses Tor nicht behauptet

- dass organische Bodenverbesserer nutzlos sind;
- dass jeder saure oder metallhaltige Standort für immer ausgeschlossen ist;
- dass es immer falsch ist, eine fruchtbare Oberbodenschicht aufzutragen;
- dass die Laborsicherheit einer Charge die Feldsicherheit gewährleistet;
- dass eine Begrünung nach der Rodung automatisch bedeutet, dass sich Boden gebildet hat.



Bergehalde Apanas, Kusbass. Bild bereitgestellt von Natalia Zubkova. Fotograf und Aufnahmedatum sind unbekannt; die Aufnahme zeigt den sichtbaren Zustand des Standorts zum Zeitpunkt der Aufnahme, belegt jedoch weder Temperatur noch Emissionszusammensetzung oder den Mechanismus innerer Prozesse.



Bergbaufolgelandschaft im Kusbass, 20. Januar 2019. Foto: Natalia Zubkova. Die Aufnahme dokumentiert sichtbare Geländeformen und Vegetation unter Schnee; sie belegt weder Bodenprofilentwicklung noch geochemische Sicherheit oder Wiederherstellungserfolg.

7. Städtische organische Stoffströme

FAKT. „Organisches Material“ ist kein einzelnes Material. Nutzen und Risiko werden durch die Herkunft der Charge, Feuchtigkeit, Schadstoffe, Reifegrad und Dosis bestimmt.

Städtische Stoffströme

Strom	Mögliche Funktion	Hauptbeschränkungen	Minimale Verarbeitung und Qualitätskontrolle	Vorläufiger Stand für einen Nachbergbau-Feldversuch
Herkunftsgetrennte Obst- und Gemüsereste	Leicht zersetzbares C, N, P und K; Rohstoff für Kompostierung oder anaerobe Vergärung (AD)	Salz, Plastik, Glas, Verpackung, Geruch, Krankheitserreger	Quellentrennung; Auspacken; Kompostierung oder AD mit anschließender Behandlung; Reife- und Schadstoffprüfung	Nach der Behandlung vielversprechend, aber nicht frisch
Gemischte Lebensmittelabfälle	Organisches C und Nährstoffe	Fette, Fleisch, Salz, Verpackung, PFAS-führendes Lebensmittelgeschirr, hohe Feuchtigkeit	Strenge Eingangskontrolle und Auspacken; sanitäre Behandlung	Bedingt nur als kontrollierter Kompost oder Gärrest geeignet
Markt- und Einzelhandelsabfälle	Möglicherweise relativ homogene Pflanzenchargen	Verpackung und Rückverfolgbarkeit	Getrennte Sammlung vor der Vermischung mit dem kommunalen Strom	Einer der besten städtischen Kandidaten, wo der Stoffstrom sauber ist
Blätter	C, Struktur und Masse	Metalle und Staub am Straßenrand, Abfall, Pestizide, hoher C:N-Gehalt	Getrennte Sammlung nach Zonen; vorläufige Kontaminationsbewertung; Mitkompostierung	Vielversprechend; Laub am Straßenrand darf nicht automatisch mit dem Rest vermischt werden
Grasschnitt	N, Feuchtigkeit und schnelle Zersetzung	Verschleppung von Herbiziden, einschließlich Clopyralid, Aminopyralid und Picloram; Verdichtung und anaerobe Bedingungen	Behandlungsgeschichte und Pflanzenbioassay; mit einem C-reichen Füllstoff mischen	Vielversprechend nur aus nachvollziehbarer Quelle
Gartenabfälle	Eine C/N-Mischung für Kompost	Plastik, Pestizide, invasive Ausbreitung	Sortierung; thermophile Kompostierung; Reife- und Keimungstests	Vielversprechend
Hackschnitzel und Schnittholz	Langsam zersetzendes C, Porosität, Quellung, Pilzsubstrat	Sehr hohe C:N- und N-Immobilisierung; behandeltes Holz; Partikelgröße	Ausgenommen sind lackiertes und imprägniertes Holz; nach einem definierten Rezept mixen	Als Komponente vielversprechend, aber nicht als alleiniger „Dünger“

Strom	Mögliche Funktion	Hauptbeschränkungen	Minimale Verarbeitung und Qualitätskontrolle	Vorläufiger Stand für einen Nachbergbau-Feldversuch
Ungestrichenes Papier und Karton reinigen	Cellulose-C und Füllstoffe	N-Immobilisierung; Tinten, Klebstoffe, Klebeband, Kunststofffenster	Nur rückverfolgbarer sauberer Stoffstrom; Verbundwerkstoffe entfernen; Co-Kompost	Als C-Komponente bedingt geeignet
Lebensmittelkontaktiertes, beschichtetes oder laminiertes Papier	Theoretische Quelle von C	PFAS, Kunststoff, Beschichtungen, Klebstoffe, Tinten	Nicht ohne nachgewiesene chemische Zusammensetzung annehmen	Vom Basisexperiment ausschließen
Kommunaler Kompost	Stabilisiertes C, Nährstoffe und Inokulum	Die Qualität wird durch den Rohstoff bestimmt; Salze, Glas, Kunststoff, PFAS und Reife	Vollständiges Zertifikat und unabhängige Probenahme; Atmung, Keimungsindex (GI), EC, Nährstoffe, Metalle, PFAS und physikalische Verunreinigungen	Mögliche Hauptbehandlung nach der Qualifikation
Gärreste aus sauberen Nahrungsmitteln oder Pflanzenströmen	NH ₄ -N, P, K und Rest C	Hochverfügbares N, EC, Geruch, Krankheitserreger und Kunststoff	Rückverfolgbarkeit der Rohstoffe; Pasteurisierung oder anschließende Kompostierung; Nährstoffhaushalt	Keine Grundbehandlung ohne anschließende Bearbeitung; mögliche getrennte Behandlung
Klärschlamm	N, P und organische Stoffe	PFAS, Arzneimittel, Hormone, Metalle, Krankheitserreger, antimikrobielle Resistenzgene (ARGs), Mikroplastik	Die Hygieneklasse allein reicht nicht aus; Quellenkontrolle, PFAS-Analyse und ein erweitertes Kontaminantenpanel sind erforderlich	Nicht in den ersten sicherheitsorientierten Feldversuch einbeziehen, ohne dass es einen speziellen Risikobewertungspfad gibt
Struvit oder ein gereinigtes Phosphorprodukt	Konzentriertes P und teilweise N und Mg	Liefert fast kein C oder Struktur; Qualität hängt vom Prozess ab	Einhaltung der Produktnormen, P-Balance und Abflusskontrolle	Zur gezielten Nährstoffkorrektur möglich, jedoch nicht als bodenbildende Ergänzung

Aus der Quelle getrennte pflanzliche Nahrungsrückstände, Blätter, Gras-, Garten- und Holzurückstände sowie qualifizierte, saubere Zellulosematerialien kommen sicheren Basisströmen am nächsten. Klärschlamm, Gärreste, rückgewonnene Nährstoffe und Industrierückstände erfordern separate Risikoschleusen.

8. Landwirtschaftliche organische Stoffströme

Landwirtschaftliche Stoffströme

Strom	Mögliche Funktion	Hauptbeschränkungen	Minimale Verarbeitung und Qualitätskontrolle	Vorläufiger Stand
Ziegenmist	C, N, P und K; normalerweise ein festes Material	Die Zusammensetzung hängt stark vom Futter und der Einstreu ab; Medikamente, Salze und Unkrautsamen	Chargenanalyse; Medizin- und Futtermittelgeschichte; Kompostierung; Herbizid-Übertragungs-Bioassay	Vergleichen Sie als Ausgangsmaterial; nicht automatisch die beste Lösung
Schafmist	C, N, P und K	Die gleichen Einschränkungen; mögliche Anthelminthika-Rückstände und Auswirkungen auf die Dungfauna	Die gleichen Kontrollen; getrennt vom Ziegenmist analysieren	Vergleichen Sie separat
Rindermist	Großes verfügbares Volumen, C und Nährstoffe	Hoher Wassergehalt der Gülle; NH ₄ Verlust und Auswaschung; Medikamente; Logistik und Verdichtung	Trennen Sie feste und flüssige Fraktionen; Kompostierung oder AD; Chargenanalyse	Geeignet ist festes kompostiertes Material
Pferdemist	C-reiche Bettungsmischung und Strukturmaterial	Unkrautsamen; persistente Herbizide aus Heu; variable Einstreu	Geschichte von Heu und Herbiziden; Pflanzenbioassay; thermophile Kompostierung	Kandidat nur mit rückverfolgbarem Futter
Geflügelstreu	Hohe Nährstoffdichte	Schnelles N, überschüssiges P, Salze, Ammoniak und Krankheitserreger	Kompostierung; N/P/Salz-Balance; niedrige Dosen	Keine Hauptbehandlung; hohes Überlastungsrisiko
Stroh	C, Struktur und Masse	N-Immobilisierung, Pestizide und langsamer Abbau	Sauberer Ursprung; Nach einem C:N-Rezept mischen	Gute Kompost-Rezeptkomponente
Ernterückstände	C und Nährstoffe	Pestizide, Krankheiten und Unkraut verbreiten sich	Sortieren und kontrollierte Kompostierung	Kandidat
Landwirtschaftlicher Kompost	Stabilisierte Mischung aus Rohstoffen	Hängt vollständig vom Ausgangsmaterial und vom Prozess ab	Die gleiche vollständige Qualitätskontrolle wie bei kommunalem Kompost	Mögliche Hauptbehandlung
Landwirtschaftlicher Gärrest	Schnell verfügbare Nährstoffe	Salze, Ammoniak, Tierarzneimittel, antimikrobielle Resistenzgene (ARGs), aus Rohstoffen gewonnenes Mikroplastik	Rückverfolgbarkeit; Behandlung; Schadstoff- und Nährstoffanalyse	Separate Behandlung mit höherem Risiko, nicht gleichbedeutend mit Kompost

Strom	Mögliche Funktion	Hauptbeschränkungen	Minimale Verarbeitung und Qualitätskontrolle	Vorläufiger Stand
Pflanzkohle aus sauberen Rohstoffen	Porosität, Auswirkungen auf Wasser und CEC, persistentes C, Sorption	Die Eigenschaften hängen vom Ausgangsmaterial und der Temperatur ab; PAKs und Metalle; möglich Als Mobilisierung; kosten	Rohstoff- und Prozesszertifikat; pH, EC, Asche, PAKs und Metalle; Standortspezifischer Auslaugungstest	Nur in Kombination möglich; kein universeller Ersatz für Kompost

8.1. Mist: Die Tierart entscheidet nicht alles

1. Empirische Laborzusammenfassung der Utah State University (USU), 2005–2019

Die folgenden Werte sind Mittelwerte für Proben, die an das Analyselabor der Utah State University geschickt wurden. N, P₂O₅ und K₂O sind Prozentsätze des Materials im Lieferzustand; EC ist in dS/m.

Material	N, %	P ₂ O ₅ , %	K ₂ O, %	pH-Wert	EC	Feuchtigkeit, %	C:N
Fester Rindermist	0.9	0.6	1.1	8.3	8	53	13
Fester Milchviehmist	0.8	0.5	1.2	8.0	10	68	15
Fester Ziegenmist	0.4	0.5	0.1	8.3	1	64	31
Fester Schafmist	1.0	0.5	1.0	8.3	7	53	25
Fester Pferdemist	0.7	0.4	1.1	8.7	3	40	17
Kompost aus Rindermist	1.1	0.9	1.3	8.5	4	28	12
Kompost aus Milchviehmist	1.0	0.7	1.5	8.5	8	39	12
Ziegenmistkompost	1.0	0.9	1.9	8.4	5	54	10
Kompost aus Schafmist	1.0	1.1	1.3	8.0	3	39	15
Pferdemistkompost	0.7	0.3	0.9	8.6	4	37	28

Diese Paare dürfen nicht als „Vorher/Nachher“-Messungen derselben Pfähle gelesen werden: Es handelt sich um unterschiedliche Stichprobenpopulationen. Sie zeigen echte Schwankungen im Strom an, keinen Umrechnungsfaktor.

2. Kontrolliertes Experiment von Faverial et al. (2016)

In einem Experiment unterschieden sich die Rohstoffe bezogen auf die Trockenmasse wie folgt:

Rohstoff	pH-Wert	C:N	Gesamt-C, % Trockenmasse	N, % Trockenmasse	P, % Trockenmasse	K, % Trockenmasse
Rindermist	7.7	21.0	37.8	1.8	0.5	1.4
Pferdemist	8.0	19.2	32.7	1.7	0.8	1.4
Ziegenmist	8.0	20.2	42.5	2.1	0.8	2.5
Geflügelstreu	6.5	10.2	43.1	4.2	0.9	2.5
Grüner Abfall	6.1	27.5	44.1	1.6	0.3	1.3

Hier war Ziegenmist nährstoffreicher als die USU bedeutet. Das ist kein Widerspruch, den man „wegrechnen“ kann: Futter, Einstreu, Klima, Lagerung und die Berechnungsgrundlage – Trocken- oder Nassmasse – waren unterschiedlich. Tierarten sind daher nur der Anfang einer materiellen Beschreibung.

3. Was sich bei der Kompostierung ändert

Im Faverial-Experiment:

- anfänglicher $\text{NH}_4\text{-N}$ betrug 430 mg/kg Trockenmasse in Rindermist, 2.420 in Pferdemist, 2.464 in Ziegenmist und 17.226 in Geflügelstreu;
- Nach der thermophilen Phase und der Stabilisierung fiel $\text{NH}_4\text{-N}$ bei jeder Behandlung auf 10–14 mg/kg Trockenmasse;
- Verluste an Gesamtmasse und C waren groß; Die mittleren Verluste an N, P und K betrugen etwa 33 %, 19 % bzw. 27 %, hingen jedoch stark vom Ausgangsmaterial und vom Verfahren ab;
- Geflügelstreu verlor besonders viel N;
- Die endgültigen Nährstoffkonzentrationen stiegen oft nicht, weil Elemente „erstellt“ wurden, sondern weil Masse und C schneller verloren gingen – ein Konzentrationseffekt.

Reifer Kompost ist daher nicht „nach einiger Zeit derselbe Mist“. Es handelt sich um ein anderes Material mit veränderten N-Formen, Masse, Feuchtigkeit, mikrobieller Aktivität und möglichen Verlusten an Luft und Wasser.

4. Stoffstromspezifische Risiken

Strom	Was kann nützlich sein?	Was besonders überprüft werden muss
Ziege	Pelletierter oder fester Mist, C und K; leicht zu sammeln	Hohe Variabilität; Salze; Anthelminthika; Einstreu; ohne Analyse kann nicht angenommen werden, dass er sicherer ist als Schafmist
Schaf	Feststoffstrom, N/K und organische Stoffe	Der mittlere EC in den USU-Daten ist höher als für Ziegenmist; Anthelminthika und Toxizität für die Dungfauna; P-Balance
Rind / Milchvieh	Großes verfügbares Volumen; Einstreu liefert strukturwirksames C	Gülle und Festmist unterscheiden sich; Wassergehalt und Transport; Antibiotika; Methan-/Ammoniakverluste; EC
Pferd	Einstreu kann Porosität und C liefern	Persistente Herbizide aus Heu oder Stroh; Unkrautsamen; Holzspäne; hoher pH-Wert; C:N hängt von der Einstreu ab
Geflügelstreu	Hohe Nährstoffdichte	N/P/Salz/Ammoniak-Überladung; Krankheitserreger; keine Basisbehandlung für einen Abraumversuch

5. Vorläufige Schlussfolgerung für ein Feldexperiment

Tiere müssen nicht auf einen Abraumhaufen gebracht werden, um Mist zu liefern. Wenn ein lokaler landwirtschaftlicher Strom als Ergänzung betrachtet wird, werden zuerst **qualifizierte Endprodukte**, nicht Tiere, verglichen:

1. Herkunft, Futter und Einstreu;
2. Feuchtigkeit und Trockenmasse;
3. Reife und Stabilität;
4. organisches C, C:N und $\text{NH}_4\text{-N/NO}_3\text{-N}$;
5. Gesamt- und wasserextrahierbares P/K;
6. EC, pH, Chlorid und Sulfat;
7. Krankheitserreger, lebensfähige Unkräuter und hartnäckige Herbizide;

8. Tierarzneimittel und Anthelminthika;

9. Metalle, Kunststoffe und andere Verunreinigungen sowie Auswaschung und Ökotoxizität auf dem jeweiligen Minensubstrat.

SYNTHESE (SYNTHESIS). Das Korpus unterstützt nicht die Benennung von Ziegen-, Schaf-, Rinder- oder Pferdemist als allgemein am besten. Die Zusammensetzung ändert sich durch Ernährung, Einstreu, Feuchtigkeit, Lagerung und Kompostierung. Frischer Mist und reifer Kompost sind unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen Risiken für N-Verlust, Krankheitserreger, lebensfähige Unkrautsamen und Sauerstoffbedarf.



Angoraziegen auf einer Farm bei Leakey, Texas, Dezember 1973. Foto: Marc St. Gil / U.S. National Archives, NAID 554932; uneingeschränkte Nutzung. Die Aufnahme veranschaulicht die Herkunft eines möglichen landwirtschaftlichen Stoffstroms; sie belegt weder dessen Zusammensetzung noch die Eignung für Bergbaufolgeland. Tiere werden im vorgeschlagenen Frühversuch nicht auf die Bergehalde gebracht.

9. Kompostierung und Reife

Kurze Antwort

Durch Kompostierung kann ein Teil eines organischen Stroms stabiler, vorhersehbarer und hygienischer gemacht werden und weniger anfällig für eine plötzliche Freisetzung von mineralischem N sein. Aber das Wort „Kompost“ belegt weder Reife noch Sicherheit. „Drei Jahre alt“ hat ohne Prozess- und Endproduktdata keine wissenschaftliche Bedeutung.

Was passiert während des Prozesses?

1. Frühzeitige Zersetzung und Erhitzung

Mikroorganismen verbrauchen schnell verfügbare Verbindungen. Atmung, Temperatur und Sauerstoffbedarf steigen. Bei unzureichender Belüftung entstehen anaerobe Zonen, Gerüche und andere Zersetzungsprodukte. Etwas Masse, C und Wasser gehen verloren; Etwas N kann als NH_3 , N_2O oder N_2 entweichen, während lösliches N/P/K im Sickerwasser austreten kann.

2. Thermophile Phase

Eine gesteuerte Zeit-Temperatur-Kombination reduziert Krankheitserreger und lebensfähige Unkrautsamen. Eine maximale Temperatur an einem Punkt in einem Haufen bedeutet nicht, dass das gesamte Material der erforderlichen Belastung ausgesetzt war: Wende- und Belüftungsprotokolle oder ein validierter Prozess mit geschlossenen Reaktoren sind erforderlich.

3. Kühlung und Stabilisierung/Reifung

Nachdem das labilste C erschöpft ist, sinken Temperatur und Atmung, und die mikrobielle Gemeinschaft verändert sich; NH_4 nimmt normalerweise ab und NO_3 kann zunehmen. Die restliche organische Substanz wird weniger reaktiv. Ein „kalter Haufen“ kann jedoch auch auf einen Mangel an Wasser oder Sauerstoff hinweisen, sodass eine Temperaturkurve nicht der einzige Reifetest ist.

Was aus C:N nicht abgeleitet werden kann

C:N ist nützlich für die Formulierung einer Rezeptur und für eine vorläufige Bewertung des Immobilisierungs- oder Mineralisierungsrisikos, aber zwei Materialien mit demselben C:N können sich unterscheiden in:

- C-Verfügbarkeit;
- die Anteile von NH_4 / NO_3 und organischem N;
- Lignin- und Zellulosegehalt;
- EC und Ammoniak;
- Atmung;

- phytotoxische organische Säuren;
- Krankheitserreger und Kontaminanten.

Besonders wichtig ist das Feldbeispiel **FAIL-005**: Eine Mischung aus frischem Geflügelstreu und Papierfabrikschlamm mit einem nominalen C:N von 29 verlor mehr N als eine Mischung mit einem C:N von 20, obwohl eine einfache Theorie eine stärkere Immobilisierung bei 29 vorhersagen würde. Der C:N eines Rezepts reicht ohne die tatsächliche Zersetzungsdynamik nicht aus.

Mindestkriterien für die Reife

Die grundlegende Behandlung mit reifem Kompost erfordert Folgendes:

Block	Indikator	Zweck
Verfahren	Zeit-Temperatur-Protokoll, Wenden/Belüftung, Feuchtigkeit	Hygiene- und Prozessreproduzierbarkeit
Stabilität	Sauerstoffaufnahme oder CO ₂ -Freisetzung	Restliche mikrobielle Atmung und Risiko eines O ₂ /N-Bedarfs
Reife	Keimung und Wurzelverlängerung oder ein Pflanzenwachstums-Bioassay	Erkennt Phytotoxizität, die C:N nicht zeigen kann
Mineral N	NH ₄ -N, NO ₃ -N und ihr Verhältnis	Ammoniaktoxizität und Nitrifikationsgrad
Grundlegende Chemie	Feuchtigkeit, organische Substanz, Gesamt-C/N, pH-Wert, EC	Berechnung der Trockenmassedosis und des Salzrisikos
Nährstoffe	Gesamtes und wasserextrahierbares oder verfügbares N, P und K	Dosisberechnung anhand der Nährstoffbeladung, nicht anhand des Produktnamens
Physikalische Verunreinigungen	Glas, Kunststoff, Metall und Partikelgröße	Quellentrennung und Qualitätskontrolle
Biologie	Indikatorpathogene und lebensfähige Unkrautsamen	Hygienesicherheit und invasives/Unkrautrisiko
Chemische Verunreinigungen	Metalle und rohstoffspezifische organische Substanzen, PFAS, Herbizide und Pharmazeutika	Schadstofftor

Die EPA (**ORG-005**) weist ausdrücklich darauf hin, dass die Reife nicht durch eine einzelne Eigenschaft beschrieben wird und anhand von mindestens zwei Merkmalen beurteilt werden sollte. Bei einem Feldversuch nach dem Bergbau ist die untere Grenze ein allgemeiner Landschaftsbaustandard, nicht das gesamte Tor.

Was das Feldexperiment unterstützt

In Schuylkill County (**FAIL-005**) gab es bei fünf Behandlungen vier Wiederholungen in einem randomisierten vollständigen Blockdesign; Parzellen mit einer Größe von 6,1 × 9,1 m. Kompostierte Geflügelstreu wurde mit 78 und 156 Mg/ha Trockenmasse ausgebracht; Frischer Geflügelstreu wurde mit Papierfabrikschlamm vermischt. Der Kompost erzeugte während der 14-monatigen Überwachung praktisch keinen Nitratimpuls. Die frischen Mischungen

erreichten nach etwa drei Monaten einen Spitzenwert von 170 und 156 mg N/L. In einem späteren Artikel wurde die Schlussfolgerung beibehalten, dass die frischen Mischungen über drei Jahre wesentlich größere N-Verluste aufwiesen.

Dies unterstützt den Vorteil von **einem bestimmten stabilisierten Kompost in einem bestimmten Experiment**. Es ist nicht gestattet, Kompost zu verwenden, und es wird keine universelle Dosierung von 78–156 Mg/ha festgelegt.

Arbeitsregel

Ein Material gelangt nicht nach Erreichen eines bestimmten Alters in den Feldversuch, sondern nachdem es vier unabhängige Prüfungen bestanden hat:

1. validierter Prozess;
2. Stabilität und Reife;
3. chemische und hygienische Qualität;
4. Verträglichkeit mit dem spezifischen Nachbergbausubstrat in Auslaugungs- und Ökotoxizitätstests.

Wenn ein Block versagt, bleibt das Material ein Ausgangsmaterial oder Abfall und keine experimentelle Bodenverbesserung.

Bühne	Was geschieht	Was zu kontrollieren ist
Mesophiles Stadium	Schnelle Zersetzung verfügbarer Verbindungen; anfänglicher Temperaturanstieg	Rezept C:N, Feuchtigkeit, Porosität und Sauerstoff
Thermophiles Stadium	Hohe Temperatur und beschleunigte Zersetzung	Gleichmäßigkeit der Zeit-Temperatur-Einwirkung, Belüftung und Hygienebehandlung
Kühlung	Rückgang der Atmung und Veränderung der Gemeinschaft	Fehlen anaerober Zonen; Feuchtigkeit
Reifung	Produktstabilisierung und reduzierte Phytotoxizität	Atmung, Selbsterhitzung, Keimungs- und Wachstumsbioassay, NH_4/NO_3 , EC, Geruch und Schadstoffe

FAKT. Die Lagerzeit allein ist kein Beleg für die Reife. Kein einzelner Indikator – C:N, Temperatur oder Alter – ersetzt die kombinierte Bewertung von Stabilität, Sicherheit und Pflanzeneignung.

10. Chemie

Kohlenstoff: Das meiste, was aufgetragen wird, verschwindet – und das ist normal

Frisches organisches C kann verschiedene Wege einschlagen:

1. Mikroorganismen oxidieren es zu CO₂ und gewinnen Energie;
2. etwas C wird zu mikrobieller Biomasse;
3. Nach dem Absterben der Zellen gelangen mikrobielle Rückstände in die SOM;
4. Grobe Pflanzenfragmente verbleiben als partikuläre organische Substanz (POM);
5. Lösliche und umgewandelte Verbindungen interagieren mit Tonmineralien, Fe/Al-Oxiden und anderen Mineraloberflächen und bilden mineralassoziierte organische Substanz (MAOM);
6. Etwas gelöstes C verlässt mit Wasser oder erhöht die Elementarmobilität.

Das heutige Bild reduziert persistente SOM nicht auf einen mysteriösen „Humus“. Eine sinnvolle Arbeitsunterscheidung ist zwischen POM und MAOM. POM ist wichtig für Struktur, Energie und einen langsamen Nährstoffkreislauf, bleibt aber für Zersetzer besser verfügbar. MAOM ist im Durchschnitt stärker geschützt, aber die Wechselwirkungen zwischen Mineralien sind dynamisch: Adsorption ist nicht das letzte Grab des Kohlenstoffs (CHEM-005, CHEM-006).

Dies ist besonders wichtig bei Kohleabfällen: Eine Gesamt-C-Analyse kann altes, aus Kohle stammendes C mit neuer organischer Bodensubstanz verwechseln. Es sind separate Schätzungen des modernen SOC, der anorganischen C- und Kohlefragmente erforderlich, zusammen mit POM/MAOM und Proxys für mikrobielle Nekromasse in einer Teilmenge von Proben.

Testbares Zeichen dafür, dass der C-Zyklus begonnen hat

Das Zeichen ist nicht der maximale SOC unmittelbar nach der Anwendung, sondern das Fortbestehen oder Wachstum biologisch gebildeter C-Pools nach Beendigung der externen Eingaben, während das System beginnt, seine eigene Streu und Wurzelreste zu liefern.

Stickstoff: ein nützliches Element mit sehr schnellen Leckagewegen

Vereinfachte Kette:

organischer N → NH₄⁺ → NO₂⁻ → NO₃⁻ → Aufnahme durch Pflanzen und Mikroorganismen oder Verluste

- **Ammonifikation** wandelt organisches N in NH₄⁺ um.
- Als Kation kann NH₄⁺ an Austauschstellen zurückgehalten werden, bei hohem pH-Wert geht jedoch ein Teil als NH₃ verloren.
- **Nitrifikation** wandelt NH₄⁺ in NO₃⁻ um und erzeugt normalerweise Säure.
- NO₃⁻ wird von negativ geladenen Austauschstellen nur schwach zurückgehalten und bewegt sich leicht mit Wasser.
- Mikroorganismen und Pflanzen immobilisieren vorübergehend mineralischen N in der Biomasse.
- In anaeroben Mikrostandorten führt die Denitrifikation N als N₂/N₂O in die Atmosphäre zurück.

In **FAIL-004** führte eine hohe Dosis von Klärschlamm mit niedrigem C:N-Gehalt zu Nitratkonzentrationen von bis zu etwa 300 mg/L und einem geschätzten Verlust von 2.327 kg anorganischem N/ha über zwei Jahre. Dies ist kein geringer Nebeneffekt: Schnelles Grünwachstum kann mit einer Verschlechterung der Wasserqualität einhergehen.

Was gemessen werden muss

Gesamt-N reicht nicht aus. Die Messungen müssen $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, potenziell mineralisierbares N, N in mikrobieller Biomasse, Pflanzen und Streu, gasförmige Verluste zumindest in einem Intensivmodul sowie N in Abfluss und Sickerwasser umfassen. Die Materialdosis sollte sowohl durch den angestrebten C-Eintrag als auch durch die maximal zulässige N/P-Beladung begrenzt werden.

Phosphor: Mangel und Schadstoff zugleich

Organisches P wird zu Phosphat mineralisiert, seine Verfügbarkeit wird jedoch durch die Mineralmatrix reguliert:

- bei niedrigem pH-Wert interagiert P stark mit Fe/Al-Phasen;
- bei hohem pH-Wert interagiert es mit Ca-Phasen;
- organische Liganden können um Oberflächen konkurrieren und die Sorption verändern;
- Erosion transportiert partikuläres P, während Oberflächenabfluss gelöstes P transportiert;
- Sandige, stark organische oder P-gesättigte Materialien können es schlecht zurückhalten.

In den Böden des Kohlestandorts As Pontes erklärten Fe/Al, pH-Wert und organisches C 79 % der Variation im Logarithmus des Phosphorsorptionsindex (**CHEM-004**). Die gleiche Kompostdosis führt daher zu unterschiedlicher Pflanzenverfügbarkeit und unterschiedlichem Wasserrisiko auf verschiedenen Berggehalten.

Was gemessen werden muss

Gesamt-P, wasserextrahierbares und gelöstes reaktives P, ein geeignetes agronomisches Extraktionsmittel, P-Sorption und -Desorption, Fe/Al/Ca-Phasen und P in Pflanzen, Streu und Abflusssedimenten. „P wurde hinzugefügt“ ist nicht dasselbe wie „Pflanzen haben P erhalten“.

pH: ein Schalter für mehrere Prozesse gleichzeitig

Der pH-Wert beeinflusst:

- Toxizität und Mobilität von Metallen;
- P-Sorption und -Ausfällung;
- mikrobielle Aktivität und Zusammensetzung der Gemeinschaft;
- Nitrifikation;
- Ladung auf mineralischen und organischen Oberflächen;
- Auswahl der Pflanzenarten.

Ein Material kann daher nicht unter der Annahme ausgewählt werden, dass „organische Stoffe normalerweise puffern“. Es kann den pH-Wert erhöhen oder senken, während DOC die Metall- und Metalloidmobilität unabhängig vom pH-Wert der Masse verändern kann. Für das Paar `specific material × specific substrate` sind Inkubations- und Auslaugungstests erforderlich.

KAK: kein universeller Schwamm, sondern die Summe geladener Austauschplätze

Die Kationenaustauschkapazität (CEC) trägt dazu bei, NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} und einige Metallkationen vorübergehend zurückzuhalten. Es wird durch Tonmineralien und die pH-abhängigen Ladungen organischer Stoffe bereitgestellt. Jedoch:

- CEC behält NO_3^- nicht auf die gleiche Weise bei;
- Eine hohe CEC garantiert nicht, dass ein Kation für Pflanzen verfügbar ist.
- ein steiniger Untergrund mit nur 5–30 % Feinerde weist wenige reaktive Oberflächen auf;
- Kompost kann die CEC erhöhen, aber ohne eine mineralische Matrix können einige gelöste Produkte verloren gehen.

Dies erklärt die wichtige Rolle des Lehms in `KUZ-006`: Er ist nicht nur „Boden für Wurzeln“, sondern eine Quelle von Oberflächen, Wasser und Puffern, mit denen der organische Kreislauf interagieren kann.

Block	Mechanismus und möglicher Nutzen	Möglicher Fehler	Was zu messen ist
Kohlenstoff	Energie für Organismen, POM, mikrobielle Rückstände, Aggregate und mineralassoziierte organische Stoffe	Schnelle Mineralisierung zu CO_2 ; fossiler Kohlenstoff verzerrt SOC	TOC korrigiert um geogenes C, POM/MAOM, Atmung, aggregatassoziiertes C
Stickstoff	Startet Pflanzenwachstum und mikrobielle Biomasse	Nitratauswaschung, $\text{NH}_3/\text{N}_2\text{O}$ -Verlust, Immobilisierung, Versalzung	Gesamt-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, Mineralisierung, Sickerwasser, Pflanzenaufnahme
Phosphor	Wurzeln, Energie und Biomasse	Fe/Al-Sorption oder -Abfluss und Eutrophierung	Verfügbarer und Gesamt-P, Sorption, P im Abfluss und Sickerwasser
pH-Wert	Reguliert die Nährstoffverfügbarkeit und -toxizität	Pyrit kann den Säuregehalt über Jahrzehnte hinweg aufrechterhalten	pH-Wert, Säure/Alkalität, Sulfat, Fe, Säure-Base-Rechnung
EC / Salze	Diagnostiziert gelöste Salze	Osmotischer Stress, Sodizität, salzhaltiges Sickerwasser	EC, Hauptionen, SAR/ESP wo erforderlich
CEC	Fähigkeit, einige positiv geladene Nährstoffe zu behalten	Hoher CEC beseitigt keine schlechte Struktur oder Giftstoffe	CEC/ECEC zusammen mit pH-Wert, Partikelgrößenverteilung und organischer Substanz
Metalle	Immobilisierung ist bei geeignetem pH-Wert sowie geeigneter organischer Substanz und Mineralogie möglich	Mobilisierung durch DOC oder veränderte Säure-/Redoxbedingungen	Gesamtgehalt, bioverfügbare und gelöste Formen; Porenwasser

Block	Mechanismus und möglicher Nutzen	Möglicher Fehler	Was zu messen ist
Aggregation	Wurzeln, Pilze, Fauna und organische Stoffe binden Partikel	Verdichtung, Sodizität, mechanische Störung	Lagerungsdichte, Penetrationswiderstand, wasserstabile Aggregate, Porenkonnektivität

11. Wasser

Wasser hat einen eigenen Abschnitt, da eine gute Pflanzenreaktion mit einer schlechten Wasserqualität einhergehen kann.

Sichtbarer Erfolg Deckung ↑ Abfluss ↓	≠	Sicheres Wasser $DO \leq 0,4 \text{ mg/L}$ CSB bis 7.229 mg/L
Sichtbarer Erfolg Begrünung Nährstoffimpuls	≠	Sicheres Wasser $NO_3 \approx 300 \text{ mg/L}$ 2.327 kg N/ha / 2 Jahre

Abbildung 2. Zwei getrennte Fälle: Ein positives Ergebnis bei Vegetation oder Abfluss hebt ein Versagen bei der Wasserqualität nicht auf. Dies ist keine Metaanalyse (FAIL-001 , FAIL-004).

Indikator	Was es zeigt	Gefahr eines falschen Erfolgs
Nitrat	Verlust von verfügbarem N und Risiko einer nachgelagerten Verschmutzung	Die Biomasse nimmt zu, aber der Nährstoffimpuls verlässt das System
DOC	Mobiler organischer Kohlenstoff und Komplexierung	Erhöhter DOC kann Cu und andere Metalle transportieren
COD / gelöster Sauerstoff	Sauerstoffbedarf und Zustand des Vorfluters	Weniger Oberflächenabfluss bedeutet nicht gleich sicheres Wasser, wenn COD hoch und DO niedrig ist
Metalle	Transport gelöster und suspendierter Formen	pH-Wert und DOC verändern die Mobilität nach der Anwendung
Abfluss / Infiltration	Wasserweg und Erosion	Ein geringerer Abfluss kann die Infiltration und Sickerwasserbildung verstärken

Indikator	Was es zeigt	Gefahr eines falschen Erfolgs
Salzgehalt	Masse gelöster Salze	Durch die Ökologisierung wird die Salzansammlung oder der Salzexport nicht aufgehoben

FAKT. FAIL-001 : Eine hohe Dosis Zellstoff- und Papierschlamm verringerte den Oberflächenabfluss und die Erosion, ging jedoch mit einem Sauerstoffgehalt von $\leq 0,4$ mg/L und einem CSB von bis zu 7.229 mg/L einher. FAIL-004 : Die Erholung der Pflanzendecke nach der Ausbringung von Klärschlamm mit niedrigem C:N-Gehalt ging mit Nitratkonzentrationen von bis zu etwa 300 mg/L und einem Verlust von 2.327 kg anorganischem N/ha über zwei Jahre einher. Diese Fälle zeigen nicht, dass jedes organische Material gefährlich ist; Sie zeigen, dass wasserbezogene Messgröße obligatorisch sind.

12. Biologie

Biologie: Wer baut das System eigentlich auf?

Bakterien und Archaeen

Sie mineralisieren organisches Material, führen Nitrifikation und Denitrifikation durch und sind an der Fe/S-Redoxchemie beteiligt. Auf brennendem oder saurem Abraum können sich spezialisierte Gemeinschaften bilden, ihre Anwesenheit bedeutet jedoch nicht, dass die Sanierung sicher ist.

Pilze und Mykorrhiza

Pilzhyphen verbinden Poren, tragen zur Aggregation bei und helfen Pflanzen, P und Wasser zu erhalten. Die Inokulation mit arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen (AMF) verbessert in Studien auf abgebauten Flächen häufig das frühe Wachstum, die Rezension BIO-003 betont jedoch, dass es an langfristigen Feldergebnissen mangelt. Die Kompatibilität zwischen Pilzen, Pflanzen und Substraten ist wichtiger als das Etikett auf einem kommerziellen Produkt.

In einer 29-jährigen Chronosequenz auf Eisenerzrückständen (BIO-004) nahm die AMF-Besiedlung zu, nachdem mehrjährige Vegetation auftrat, und verschiedene Gattungen traten zu unterschiedlichen Zeiten auf. Dies ermöglicht auch eine passive Ansammlung von Symbionten; eine separate Impfbehandlung muss einen Zusatznutzen gegenüber der natürlichen Besiedlung nachweisen.

Wurzeln und Pflanzen

Wurzeln erzeugen Bioporen, Rhizodeposits und neue C-Einträge. Eine schnelle Bedeckung durch nicht heimische Gräser kann jedoch die Oberfläche stabilisieren und gleichzeitig die Zielsukzession verzögern. Die Messungen müssen nicht nur die Deckung, sondern auch Fortpflanzung, Rekrutierung, Wurf und die Entwicklungspfade einheimischer und nicht heimischer Arten umfassen.

Bodenfauna

Die Fauna zerkleinert Abfall, vermischt Material und beeinflusst Poren und Aggregate. Regenwürmer können Prozesse beschleunigen, aber die Einführung nicht heimischer Arten kann lokale Ökosysteme verändern. Das Grunddesign sieht keine Regenwürmer vor; Es verfolgt zunächst die natürliche Besiedlung und nutzt Fauna-Indikatoren.

Wird „echter Boden“ benötigt?

Drei verschiedene Vorgänge dürfen nicht vermischt werden:

1. **Oberbodenanwendung** – eine große Materialmenge, die als physikalische Schicht und Nährstoffträger verwendet wird.
2. **Übertragung des gesamten Bodens und der Samenbank** – Übertragung von Pflanzen, Samen, Fauna und Biota zusammen mit dem Bodenhorizont.
3. **Kleinvolumige Impfung** – eine kleine Dosis, die dazu gedacht ist, eine lebende Gemeinschaft zu schaffen, nicht eine Schichtdicke.

KUZ-007 zeigt eine ausgeprägte zweijährige Reaktion der Pflanzengemeinschaft, nachdem 20–60 cm frische Boden-Vegetationsschicht über 40 cm Lehm gelegt wurden. Der Spenderboden wurde jedoch von lizenziertem Land entfernt, das selbst für den Bergbau bestimmt war. Dabei handelt es sich um eine Rettung, nicht um eine Rechtfertigung für die Zerstörung einer intakten Spenderwiese.

BIO-001 zeigt, dass kleine Inokula auf ehemaligem Ackerland sechs Jahre lang unterschiedliche Entwicklungspfade in der Gemeinschaft steuern können. **BIO-002** zeigt in einem Gewächshausexperiment einen frühen Nutzen kleiner Dosen Waldoberboden auf Minensubstraten. Beides zeigt noch nicht, dass eine kleine Dosis giftige Kohlerückstände wiederherstellen kann.

Bevorzugte Hierarchie der Spendermaterialien

1. frisches Material, das vom Land geborgen wurde und unvermeidlich gestört wird;
2. Material von einem örtlich zugelassenen Räumungs- oder Baubetrieb;
3. minimale Bodenkrümel oder Inokulum, mit Schadenskappe und Überwachung der Entnahmestelle;
4. kultivierte einheimische mikrobielle Konsortien erst, nachdem Identität und Funktion getestet wurden;
5. ein generisches kommerzielles Inokulum – nicht standardmäßig.

So testen Sie die abnehmende Abhängigkeit von externen Eingriffen

Der vorgeschlagene **Autonomieindex** wird nicht auf eine Zahl reduziert, bevor Daten vorliegen. Es testet alle folgenden Punkte gleichzeitig:

- es wird keine weitere Bodenverbesserung vorgenommen;

- Bewässerungs- und Düngestopp nach einer vorab festgelegten, begrenzten Etablierungsdauer;
- Pflanzenbedeckung, Überleben und Rekrutierung in der Gemeinschaft nicht unter einen bestimmten Schwellenwert fallen;
- jährliche Einstreu- und Wurzeleinträge ersetzen einen Teil des frühen externen C-Eintrags;
- Die Verfügbarkeit mineralischer N/P wird nicht nur durch den Restpuls aufrechterhalten;
- mikrobielle Biomasse und Funktionen sowie Mykorrhiza bleiben bestehen;
- Aggregatstabilität und Infiltration verschlechtern sich nicht;
- Abfluss und Sickerwasser bleiben sicher;
- Die Gemeinschaft tendiert nicht dazu, von unerwünschten Arten dominiert zu werden.

Erst wenn diese Bedingungen gemeinsam erfüllt sind, gibt es Grund zu der Annahme, dass das System begonnen hat, sich selbst zu tragen. Selbst dann wird es ein junges Technosol und ein junges Ökosystem sein, kein wiederhergestellter alter Boden.

Vorläufige Antwort auf die Frage des Artikels

Der ehemalige Boden kann in einem historisch kurzen Zeitraum wahrscheinlich nicht wiederhergestellt werden. Die Initiierung der Bildung eines neuen lebenden Bodensystems auf einigen sicheren, vom Menschen erzeugten Substraten ist wissenschaftlich plausibel und wurde stellenweise bereits teilweise nachgewiesen. Aber organische Abfälle werden erst nach Quellentrennung, Verarbeitung, Analyse und Prüfung des `material-substrate`-Paares zu Ressourcen. Ohne das kann eine Stadt dem Land kein Leben zurückgeben; es verlagert lediglich einen weiteren Risikostrom auf die Bergehalde.

SYNTHESE (SYNTHESIS). Der biologische Erfolg beruht nicht auf der maximalen Anzahl an Taxa und nicht auf einem einzelnen Enzymtest. Funktionen, Verbindungen zu Pflanzen und Wasser, Beständigkeit und Umweltverträglichkeit sind von Bedeutung. Ein frühes Signal kann verschwinden; ein Inokulum kann sich möglicherweise nicht etablieren; Eine komplexere Mischung kann schlechter abschneiden als eine einfache.

13. Weltweite Studien und Fallbeispiele

Funktionell unterschiedliche Fälle werden in die Hauptsynthese einbezogen. Sie werden nicht in einer Metaanalyse zusammengefasst: Standorte, Materialien, Dosen und Ergebnisse sind nicht vergleichbar.



Tagebaustrossen im Kusbass, 22. Januar 2019. Foto: Natalia Zubkova. Die Aufnahme zeigt Maßstab und Geometrie des Tagebaus; sie ist kein Untersuchungsstandort der internationalen Fallmatrix und belegt kein Ergebnis der Wiederherstellung.



Tagebau Patilla, Cerrejón, Kolumbien, 2013. Foto: Hour.poin, CC BY-SA 3.0. Die Aufnahme zeigt den Tagebau und dahinter gelagertes Abraummaterial, jedoch nicht die Chronosequenzflächen CASE-018/019 ; sie belegt weder die Werte von 63–89 % noch eine ökologische Wiederherstellung.

Zentrale internationale Fälle für die abschließende Synthese

Status: geschlossene ausgewählte Matrix, 26. September 2026. Es handelt sich weder um eine Rangliste der Länder noch um ein vollständiges Register. Fälle wurden ausgewählt, weil sie die Antwort auf die Forschungsfrage verändern, lange Zeiträume, direkte Vergleiche oder wichtige Einschränkungen bieten.

Beleg	Wo und was	Warum es der Schlüssel ist	Was es uns nicht zugesteht, zu behaupten
CASE-009/010	Virginia-Kohlebergwerksboden; randomisierte Behandlungen; 16 und 27 Jahre	Ein seltener langfristiger Kausalvergleich: Die Kontrolle holte bei einigen Aggregatindikatoren mit den Behandlungen auf, während die C/N-Fractionen und die mikrobielle Biomasse Behandlungsvermächtnisse beibehielten	Es wurde nicht nachgewiesen, dass irgendeine Behandlung ein Referenzökosystem vollständig wiederherstellt
CASE-020	Sokolov, Tschechische Republik; Erle auf Braunkohleabraum; 4–65 Jahre	Zeigt die Anhäufung von C/N/P, Abfall und organischen Horizonten über Jahrzehnte	Chronosequenz; Das Mineralprofil bleibt unvollständig und die Standorte unterscheiden sich
CASE-023	Spontane Sukzession bei Sokolov; 16–56 Jahre plus erneute Erhebung	Zeigt, dass sich auf einem sicheren Substrat ohne fortlaufende organische Zugaben ein interner Entwicklungspfad Pflanzen → Streu → Boden bilden kann	Nicht auf brennenden, sauren oder salzhaltigen Abraum übertragbar; fossiler Kohlenstoff erschwert Vorratsschätzungen
CASE-018/019	Cerrejón, Kolumbien; Oberbodentransfer plus Trockenwaldsanierung; bis 21 Jahre	Verbindet Vegetation, Abfall, Fauna und biogene Aggregate	Ein Programm und Chronosequenzen; Die Wiederherstellung blieb teilweise
CASE-021	Garzweiler, Deutschland; 24 Jahre	Trennt die Rollen von mineralischer Grundlage, einer N-fixierenden Pionierpflanze und Kompost in der Struktur/SOC	Ein für die Landwirtschaft günstiges Löss-Technosol ist kein Rohkohlenabraum
CASE-022	Lausitz, Deutschland; saurer schwefelhaltiger Braunkohleabraum; bis 37 Jahre	Zeigt, dass die Pyritoxidation die Chemie trotz Waldbedeckung jahrzehntelang bestimmen kann	Durch die Begrünung wird nicht die Entfernung der geochemischen Quelle nachgewiesen
BIO-009	Rekultivierung von Kohleflächen in West Virginia; 2–32 Jahre	Es findet eine mikrobielle Sukzession statt, die Konvergenz mit der Referenz ist jedoch nicht garantiert. pH-Wert, Textur und SOM sind wichtiger als das Kalenderalter	Vier Standorte, kein Längsschnittexperiment; Bodenverbesserungsmaterialien wurden nicht getestet
CASE-001/004/033	Saure Kohlereste in Ohio/Schottland; 10–16 Jahre	Kalkung, Mineralstoffkorrektur und Quellkontrolle können nicht durch organische Stoffe ersetzt werden; Wartungsangelegenheiten	Frühere Materialien/Dosen und unvollständige Wassertafeln
CASE-002	Wales, Grünabfallkompost um Bäume herum; 11 Jahre	Ein Null-/artenspezifisches Ergebnis widerlegt die Behauptung, dass „Kompost Bäume immer beschleunigt“.	Geringe punktuelle Dosis, keine Rekonstruktion des Bodens auf einem gesamten Gelände
CASE-015/016	Minnesota-Taconit-Rückstände; 2–9 Jahre	Kombiniert Vegetation, Wasser, Kosten und Logistik; Eine maximale Deckung war nicht das sicherste oder günstigste Ergebnis	Keine Kohle; frühe Laufzeiten und spezifische Abfallströme

Beleg	Wo und was	Warum es der Schlüssel ist	Was es uns nicht zugesteht, zu behaupten
CASE-012	Cu/Mo-Rückstände in British Columbia; 13 Jahre	Eine einmalige Anwendung von Biofeststoffen hinterließ ein C/Biomasse-Erbe; die niedrigere Dosis war pro Masseneinheit wirksamer	Verschiedene Metalle/Wasser-Kontexte; hohe Dosen gaben Anlass zur Sorge hinsichtlich Zn
CASE-034	Salzhaltige Cu-Rückstände in Chile; 3 Jahre	Dosis/Material führten zu gegensätzlichen Ergebnissen für Biomasse und DOC/Cu-Mobilisierung; Olivenrückstände sind fehlgeschlagen	Bewässertes Nichtkohlesystem; Autonomie wurde nicht getestet
CASE-025/026	Abgesunkenes Kohleland in Shanxi; 5–7 Jahre	Organische Materialien erzeugen unterschiedliche C-Pools und mikrobielle Entwicklungspfade; Gülle machte das System nicht referenzähnlich	Landwirtschaftliche Systeme mit wiederholten Eingaben; Wasser/Pilze unvollständig beurteilt
KUZ-006	Kusbass-Fakultätsstudie, loam/topsoil × local seed hay ; 4–9 Jahre	Lokale Belege dafür, dass eine physische Wurzelzone und eine biologische Entwicklungspfad unterschiedliche Hebel sind	Kompost wurde nicht getestet; Grüne Abdeckung ist keine Autonomie
HYP-001/011	Südafrika/Polen; hergestellte oder beimpfte Materialien	Nächstliegende Analogien von Material, das vor dem Pflanzen oder der Feldanwendung biologisch hergestellt wurde	Kein faktorieller B/C/D/E- und B-Zeit-Vergleich von reifem Kompost, direkter Beimpfung und vorkolonisiertem Material
MIC-001	Pilbara-Bergbaufolgeboden; einheimische Bakterien, die aus 1 g Boden kultiviert und in Pellets ausgebracht wurden	Belegt unmittelbar die technische Skalierbarkeit von kleine Spenderprobe → Kultivierung → Träger → Bergbaufolgeboden mit behandlungsabhängiger Funktion	Nicht das gesamte Mikrobiom, kein Kompostträger, keine lange Laufzeit

Schlussfolgerung aus der Auswahl

Zusammengenommen reichen diese Fälle aus, um sechs verschiedene Wahrheiten aufzuzeigen: Organische Materialien helfen manchmal; Dosis und Material verändern das Ergebnis; Wasser kann sich trotz guter Abdeckung verschlechtern; Die Geologie kann jahrzehntelang dominieren; Pflanzen können einen inneren Kreislauf aufbauen; und ein Inokulum kann ausgewählte Funktionen verändern, ohne die Entstehung von neuem Boden zu gewährleisten.

13.1. Vollständige Fallmatrix

In der folgenden Tabelle sind Substrat, Ergänzung, Dosis, Berechnungsgrundlage, Studiendesign, Dauer, Ergebnisse, positive und negative Ergebnisse, Einschränkungen und Source IDs in dem im geschlossenen Korpus aufgezeichneten Umfang enthalten.

Langfristige und negative Feldfälle

Tabellenhinweis: „Positiv“ bedeutet nur die gemeldete gemessene Wirkung, nicht die vollständige Wiederherstellung des Ökosystems.

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-001	10 Jahre	Saurer pyritischer Kohleabraum, Ohio	Verfauter Klärschlamm, Flugasche, kompostierter Zellstoff- und Papierschlamm, Oberboden	pH-Wert, Pflanzen und andere Indikatoren	Langfristige Unterschiede zwischen den Materialien blieben bestehen	Es wurden ältere Schlammstandards verwendet; Es werden Schadstoff- und Wasserdaten sowie der vollständige Text benötigt
CASE-002	11 Jahre	Ehemaliges Kohlebergwerk, Wales	0.75 kg kommunaler Grünabfallkompost pro Baum	Überleben, Größe und Durchmesser auf Brusthöhe (DBH), nach Arten	Kein Gesamthöhen- oder DBH-Gewinn; Das Überleben hing von der Art ab und war bei Erlen schlechter	Kleine Spotdosis; keine Wiederherstellung des Bodenkreislaufs auf dem gesamten Gelände
CASE-003	7 Jahre	Braunkohlebecken, Tschechische Republik	Einmaliger Klärschlamm, Papierabfälle und Rinde	C, mikrobielle Biomasse und Atmung	Biologische und chemische Reaktionen blieben bestehen	Komplexe Mischung; Die aktive Komponente kann nicht identifiziert werden
CASE-004	16 Jahre	Saures Kohlebergbaugebiet, Ohio	280 Mg/ha Rauchgasentschwefelungsmaterial (REA) $\pm$ 112 Mg/ha Gartenabfallkompost; 20 cm neue Bodenschicht mit Kalk	Vegetation und Bodenzustand	Die Langzeitreaktion unterschied sich von der frühen Reaktion	REA ist kein organisches Material; Wasserdaten und Dosisvergleich sind erforderlich
CASE-005	12 Jahre	Pb/Zn-haltige Bergehalde, Missouri	Biosolide mit Kalk/Kompost im Vergleich zu geborgenem Oberboden	Pflanzenenertrag, Metallaufnahme, Säugetiere und Boden	Die restliche Behandlung blieb funktionsfähig	Kein Kohleverderb; Das Anlocken von Tieren und Metall führt nicht zu einer vollständigen Autonomie des Ökosystems

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-006	9 Jahre	Boreale Tagebau-Goldmine	Acht Strategien mit Torf, Biofeststoffen und Kombinationen	Boden-Pflanze-Mikroorganismus-System	Torfkombinationen übertrafen Behandlungen ohne Torf; Das fünfte Jahr war informativer als die frühe Berichterstattung	Keine Kohle; Torfernte schadet einer Spenderstelle; Für die aktuelle Arbeit ist der vollständige Text erforderlich
FAIL-001	Früher Oberflächenabfluss	Kohlebergwerk	Zellstoff- und Papierschlamm mit 224/672 Mg/ha Trockenmasse	Abfluss, Erosion, DO, CSB	Der Abfluss war 4–6-mal geringer und die Erosion sank von 47 auf <1 Mg/ha	Vor der Etablierung der Pflanzen erzeugte die hohe Dosis einen Sauerstoffgehalt von $\leq 0,4$ mg/L und einen CSB von 7.229 mg/L gegenüber 880 mg/L
FAIL-003	2 Jahre	Pyritischer und nichtpyritischer Braunkohleabraum	Dünger, Klärschlamm, Kompost	Bodenlösung bei 20/130 cm und Elementflüsse	Die Reaktionen unterschieden sich stark je nach Substrat	Am pyritischen Standort bis zu 6 t Fe/ha/Jahr und 14 t Sulfat S/ha/Jahr; Organische Materialien boten keine Quellenkontrolle
FAIL-004	3 Jahre	Rekultivierter Kohlebergaustandort, Pennsylvania	134 Mg/ha Klärschlamm mit niedrigem C:N-Verhältnis	Lysimeterwasser in 1 m Tiefe	Die Wiederherstellung der Vegetationsdecke ging mit einem Nitrat- und Metallimpuls einher	NO ₃ -Spitzenwert etwa 300 mg/L; 2.327 kg anorganischer N/ha über zwei Jahre; die hohe Dosis gefährdete die Wasserqualität
FAIL-005	3 Jahre	Verlassener Kohlestandort, Pennsylvania	Kompostierter Geflügelstreu bei 78/156 Mg/ha; frische Einstreu plus Papierfabrikschlamm bei C:N 20/29	Nährstoffauswaschung und Bodenretention	<1% von aus Kompost ausgelaugtem N; Streu-/Schlammverlust 393 kg N/ha bei C:N 29 und 107 kg N/ha bei C:N 20	C:N ist nicht der einzige Reifeindikator; Die Schlussfolgerung gilt für die jeweiligen Geflügelstreu- und Schlammmaterialien
KUZ-006	4–9 Jahre	Abraum, Kusbass	Roher Boden / 10 cm Lehm / 10 cm Oberboden × 0–3 Anteile an lokalem Saatheu	Chemie, Flora, Bedeckung und Biomasse	Lehm mit heimischem Saatheu ergab eine ausgeprägte naturnahe Entwicklungspfad; Der Oberboden fügte eine Unkrautreserve hinzu	Kompost und Mist wurden nicht getestet; Die Abdeckung weist keine Wasser- oder Mikrobenaufzucht auf
KUZ-006-P	4 Jahre	3 ha Bergehalde, Kusbass	≥20 cm lössartiger Lehm + 5 t lokales Saatheu	Abdeckung, Flora und Höhe	80–90%-Abdeckung; 77 Gefäßpflanzenarten	Betriebsversuch ohne vollständige faktorielle Replikation; Abdeckung ist keine Bodensanierung

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-009/010	16 und 27 Jahre	Sandstein-/Schluffstein-Bergbaufolgeboden, Virginia	Kontrolle; 30 cm Oberboden; 112 Mg/ha Sägemehl; Biofeststoffe bei 22–224 Mg/ha, n=4, randomisiertes vollständiges Blockdesign (RCBD)	SOM, N, Mineralisierung, Aggregation, C/N-Fractionen, mikrobielle Biomasse und Vegetation	Nach fünf Jahren zeigten die Bodenverbesserungsmaterialien starke Wirkungen; im Jahr 16 näherte sich die Kontrolle ihnen bei den Gesamtwerten von SOM/N an; im Jahr 27 war die Aggregatverteilung weitgehend konvergiert, während Biofeststoffe C/N-Nachwirkungen und eine höhere MBC bewahrten	Ein Ergebnis zeigt Konvergenz, ein anderes eine Nachwirkung; das Ergebnis lässt sich nicht ehrlich auf das Wort „wirkt“ reduzieren
CASE-011	35 Jahre	Tagebaulich abgebauten Land, Illinois	Kumulierte 801–1,815 Mg/ha Biosolid-Trockenmasse im Vergleich zu mineralgedüngten Feldern	Spurenmehalle im Grundwasser	Die meisten regulierten Metalle liegen unter den Grenzwerten; Fe/Mn höher; Das frühe Zn-Signal nahm ab, nachdem sich die Qualität und Regulierung der Biofeststoffe geändert hatte	Nitrat, PFAS, Arzneimittel, Krankheitserreger und die Entwicklung des Ökosystems wurden nicht getestet
CASE-012	13 Jahre	Cu/Mo-Rückstände, British Columbia	Einmalige Biofeststoffe bei 0/150/250 Mg/ha Trockenmasse	C-Pools, Biomasse und ausgewählte Chemie	Der Vorteil bei C und Biomasse blieb bestehen; geringere Dosis speichert mehr C pro Masseneinheit; Zn hat bei 250 Mg/ha einen Richtwert überschritten	Tailings sind kein Kohleabraum; Wasser- und ökologische Messgröße waren unvollständig
CASE-013	21 Jahre	Mit Metall kontaminierte Schwemmhalden	224 Mg/ha Kalk + 224 Mg/ha Biofeststoffe	Physikalische, chemische und biologische Bodenbeschaffenheit, Pflanzen und Metalle	Viele Bodenfunktionen verbesserten sich; Die pflanzlichen Metallkonzentrationen gingen zurück	Bioverfügbares Cd/Zn blieb ein Problem; nicht randomisiert und kein Kohlestandort
CASE-016	5–9 Jahre für frühe Parzellen; 2 Jahre der vollständigen Arbeit zum Zeitpunkt der Veröffentlichung	Grobe Taconitrückstände, Minnesota	10–90 Mg/ha Torf, Garten-/kommunaler Kompost oder Papierreste; einige Behandlungen mit Dünger	Abdeckung, Biomasse, Frühkosten und Logistik	Einige 10 Mg/ha-Grundstücke erreichten im fünften Jahr die 90%-Abdeckung; hohe Papierrestdosis erfordert zusätzliches N; Eine Quelle innerhalb von 100 km war wirtschaftlich entscheidend	Keine Kohle; Papierstrom wurde nicht kompostiert; teilweise überlappt CASE-015 ; Ökosystem- und Bodenautonomie wurden nicht gemessen

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-015	2–3 Vegetationsperioden	Grobe Taconitrückstände, Minnesota	Anteile an Biofeststoffen entsprechend 100/200/400 Pfund verfügbarem N/Acre, mit oder ohne Papierreste; Standardkontrolle	Infiltrationswasserchemie, Nitratmasse, Metalle, Vegetationsdeckung und Kosten	Organische Materialien erhöhen die Vegetationsdeckung; die Autoren wählten 200N als Kompromiss	Fast jede Behandlung hatte Nitrat >10 mg/L; 400N wies etwa 3-mal so viel Nitrat wie 200N auf; 400N plus Papierreste hatte die größte Vegetationsdeckung, kostete jedoch ≥ 6 -mal so viel wie 200N und setzte geringe Mengen Hg/Co frei; kurze Dauer
CASE-017	2–19 Jahre, Altersgradient	Wiederbepflanzter Kohleabraum, Singrauli, Indien	Gemischte Gräser und Bäume; keine gesonderte organischer Bodenverbesserer	Biomasse, Streu, Wurzeln, pH-Wert, Lagerungsdichte, Wasserhaltekapazität, N/P, Walkley-Black C und mikrobielles C	Pflanzenbiomasse, gemessenes organisches C und MBC nahmen mit zunehmendem Alter zu; Durch 19 Jahre hatten sich erhebliche Streu- und Wurzeleinträge gebildet	Unterschiedliche Standorte, keine wiederholten Messungen; anfängliche Unterschiede und Artenzusammensetzung hängen vom Alter ab; Kohle C kann SOC verzerren; Der berechnete Saldo ist kein gemessener Fluss
BIO-009	2–32 Jahre, Chronosequenz	Rekultivierte Konturkohlebergwerke, West Virginia	Verfüllter Abraum + etwa 20 cm Oberboden, Verdichtung, Gras-Hülsenfrucht-Gemisch	Chemie, Textur, Feuchtigkeit, mikrobielle Biomasse/Reichtum, Bakterien- und Pilzzusammensetzung	Mikrobielle Gemeinschaften veränderten sich allmählich; pH-Wert, SOM und Textur waren wichtige Faktoren	Die 32-jährige Fläche zeigte keine klare Konvergenz mit der Referenz in Bezug auf Biomasse, Reichtum oder Zusammensetzung; Bei vier Standorten handelt es sich nicht um eine Längsschnittstudie. Bodenverbesserungsmaterialien wurden nicht getestet
CASE-018/019	1–21 Jahre, zwei Chronosequenzen	Technosole an einem Kohlestandort im Trockenwald, Cerrejón, Kolumbien	Oberbodenübertragung und Begrünung	Mikrostruktur, biogene Aggregate, makrofaunale Spuren, physikalisch-chemische Indikatoren, Streu, SOM	Gebildete biogene Aggregate erschienen bei 20 Jahre; SOM hat den Referenzwert 63–89% erreicht; Müll verbindet die Vegetation mit dem Boden	Ein Wiederherstellungsprogramm; keine wiederholten Beobachtungen derselben Parzellen und kein Vergleich von Bodenverbesserungsmaterialien; Die Wiederherstellung blieb teilweise

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-020	4–65 Jahre, Chronosequenz	Braunkohleabraum, Sokolov, Tschechische Republik	Aufforstung von Erlen	C/N/P-Bestände und Profilverteilung, Streu-/organische Horizonte, mikrobielle Verbindungen	C/N akkumulierte im ersten 15–20 Jahre schnell; Die oberen organischen Schichten näherten sich nach 30–40 Jahre der Referenz	Mineralschichten und das gesamte Profil sind zurückgeblieben; Die Ausgangsmaterialien und Standorte unterschieden sich im Laufe der Zeit
CASE-021	0–24 Jahre, replizierte Chronosequenz	Landwirtschaftlich gewonnener Löss über dem Braunkohlebergwerk Garzweiler, Deutschland	Luzerner Pionierphase, Fruchtfolge, Kompostieren und Pflügen	SOC, Aggregate, Makroporosität, Porenkonnektivität und mikrobielle Biomasse	Die Mineralogie des Fundaments, die N-fixierende Kulturpflanze und der Kompost erfüllten unterschiedliche Funktionen; Pflanzenreste allein hielten den hohen SOC nicht aufrecht	Übertragbarer Mechanismus, aber landwirtschaftlich genutzter Lössboden ist kein roher Kohleabraum; Chronosequenz
CASE-022	Bis 35–37 Jahre	Saurer schwefelhaltiger Braunkohlebergbauboden, Lausitz, Deutschland	Aufforstung und Aufforstung von Kiefern und Eichen	Organismen, Wurzeln/Mykorrhiza, Chemie und Sickerwasser-Ionenhaushalt	Einige biologische Grundstücke näherten sich nicht abgebauten Standorten; Die Auswaschung ging zurück	Die Oxidation von Pyrit bestimmte jahrzehntlang die Chemie; Durch die externe Walderholung wurde die geochemische Quelle nicht entfernt
CASE-023	16–56 Jahre plus erneute Umfrage zu 15 Jahre später	Nicht aufbereitete Bergehalde in Sokolov, Tschechische Republik	Spontane Laubsukzession	Wiederholen Sie die Messungen der C-Bestände nach Tiefe und Mikrotopographie	Mittlere beobachtete Boden-C-Akkumulation etwa 0.50 t C/ha/Jahr	Die Standortverläufe unterschieden sich; Ausgangsmaterial enthält fossiles C; Eine Übertragung ist nur nach technischer Genehmigung möglich
CASE-024	Bewertungsbasis über 24 Jahre	48 Kohlebergwerke, Südafrika	Konventionelle Sanierung mit unterschiedlicher Nacherhaltung	299 Multikriterienbewertungen	Landkapazität und Bodenverlust erreichten häufig Schwellenwerte; Bodenfruchtbarkeit, Landform und Artenzusammensetzung blieben schwach	Industrie-Beobachtungsmaßstab, kein Bodenverbesserungsversuch; zeigt an, dass der Wartungsbedarf möglicherweise bestehen bleibt

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-025	5 Jahre	Zurückgewonnenes landwirtschaftliches Land über Senkung des Kohlebergbaus, Shanxi, China	Gleich 2.7 t C/ha wie Pflanzenkohle, Kompost, Biogasrückstände, Rindermist oder Maisstroh	Gesamte, stabile, labile und leicht oxidierbare C-Fraktionen	Die Materialien erzeugten unterschiedliche C-Pool-Profile: Biokohle führte zu Gesamt-C und Managementindex, Kompost zu leicht oxidierbarem C, Gülle zu labilem C	Nur C bewertet; Nährstoffeinträge nicht ausgeglichen; Wasser, Vegetation und Autonomie nicht gemessen
CASE-026	7 Jahre	Urbarmachtes Maisland über Absenkungen im Kohlebergbau, Shanxi, China	Kontrolle / Mineraldünger / zersetzter Geflügelmist, RCBD, n=3	SOM/Nährstoffe und Bakterienreichtum/Zusammensetzung	Mist verbesserte SOM/N und veränderte die mikrobielle Gemeinschaft	Die Gemeinschaft unterschied sich immer noch vom Ackerland; weitere Einträge erforderlich; Metalle, Antibiotika, Wasser und Pilze unvollständig bewertet
CASE-028	2–21 Jahre, Chronosequenz	Aufgeforsteter Kohleabraum, Raniganj, Indien	Natürliche und bewirtschaftete Begrünung	Physikochemische Indikatoren, MBC/Enzyme und Vegetation	Viele Boden- und Pflanzenindikatoren nahmen mit zunehmendem Alter zu	Mit der Zeit verwechselte Standort- und Geschichtsunterschiede; kein Experiment mit Bodenverbesserungsmaterialien; Fossil-C-Vorbehalt
CASE-030	Über 20–25 Jahre, Querschnittsvergleich	Steinkohle-Bergehalde, Oberschlesien, Polen	Spontane Sukzession auf unbedecktem Boden / Sukzession über Oberboden / Bepflanzung über Oberboden	Struktur, Wasser, Nährstoffe und leichte/okkludierte/mineralische C-Fraktionen	Bei der Behandlung von Pflanzen/Oberboden wurden mehr Wasser und stabilere C-Fraktionen zurückgehalten; insgesamt SOC unterschied sich nicht	Keine historische Randomisierung; mechanische Verdichtung beschädigter Oberboden; keine biologischen Messgröße
CASE-031	6 Jahre	Konstruierter Oberboden über einem Kohlebergwerk, Candiota, Brasilien	Vier mehrjährige Gräser; Alle bepflanzten Parzellen werden jährlich gekalkt, gedüngt und mit N versorgt	TOC bei 0–3 cm, chemische C-Fraktionen und Spektroskopie organischer Stoffe	Zwischenfrüchte erhöhten teilweise die C-Vorräte im Vergleich zu nacktem bebautem Boden; einige Arten bevorzugten Huminsäure C	Natürliche und bloße Behandlungen wurden nicht randomisiert; nur Oberflächenschicht; jährliche Eingaben; Gesamt-C blieb deutlich unter dem natürlichen Boden

AUSWEIS	Dauer	Standort und Ausgangssubstrat	Behandlung	Was wurde gemessen	Ergebnis	Warum das nicht ausreicht / Risiko
CASE-032	15 Monate	Saure sandige Kassiteritrückstände, Jamari, Brasilien	Sechs Abdeckungen × Kompost/NPK/Kalk, sechs Replikate	Chemie, organische Materie und physikalische Eigenschaften	Behandlungen mit Kalk, organischem Material und Düngemitteln verbesserten die Chemie	Organische Substanz und physikalische Eigenschaften unterschieden sich nicht; Ein kurzes Experiment zur Mischbehandlung ohne Kohle schränkt die kausale Interpretation ein
CASE-033	Über 10 Jahre nach der 1978-Anwendung	Pyritischer Kohleabraum, Baads, Schottland	0/10/25/50 t Kalk/ha mit Torf, Klärschlamm, verwittertem Geflügelstreu oder Alginure	pH-Wert, verfügbare Metalle und Vegetation; nebenstehender Langzeit-Wasser/Metall-Vergleich	Die meisten Parzellen mit 50 t Kalk/ha hatten immer noch einen pH-Wert ≥ 5.12 ; Reine Bio-Behandlungen blieben in der Regel dürrftig	Die erhaltenen Parzellen sind spärlich und unausgewogen; Neigung und Zufluss verwechselt; Schlamm, der vor der Verwendung nicht analysiert wurde; wiederholter organischer Input war erforderlich
CASE-034	3 Jahre	Salzhaltige Cu-Rückstände, La Cocinera, Chile	Ziegenmist / Biofeststoffe / Trauben- oder Olivenrückstände / Mischungen, 13 Behandlungen × 3 Replikate	CEC/SOC/NPK, mikrobielle Indikatoren, DOC/Cu in Porenwasser, Pflanzenbiomasse und Cu	Biosolids B1 und einige Traubenrückstand-/Mistsysteme produzierten eine hohe Spätbiomasse; Die Behandlungsvorteile blieben gegenüber der Kontrolle bestehen	Drei Jahre Bewässerung; viele Fruchtbarkeitsmessungen gingen zurück; sehr große frühe DOC/Cu-Pulse; Olivenrückstände machten die Produktion fast unmöglich; Autonomie ungetestet
CASE-035	12 Monate	Rekonstruiertes Kohlestandortprofil in Außencontainern, Mpumalanga, Südafrika	Neun organische/Flugasche-Behandlungen und -Kontrolle, n=4	pH-Wert, Lagerungsdichte, zwei Nutzpflanzen, Wurzeln, Nährstoffe und C	Luzern mit kompostiertem Mist und Hackschnitzeln schnitt bei den kombinierten Indikatoren am besten ab	Mini-Lysimeter; ein Winter und ein Sommer; hohe Dosen und gemischte Komponenten; keine Daten zur Wasserqualität oder Feldpersistenz

Vorläufige Synthese

1. Frühe Begrünung überschätzt den Erfolg systematisch: Ergebnisse nach 9–16 Jahren können von denen nach 1–3 Jahren abweichen.
2. Der gefährlichste Fehlerfolg ist eine gute Pflanzenbedeckung in Kombination mit Nitrat-, DOC- oder Metallverlusten im Wasser.

3. Eine hohe Dosis an organischem Material ist nicht zwangsläufig eine wirksame Behandlung; es handelt sich oft um einen starken Anstieg des Nährstoff- und Sauerstoffbedarfs.
4. Ein einzelnes C:N-Verhältnis garantiert keine Stabilität: Materialherkunft, Prozessgeschichte, Reife, N-Formen und Feldhydrologie bleiben weiterhin notwendig.
5. Die physikalische verwurzelbare Schicht und die biologische Entwicklungspfad sollten getrennt vom hinzugefügten organischen C getestet werden.
6. Der am längsten kontrollierte Fall eines Kohlestandorts zeigt etwas kausal Wichtiges: Über Jahrzehnte hinweg kann die Vegetation allein in einigen Funktionen mit frühen Behandlungen mit Bodenverbesserungsmaterialien aufholen, während bestimmte vererbte C/N-Anteile unterschiedlich bleiben. Der Erfolg muss daher anhand mehrerer Ergebnisse und der Kosten der Beschleunigung bewertet werden, nicht nur anhand des endgültigen Unterschieds.

14. Negative Ergebnisse

Ein negatives Ergebnis bedeutet hier nicht unbedingt ein komplettes Scheitern des Projekts. Es ist ein Ergebnis, das das einfache Versprechen widerlegt: „Es wurde organisches Material verwendet, daher wurden die Dinge verbessert.“

Negativ- und Grenzfälle

Status: endgültige Syntheseliste, 26. September 2026. „Negativ“ bedeutet hier ein Ergebnis, das ein einfaches Versprechen widerlegt, nicht unbedingt ein völliges Scheitern des Projekts.

Beleg	Positives äußeres Zeichen	Was ist schief gelaufen oder wurde nicht unterstützt?	Lektion
FAIL-001	Reduzierter Abfluss und Erosion an einem Kohlestandort	DO ≤ 0.4 mg/L und COD bis 7,229 mg/L bei einer hohen Papierschlamm dosis	Weniger Abfluss bedeutet nicht gleich sichereres Wasser
FAIL-004	Begrünung nach Klärschlammausbringung	Nitrat bis ~ 300 mg/L und 2,327 kg anorganisches N/ha über zwei Jahre	Der größte Nährstoffschub kann zu einem Verschmutzungsereignis werden
FAIL-005	Gülle gemischt auf nominalen C:N 20/29	Die N-Verluste blieben 107/393 kg/ha, während der Kompost $<1\%$ N verlor	C:N ersetzt nicht Reifegrad und Prozesshistorie
FAIL-003	Es wurden Dünger/Schlamm/Kompost ausgebracht	Pyritischer Abraum führte unabhängig vom organischen Material zu massiven Fe/Sulfatflüssen	Die Erzeugung aktiver Säure erfordert eine Quellenkontrolle
CASE-002	Grünabfallkompost um Bäume herum	Kein Gesamthöhen- oder DBH-Gewinn; Das Überleben war artabhängig und für Erlen schlimmer	Komposteffekte können nicht auf Pflanzenarten verallgemeinert werden
CASE-015	Maximale Frühdeckung	Die Behandlung mit der höchsten Rate hatte einen höheren Nitratexport und höhere Kosten zur Folge $\geq 6\times$	Maximale Biomasse ist eine schlechte Auswahlregel
CASE-033	Organische Materialien auf Kohle verderben	Die ausschließlich biologisch angebauten Parzellen blieben größtenteils unbebaut; Ohne ausreichende Kalkung hielten die Auswirkungen nicht an	Organisches Material ersetzt keine pH-Korrektur

Beleg	Positives äußeres Zeichen	Was ist schief gelaufen oder wurde nicht unterstützt?	Lektion
CASE-034	Einige Behandlungen erzeugten eine hohe Spätbiomasse	Frühe DOC/Cu-Pulse; Olivenrückstände hätten die Produktion fast eingestellt; Nährstoffindikatoren gingen zurück	Abfallidentität und Wasserchemie sind wichtiger als das Wort „organisch“
CASE-032	Die Chemie verbesserte sich nach der Behandlung	OM und physikalische Eigenschaften unterschieden sich nach 15 Monate nicht	Fruchtbarkeitskorrektur ist keine Bodenbildung
CASE-029	Frühe Enzym-/Pflanzenreaktion	Der biologische Gewinn hielt nicht an; pH/EC/Sodizität/Wasser blieben kontrollierend	Ein frühes mikrobielles Signal kann vorübergehend sein
BIO-006	Aufgewonnenes Weideland könnte beweidet werden	Beweidung/Trampeln erhöhte Verdichtung; Der Ausschluss hielt mehr Wasser zurück	Tiere gehören nach der Stabilisierung, nicht davor
BIO-009	32 Jahre konventionelle Rekultivierung	Mikrobielle Biomasse, Diversität und Zusammensetzung zeigten keine eindeutige Konvergenz mit der Referenz	Alter und Vegetationsdeckung garantieren keine Wiederherstellung des Mikrobioms
MIC-001	Kultivierte native Bakterien verbesserten das N/SIR	Die Bakterien-plus-Cyanobakterien-Mischung verbesserte keine gemessene Bodeneigenschaft; Vielfalt hat sich nicht verändert	Mehr Organismen oder Komplexität sind nicht unbedingt besser
MIC-003	Durch die Zugabe von Mikrobiomen kann die Funktion wiederhergestellt werden	Ein Inokulum mit geringer Diversität stellte die Nitrifikation nicht wieder her	Eine Kultur, die die Vielfalt verliert, kann dazu führen, dass notwendige Gilden verschwinden
MIC-006	Die AMF-Inokulation erhöhte die Wurzelbesiedlung	Enzyme und Glomalin verbesserten sich nicht	Ein Kolonisierungsmarker ist keine Ökosystemfunktion
HYP-001	Einige Inokula verbesserten die Frühindikatoren der Pflanze	Tee aus heimischer Minenerde half nicht; später verringerten sich die Biomasseunterschiede	„Nativer lebendiger Boden“ allein zeigt keinen Nutzen

So verwenden Sie diese Liste

Jede zukünftige Behandlung muss einen gepaarten Sicherheitsendpunkt und eine vordefinierte Fehlerbedingung haben. Kein positives Pflanzenergebnis macht die Bewertung von Wasser, Schadstoffen, Persistenz oder Auswirkungen auf den Spenderstandort ungültig.

SYNTHESE (SYNTHESIS). Ein grüner Hang kann eine Phase der Wiederherstellung sein. Es kann sich auch um ein gut verstecktes Problem handeln.

15. Langzeitstudien

Wochen–5 Jahre	7–16 Jahre	20–40 Jahre	56–65 Jahre
Vegetation · Enzyme · mineralischer N · Phytotoxizität · Wasserprobleme	Beständigkeit · Konvergenz · Nachwirkungen eingebrachter Materialien	organische Horizonte · Aggregate · Streu-/Wurzelkreisläufe · Fauna · beständige C-Pools	fortdauernde Bodenbildungsentwicklung
Experimente / wiederholte Feldbeobachtungen	Längsschnitt- und Wiederholungsbeobachtungen	Experimente + Chronosequenzen	Chronosequenz; kein einzelnes 65- jähriges Experiment

Abbildung 3. Evidenzhorizont und Prozesse, die in unterschiedlichen Zeiträumen erkennbar werden. Die Länge eines Blocks bezeichnet das Zeitfenster, nicht die Effektgröße.

FAKT. Zeitfenster im Korpus zeigen unterschiedliche Prozesse: Wochen bis 5 Jahre – frühe Pflanzenreaktion, Enzyme, mineralisches N, Phytotoxizität und Wasserprobleme; 7–16 Jahre – Beharrlichkeit, Konvergenz zwischen Behandlungen und Nachwirkungen von Bodenverbesserungsmaterialien; 20–40 Jahre – organische Horizonte, Aggregate, Fauna sowie Streu- und Wurzelzyklen; 56–65 Jahre – eine fortlaufende bodenbildende Entwicklung.

Virginia bietet einen seltenen langfristigen randomisierten Vergleich: Nach 16 und 27 Jahren konvergierte die Kontrolle bei einigen aggregierten Indikatoren mit den Behandlungen mit Bodenverbesserungsmaterialien, während bestimmte C/N-Fractionen und mikrobielle Biomasse Behandlungsvermächtnisse beibehielten. Sokolov zeigt im Alter von 4–65 Jahren eine C/N/P-Akkumulation und Horizontbildung, es handelt sich jedoch um eine Chronosequenz. Cerrejón im Alter von bis zu 21 Jahren verknüpft Vegetation, Abfall, Fauna und biogene Struktur, ist jedoch kein randomisiertes Experiment mit Bodenverbesserungsmaterialien. Die Lausitz zeigt, dass die pyritische Geochemie auch unter Vegetation über viele Jahre hinweg vorherrschend bleibt.



Bergehalde Smolnická, Braunkohlebecken Sokolov, Tschechien, 2023. Foto: Lubor Ferenc, CC BY-SA 4.0. Dies ist eine heutige Bergbaufolgelandschaft desselben Beckens, nicht die konkrete Altersreihe aus CASE - 020/023 ; die Aufnahme belegt keine gemessenen Veränderungen von C, N, P oder des Bodenprofils.

Obligatorische Grenze: Eine Chronosequenz vergleicht Standorte unterschiedlichen Alters; Eine Längsschnittstudie misst wiederholt dasselbe Experiment. Eine einzelne „65-Jahres-Kurve“ darf nicht von verschiedenen Standorten aus erstellt werden.



Bundesarchiv, Bild 183-1987-0212-305
Foto: Link, Hubert | 22. Januar 1987

Waldinsel im ehemaligen Tagebau Lohsa III, Lausitz, 1987. Foto: Hubert Link; Bundesarchiv, Bild 183-1987-0212-305 / CC BY-SA 3.0 DE. Die Aufnahme zeigt einen rekultivierten Standort der Region, misst jedoch weder Säuregrad noch Stoffaustrag oder den Zustand der konkreten Fläche aus [CASE-022](#).

16. Technosols

SYNTHESE (SYNTHESIS). Ein Technosol ist kein Versprechen, den historischen Boden, der vor dem Bergbau existierte, zurückzugeben. Es handelt sich um ein konstruiertes oder tiefgreifend verändertes Bodensystem, in dem eine mineralische Wurzelzone, Ergänzungen, Pflanzen und biologische Prozesse im Laufe der Zeit Funktionen bilden können.

Ein funktionsfähiges Technosol erfordert sicheres Ausgangsmaterial; ein ausreichender Feinerdeanteil; lose Verlegung ohne zerstörende Verdichtung; überschaubares Wasser; kompatibler pH/EC; qualifiziertes organisches Material; Pflanzen; und Überwachung. Der Fall Garzweiler zeigt, dass das Mineralfundament, eine Pionierpflanze zur N-Fixierung und der Kompost unterschiedliche Funktionen erfüllen. Das Kusbass-Fakultätsexperiment zeigt den Unterschied zwischen einer physischen Wurzelzone und einer biologischen Entwicklungspfad.



Braunkohletagebau Garzweiler, Deutschland, 2023. Foto: Stephan Sprinz, CC BY 4.0. Die Aufnahme zeigt den Maßstab des Tagebaus, jedoch weder das untersuchte Bodenprofil noch das Ergebnis einer 24-jährigen Rekultivierung aus CASE-021.

17. Hypothese des vorbesiedelten Materials

Link in der Hypothese	Direkter Beleg	Nahe analog	Nicht getestet
Sichere Bioströme → reifer Kompost	Ja: Standards, Feldversuche und Reifedaten	Kommunale und landwirtschaftliche Kompostierungssysteme	Es gibt kein universelles Rezept für alle Stoffströme
Kleines biologisches Inokulum → Vermehrung einiger Organismen	Ja: kultivierte native Bakterien aus 1 g des Spenderbodens	Träger, synthetische Gemeinschaften (SynComs), Fallenkulturen	Keine universelle Spendermaterialdosis
Sekundärreifung → funktionell unterschiedliches Material	Mechanistisch plausibel	Polnischer Kompost und Vorwuchstumsanaloga	Kein direkter Feldvergleich von B/C/D/E
Vorkolonisiertes Material → anhaltender Feldvorteil	NEIN	Frühe Analoga der pflanzlichen und mikrobiellen Reaktion	Das zentrale Versprechen der Hypothese
Verringerte externe Einträge	Teilbelege aus langfristigen Entwicklungspfaden	Spontane Sukzession und beständige Vegetation	Für System E nicht belegt

UNBEKANNT (UNKNOWN). Es wurde kein direktes Experiment gefunden, das einen Vorteil von vorkolonisiertem reifem Kompost gegenüber gewöhnlichem reifem Kompost oder direkter Inokulation zeigt. Dies ist kein Anspruch auf weltweite Neuheit; es ist die Grenze der geschlossenen Suche.

1. Natalias ursprüngliche Idee

Die prüfbare Reihenfolge ist nicht die direkte Ausbringung von Abfall oder gewöhnlichem Kompost auf einen Abraumhaufen. Es schlägt vor:

1. Rückverfolgbare und sichere Bioströme sammeln;
2. eine kontrollierte Kompostierung mit einer hygienischen thermophilen Phase von ausreichender Dauer durchführen;
3. die Reife und das Fehlen unzulässiger Verunreinigungen bestätigen;
4. Nach der thermophilen Phase eine kleine Menge verträglicher lebender Erde oder ein anderes biologisches Inokulum hinzufügen;
5. die Mischung einer separaten sekundären Reifungsphase unterziehen;
6. Tragen Sie das resultierende Material nur auf einen technischen, sicheren und vorbereiteten künstlichen Untergrund auf.
7. Prüfen, ob sich ein dauerhafterer Kreislauf entwickelt: Pflanzen → Wurzeln und Streu → Mikroorganismen und Fauna → verfügbare Elemente → neue Pflanzen .

Der entscheidende Unterschied zur gewöhnlichen Frage „Hilft Kompost?“ ist der vorgeschlagene zusätzliche Effekt der **Impfung vor der Anwendung, gefolgt von der Gemeinschaftsentwicklung im organischen Träger**.

2. Wurden direkte Analoga gefunden?

Im Rahmen der durchgeführten globalen Suche wurde **kein veröffentlichtes Experiment gefunden, das vollständig mit der gesamten Sequenz übereinstimmt**:

fertiger, hygienischer und reifer Kompost → kleine Menge kompatibles Inokulum aus natürlichem Boden → kontrollierte Sekundärreifung → vorbereiteter Kohleabraum → Pflanzen → Langzeit-Feldtest auf Sicherheit und verringerte Abhängigkeit von externen Einträgen.

Dies ist kein Beleg für die Neuheit und behauptet nicht, dass es ein solches Experiment nie gegeben hat. Es ist die Grenze der gefundenen Literatur.

Die abschließende gezielte Suche identifizierte **zwei verschiedene nächstliegende Analoga, die jeweils nur einen Teil der Sequenz abdecken**.

HYP-011 (Polen, 2026) kommt hinsichtlich Produktzweck und Feldanwendung am nächsten. Eine 20:60:20-Mischung aus Geflügelfedern, Weizenstroh und Braunkohle wurde **zu Beginn** des Prozesses mit drei Kulturstämmen beimpft, 41 Tage lang in einem dynamischen Reaktor kompostiert und das fertige Produkt auf sandigen Boden nach dem Abbau in Konin ausgebracht. Nach der Hygienephase gab es keine Spätimpfung; Die Feldarbeit umfasste nur eine behandelte und eine unbehandelte Parzelle, ohne eine Behandlung mit demselben reifen,

nicht beimpften Kompost. Der Artikel zeigt also, dass ein prämikrobiell angereicherter Abfallkompost hergestellt und auf Bergbaufolgeflächen ausgebracht werden kann, nicht aber, dass er sich anders verhält als gewöhnlicher reifer Kompost.

HYP-001, Coaltech/Universität Kapstadt, ist in der Reihenfolge **Inokulum → separate Inkubation vor der Pflanze → aus Kohle gewonnenes Mineralsubstrat** am nächsten. Eine Mischung aus 95 % ultrafeinem Kohleverarbeitungsrückstand und 5 % verbrauchtem Malzkorn wurde mit Kompost oder Wurmkompost-„Tee“, Brauerei-Fermenter-Flüssigkeit, einem kommerziellen Konsortium oder „Tee“ aus einheimischem Minenboden beimpft, aktiviert und sieben Tage lang inkubiert, bevor *Eragrostis tef* gepflanzt wurde. Das System unterscheidet sich von der ursprünglichen Hypothese: Die organische Komponente war kein reifer Kompost, das Inokulum war flüssig, die Sekundärphase war kurz und das Experiment wurde in Töpfen durchgeführt.

Dennoch liefert es ein kausal wichtiges Ergebnis. Kompost-„Tee“ und das kommerzielle Konsortium verbesserten die frühen Pflanzenindikatoren, während das Inokulum aus einheimischem Minenboden dies nicht tat. Bis zum zweiten Zyklus waren die Unterschiede in der mikrobiellen Biomasse gering geworden und erklärten nicht die Pflanzenproduktivität. Das bloße Hinzufügen von lebender, heimischer Erde ist daher keine Garantie für ein brauchbares Ergebnis; Spenderherkunft, Gemeinschaftsfunktion, Träger und das Schicksal des Inokulums nach der Pflanzung.

3. Die weltweit nächstliegenden Technologien

Quelle	Sequenz	Kategorie	Was es zur Hypothese hinzufügt	Hauptgrenze
HYP-001 Coaltech 2023	Rückstände aus der Kohleverarbeitung + 5 % verbrauchtes Malzkorn → flüssiges mikrobielles Inokulum → 7-tägige Inkubation → Topfversuch	Enges Analogon zu E, keine direkte Entsprechung	Vorinkubation eines biologisch angereicherten Technosols; direkter Vergleich mehrerer Inokula	Kein reifer Kompost; kurze Laufzeit; „Tee“ aus standorteigenem Boden half nicht
HYP-011 Polen 2026	Federn + Stroh + Braunkohle → kultiviertes Inokulum am Tag 0 → 41 Tage der Kompostierung → 18,3 t/ha auf Nachbergbausand → Mais	Technisch geimpfter Kompost	Vollständiger Weg von der Abfallmischung über die beimpfte Kompostierung bis zur Feldausbringung; Prozesskontrolle vorhanden	Das Inokulum wurde nicht zu spät hinzugefügt; Das Feld war beimpft nicht mit normalem Kompost zu vergleichen. eine Parzelle pro Behandlung; eine Saison
HYP-002 Asemaninejad et al. 2018	Bergbaurückstände + Zellstoffschlamm + <0.02% Waldhumus	Enges Analogon von C	Ein sehr geringer Spenderbodeneintrag veränderte manchmal die Biomasse und das Mikrobiom erheblich	Sekundärreife nicht etabliert; Cu/Ni wurde manchmal löslicher

Quelle	Sequenz	Kategorie	Was es zur Hypothese hinzufügt	Hauptgrenze
HYP-003 Romero-Estonillo et al. 2023	Minenboden + Kompost, 15-tägige Stabilisierung → PGPR/AMF bei der Pflanzung	Enges Analogon zu D, keine direkte Entsprechung	PGPR zeigte eine Wirkung; die AMF-Ergebnisse waren weder einzeln noch in Kombination durchgängig positiv	Das Inokulum wird bei der Pflanzung zugegeben, nicht vor einer gesonderten Reifung
HYP-004 Li et al. 2026	Rindermist + Reisstroh → stadienspezifische Inokulation an Tagen 0/5/14/22	Analog zum Kompostierungsprozess	Der Zeitpunkt der Inokulation veränderte die Abfolge, den TN, die Humifizierung, den GI und die Topfreaktion	Kein Spenderboden und kein Minensubstrat
HYP-005/006 Kompost-Sukzessionsstudien	Thermophile Phase → Abkühlung → verlängerte Reifung	Mechanismus	Reifer Kompost ist biologisch nicht statisch; Community und N/C verändern sich weiterhin	Kein B/C/D/E-Feldergebnis
HYP-007 Ngo und Cavagnaro 2018	Kompost × 40-tägige Vorbefeuchtung vor der Pflanzung × AMF/Pflanze	Analog zu B-Zeit und direkter Inokulation D	Die Vorbehandlung verändert den mineralischen N; Kompost kann das Wachstum steigern und die Besiedlung verringern	Landwirtschaftliches Topfsystem, nicht E
HYP-008 Tkacz et al. 2015	Steriler Sand oder Kompost + 10% natürliche Erde → Pflanzen und serielle Verdünnung	C	Empfängermedium und Pflanze filtern die Gemeinschaft; Krankheitserreger können übertragen werden	Keine Nachreifung und kein Minensubstrat
HYP-009 Han et al. 2022	1/3/5 cm Spenderbodenschicht → dreijährige Feldsanierung	Reaktion auf die Bodenübertragungsdosis	Herkunft und Menge des Spenders bestimmen gemeinsam den Verlauf	10/30/50 L/m ² , kein kleines Inokulum
HYP-010 SARE ONE22-422	Fertiger Kompost + 10/25/50% verbrauchtes Pilzsubstrat → 14 Tage	Nächstes Verfahren	Pilzbiomasse und F:B veränderten sich mit der Dosis vor der Anwendung	Feldarbeit abgesagt; Keine Auswirkungen auf Pflanzen/Boden/Wasser

4. Was bereits demonstriert wurde

Direkt demonstriert

- Die thermophile Phase restrukturiert ein Kompost-Mikrobiom radikal; Abkühlung und Reifung bringen eine neue Sukzession. Das Hinzufügen einer sensiblen natürlichen Bodengemeinschaft vor der sanitären thermophilen Phase ist unlogisch, wenn das Ziel darin besteht, ihre lebenden Bestandteile zu erhalten.
- Auch ausgereifter Kompost, der für die kommerzielle Nutzung geeignet ist, verändert sich bei längerer Reifung weiter: Atmung und lösliches labiles C nehmen ab, die Bakteriengemeinschaft verändert sich und die Nitrifikation nimmt zu (HYP-006).
- Der Zeitpunkt der Hinzufügung gezielter mikrobieller Konsortien kann den Kompostierungsprozess und die Endproduktindikatoren verändern (HYP-004). Dies zeigt die

Bedeutung des Zeitpunkts der Inokulation und nicht die Überlegenheit des natürlichen Bodens.

- Auf abgebautem Landmaterial verbessern einige Inokula die Pflanzenentwicklung, während andere mit demselben Träger keine Wirkung haben (HYP-001 , HYP-003).
- Eine sehr geringe Zugabe von Waldhumus kann die pflanzlichen und mikrobiellen Reaktionen in einem konstruierten Technosol verändern, die Wirkung hängt jedoch von den Minenrückständen und dem organischen Träger ab, und die Metallmobilität kann sich verschlechtern (HYP-002).
- Herkunft und Dosis des Spenders sind von Bedeutung; Ein größerer Bodentransfer lenkt die Gemeinschaft oft stärker, erhöht jedoch die ökologischen Kosten (HYP-009).
- Inokulum kann unerwünschte Organismen übertragen und nährstoffreicher Kompost kann die AMF-Besiedlung reduzieren (HYP-007 , HYP-008).

Durch verwandte Wirkmechanismen gestützt

- Eine sekundäre Reifung kann die Instabilität von leicht abbaubarem C und NH_4 -dominated verringern. Dies muss anhand der Atmung, des DOC, des Verhältnisses $\text{NH}_4:\text{NO}_3$ und der Phytotoxizität überprüft werden, nicht anhand des Kalenders.
- Durch die Zugabe einer Mineralfraktion werden Oberflächen für die Sorption und mögliche organisch-mineralische Assoziationen geschaffen. Ihr Ausmaß wird durch Tongehalt, Mineralogie, Fe/Al-Oxide, Ca, pH-Wert und gelöste organische Stoffe bestimmt; Das bloße Vorhandensein von Bodeninokulum weist nicht auf eine Stabilisierung hin.
- Vorinkubation kann den anfänglichen Nährstoffimpuls verändern, aber die Richtung ist nicht universell: Nitrifikation kann NH_4 reduzieren, während sich mobiles NO_3 ansammelt.

5. Was nicht nachgewiesen wurde

- System E hat sich im Durchschnitt nicht als besser erwiesen als gewöhnlicher reifer Kompost (B), die direkte Zugabe von ganzem Spenderboden (C) oder kultiviertes Inokulum, das zum Zeitpunkt der Platzierung angewendet wird (D).
- Natürlicher Boden hat sich im Vergleich zum Kompostmikrobiom, kultivierten einheimischen Konsortien, AMF/PGPR oder spontaner pflanzenvermittelter Kolonisierung nicht als das beste Inokulum erwiesen.
- Es wurde keine universelle wirksame Mindestdosis an Spendererde festgelegt.
- Es wurde nicht nachgewiesen, dass eine zusätzliche mikrobielle Vielfalt nach Kontakt mit dem Minensubstrat, dem Klima und der Pflanze bestehen bleibt.
- Eine Verringerung der Notwendigkeit einer wiederholten Anwendung nach 5–20 Jahren konnte nicht nachgewiesen werden.
- Die Sicherheit für Abfluss/Sickerwasser, Metalle, Nitrat, P, Krankheitserreger oder invasive Ausbreitungsorganismen wurde nicht nachgewiesen.
- Es konnte nicht gezeigt werden, dass sich eine konstruierte Gemeinschaft eher in Richtung des lokalen Referenzökosystems als in einen dauerhaften, aber unterschiedlichen

anthropogenen Zustand bewegt.

6. Chemische Basis

Kohlenstoff

In der ersten Phase werden leicht verfügbare Verbindungen zu CO₂, Wasser und mikrobiellen Produkten mineralisiert. Etwas C gelangt in die mikrobielle Biomasse und Nekromasse; Einige bleiben als partikuläre organische Substanz zurück. Durch die Sekundärreifung nach Zugabe von Mineralerde können neue Mineraloberflächen für die Sorption und Aggregation entstehen, der Schutz hängt jedoch von der Mineralogie und der Oberflächensättigung ab. Auch der gegenteilige Effekt ist möglich: Die Beimpfung kann die Zersetzung beschleunigen, den CO₂-Verlust erhöhen und zum Zeitpunkt der Anwendung weniger organisches C zurücklassen.

Stickstoff

Organischer N durchläuft Ammonifikation zu NH₄⁺, mikrobielle Immobilisierung, Nitrifikation zu NO₃⁻, gasförmige Verluste und, in anaeroben Mikrostandorten, Denitrifikation. Reiferes Material erzeugt normalerweise einen weniger labilen N-Schock, aber die Sekundärreifung garantiert kein geringeres Feldrisiko: Die Umwandlung von NH₄⁺ in NO₃⁻ kann die N-Mobilität erhöhen. Die erforderlichen Tests erstrecken sich daher über Gesamt-N oder C:N hinaus auf NH₄-N, NO₃-N, potenziell mineralisierbares N, Atmung und N im Sickerwasser.

Phosphor

P wird durch Mineralisierung freigesetzt, in mikrobielle Biomasse eingebaut, durch Fe/Al-Oxide sorbiert, mit Ca ausgefällt oder in Lösung belassen. Der mineralische Anteil des Spenderbodens kann gelöstes P reduzieren, wenn die Sorptionskapazität geeignet ist, oder stattdessen P und organische Liganden hinzufügen und die Mobilität erhöhen. Für die jeweilige Mischung sind Sorptionstests und wasserextrahierbare P-Messungen erforderlich.

pH und CEC

Kompost und Spendererde können die Pufferung und CEC durch geladene organische/mineralische Oberflächen erhöhen. Der pH-Wert einer Mischung kann jedoch nicht zuverlässig durch Massenmittelung ermittelt werden. Bei pyritischem Abraum kann die Säurebildung die Pufferung der Zusatzstoffe um ein Vielfaches übersteigen; Bei salzhaltigem/natriumhaltigem Material ersetzt eine organische Bodenverbesserer nicht die Korrektur des Salzgehalts/Natriumgehalts.

Salze und Wasser

Bei der Sekundärreifung werden lösliche Salze nicht automatisch entfernt. EC, Chlorid, Sulfat und Natrium müssen vor der Anwendung gemessen werden. Eine verbesserte Aggregation und Wasserretention sind nur dann sinnvoll, wenn DOC/CSB, Nitrat, P und Metalle im Wasser nicht gleichzeitig ansteigen.

7. Biologische Grundlagen

Ein kleiner Teil des kompatiblen Spenderbodens könnte theoretisch Bakterien, Pilze, AMF-Vermehrter, Zersetzer, Protozoen, Nematoden, Mikroarthropoden, Sporen und Samen einbringen. Es fügt auch mineralische Oberflächen und Nährstoffe hinzu; Ohne eine sterilisierte Spendermaterialkontrolle kann eine biologische Wirkung nicht von einer physikalisch-chemischen getrennt werden.

Warum ein Effekt bestehen bleiben könnte:

- Der organische Träger verleiht dem Inokulum ein geschütztes Medium und Substrat vor dem Kontakt mit der ungünstigen Minen-Abfall-Matrix.
- Die sekundäre Phase ermöglicht die Kolonisierung des Trägers und die Bildung von Wechselwirkungen.
- Nach dem Pflanzen bilden die Wurzeln eine neue Nische und Kohlenstoffquelle.
- Kompatibles Spendermaterial kann die Entstehung seltener funktioneller Gruppen beschleunigen.

Warum ein Effekt verschwinden könnte:

- reifer Kompost trägt bereits eine große eigene Gemeinschaft;
- Der pH-Wert des Empfängers, Salze, Metalle und Feuchtigkeit sowie die Pflanzenidentität filtern die meisten eingeführten Taxa.
- das Inokulum kann quantitativ zu klein oder funktionell inkompatibel sein;
- nährstoffreicher Kompost kann die Abhängigkeit der Pflanzen von AMF verringern;
- Ein früher Gemeinschaftsunterschied kann verschwinden, nachdem das labile C aufgebraucht ist.

8. Risiken

1. Krankheitserreger, Parasiten, Unkrautsamen, invasive Organismen und unerwünschte Pilze aus Spenderboden.
2. Schädigung des Spenderökosystems durch Bodenentnahme.
3. Ein Puls aus Nitrat, P und Salzen nach der Sekundärreifeung.
4. Mobilisierung von Metallen und Metalloiden durch organische Liganden oder veränderten pH-Wert.
5. Anaerobe Zonen, Geruch, Methan/N₂O und hoher Sauerstoffbedarf eines instabilen Produkts.
6. Vermehrung einer Gemeinschaft, die im Träger gut wächst, im Minensubstrat jedoch schlecht funktioniert.
7. Eine Wirkung wird fälschlicherweise „Mikroben“ zugeschrieben, wenn sie durch Mineralien oder Nährstoffe im Spenderboden verursacht wurde.
8. Kosten und Reproduzierbarkeit: Ein Mikrobiom kann von Charge zu Charge instabil sein.

9. Das Spenderbodenproblem

Die gefundenen Dosen umfassen Größenordnungen, bilden jedoch keine universelle Dosis-Wirkungs-Kurve:

- **HYP-002** : Waldhumus mit weniger als 0,02 % der Trockenmasse des organischen Trägers – ein extrem kleines Signal;
- **BIO-002** : 5 % und 25 % frischer Waldboden in einer Gewächshausmischung mit Nachbergbausubstrat – bereits ein erheblicher Anteil;
- **HYP-008** : 10 % v/v natürlicher Boden, gefolgt von serieller Verdünnung in einem kontrollierten Mikrokosmos;
- **HYP-009** : Übertragung von Bodenschichten mit einer Dicke von 1, 3 und 5 cm – etwa 10, 30 und 50 L/m², eine ökologisch kostspielige Übertragung;
- **HYP-010** : 10–50 % pilzreiches verbrauchtes Pilzsubstrat – ein Trägerzusatz, kein kleines Bodeninokulum.

Diese Werte lassen sich nicht zu einem „optimalen Prozentsatz“ zusammenfassen. Sie unterscheiden sich in Zweck, Dosiseinheit, Spendermaterial und Empfängermedium. Ein neues Experiment erfordert eine logarithmische Pilotdosisreihe mit Kontrollen aus lebendem und sterilisiertem Material. Die bevorzugte Spender-Quellen-Hierarchie ist:

1. Material, das in jedem Fall rechtmäßig entfernt oder vernichtet wird;
2. eine kleine Rhizosphären- oder Waldstreuprobe, die ohne wiederholte Entnahme vermehrt wurde;
3. ein kompatibles, lokal kultiviertes Konsortium mit bekannter biologischer Sicherheit;
4. kommerzielles Inokulum erst, nachdem Taxa und Funktionen bestätigt wurden;
5. Intakte, wertvolle Spenderlebensräume ausschließen.

10. Vergleich der Systeme A/B/C/D/E und B-Zeit

System	Behandlung	Erwartete Unterscheidung	Was könnte zu einer falschen Schlussfolgerung führen?
A	Minensubstrat ohne organische Zusätze	Grundlegende natürliche Sukzession und geochemische Einschränkung	Verschiedene Anfangsbestände, Samenregen und Hydrologie
B	Qualifizierter reifer Kompost	C/Nährstoffe/Struktur plus komposteigenes Mikrobiom	Verwechslung eines frühen Nährstoffimpulses mit Bodenbildung
C	B + eine kleine Menge ganzer lebender Spendererde, gemischt bei der Anwendung	Übertragung des gesamten Spenderbodens ohne vorherige Entwicklung in Kompost	Spenderminerale/Nährstoffe; Hartes Substrat filtert das Inokulum sofort
D	B + kultiviertes natives Bakterien-/Pilz-Inokulum, gemischt bei der Anwendung	Überführung der kultivierbaren Fraktion ohne vorherige Entwicklung in Kompost	Trägereffekt; Kultivierungsvoreingenommenheit; Hartes Substrat filtert das Inokulum sofort

System	Behandlung	Erwartete Unterscheidung	Was könnte zu einer falschen Schlussfolgerung führen?
E	Vorkolonisierter reifer Kompost + kontrollierte Nachreifung	Mögliche Trägerkolonisierung, veränderte C/N-Formen und -Gemeinschaft vor dem Feldeinsatz	Auswirkung von zusätzlicher Zeit/Feuchtigkeit/Belüftung anstelle von lebendem Inokulum; Übertragung von Krankheitserregern; C/N-Verluste; Nitratansammlung
B-Zeit	Derselbe reife Kompost mit derselben sekundären Haltezeit wie E, jedoch ohne lebendes Inokulum	Trennt Zeit/Feuchtigkeit/Belüftung von der Vorbesiedlung	Steuert den Träger nicht, es sei denn, er wird separat hinzugefügt

Es gibt eine wissenschaftliche Grundlage für die Erwartung, dass sich E von B/C/D und B-Zeit unterscheidet, da Reifung und Impfzeitpunkt die Chemie und die Gemeinschaft verändern können. Es gibt keine wissenschaftliche Grundlage für die Annahme, dass E besser sein wird.

11. Theoretische Berechnung

11.1 Zweck

Dies ist ein **MODELL/HYPOTHESE, KEINE EXPERIMENTELLE FAKT**. Die Berechnung zeigt das Ausmaß der Belastung und hilft, gefährliche Behandlungen auszuschließen; Es sagt weder Pflanzenwachstum noch Bodenbildung voraus.

11.2 Ein beobachtetes Materialprofil

Aus Gründen der Transparenz wird in dem Beispiel kein erfundener „Durchschnittskompost“ verwendet. Es wird ein empirischer Mittelwert für Ziegenmistkompost aus **ORG-007** (Analyselaborproben der Utah State University, 2005–2019) verwendet: Feuchtigkeit 54 %; wie erhalten, N 1,0 %, P₂O₅ 0,9 %, K₂O 1,9 %; pH-Wert 8,4; EC 5 dS/m; C:N 10. Die Umrechnung in Trockenmasse ergibt etwa 2,17 % N, 0,85 % elementares P und 3,43 % elementares K; Das aus dem angegebenen C:N × N abgeleitete indikative C beträgt etwa 21,7 % der Trockenmasse. Der letzte Wert eignet sich nur für eine vorläufige Massenschätzung und ersetzt nicht die direkte Analyse des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC).

Trockenkompost-Dosis	Nasse Masse bei 54% Feuchtigkeit	Ungefähr C	Gesamt-N	Elementar P	Elementar K
20 Mg Trockenmasse/ha	43.5 Mg/ha	4.35 Mg/ha	435 kg/ha	171 kg/ha	685 kg/ha
50 Mg Trockenmasse/ha	108.7 Mg/ha	10.87 Mg/ha	1,087 kg/ha	427 kg/ha	1,713 kg/ha
100 Mg Trockenmasse/ha	217.4 Mg/ha	21.74 Mg/ha	2,174 kg/ha	853 kg/ha	3,426 kg/ha

Formel für jeden Nährstoff: $\text{loading, kg/ha} = \text{dry-mass dose, Mg/ha} \times \text{concentration, \% dry matter} \times 10.$

Diese Tabelle empfiehlt weder Ziegenmistkompost noch sagt sie, dass der gesamte N/P/K-Gehalt verfügbar sein wird. Es zeigt, warum selbst eine „moderate“ Trockenmassedosis Hunderte Kilogramm Nährstoffe pro Hektar ausbringen kann und warum die Dosis durch das Wasserrisiko und nicht durch die gewünschte Schichtdicke begrenzt werden sollte.

11.3 Inokulummasse

Die Anwendung des HYP-002 -Anteils ($<0,02$ % Trockenmasse) auf 20 mg Trockenträger ergibt weniger als 4 kg Trockenhumus pro Hektar. Fünf Prozent Spenderboden ergeben 1 Mg/ha; 25 % ergeben 5 Mg/ha. Diese Behandlungen unterscheiden sich hunderte oder tausende Male und sind keine gleichwertigen Eingriffe.

11.4 Was das Modell grundsätzlich nicht berechnen kann

- pH- und EC-Werte können nicht ehrlich durch lineare Mittelung abgeleitet werden;
- potenziell mineralisierbarer N erfordert die Inkubation der spezifischen Mischung;
- Für die P-Verfügbarkeit sind Sorptions-/Desorptionsdaten für das spezifische Nachbergbausubstrat erforderlich.
- C-Persistenz erfordert die Trennung von Kompost-C, Neupflanzen-C und fossiler Kohle C;
- Die Wasserreaktion erfordert ein Säulen- oder Lysimeterexperiment.

12. Kann sich E tatsächlich von gewöhnlichem Kompost unterscheiden?

Ja, es kann messbar unterschiedlich sein. Die Literatur zeigt, dass die Sukzession in der Gemeinschaft, die Reifungsdauer, die Feuchtigkeitgeschichte und die Zusammensetzung des Inokulums die mikrobielle Biomasse/Zusammensetzung, C-Umwandlungen, N-Formen, Humifizierungsindikatoren und manchmal den Pflanzenzustand verändern.

Ein zusätzlicher Vorteil von E wurde jedoch nicht nachgewiesen. Der Effekt kann dem von B entsprechen, wenn reifer Kompost bereits eine funktionell ausreichende Gemeinschaft aufweist; gleich C oder D, wenn die Kolonisierung nach direkter Anwendung genauso schnell verläuft; gleiche B-Zeit, wenn die Differenz nur durch zusätzliches Halten entsteht; oder schlechter sein als B/C/D aufgrund von Nährstoffverlust, Nitratanreicherung, Krankheitserregerübertragung, Spenderfehlpaarung, AMF-Unterdrückung oder zusätzlichen Kosten.

Der entscheidende unbewiesene Übergang ist:

Veränderung des Mikrobioms und der Reifeindikatoren während der Sekundärphase → sichereres Wasser und ein autarkeres Bodensystem nach dem Bergbau Jahre später.

Das ist der Übergang, den das Experiment testen muss.

13. Wie man es experimentell testet

Stufe 1 – kontrollierter Mesokosmos

Auf einem sorgfältig charakterisierten, sicheren Untergrund nach dem Bergbau:

- **A** : vorbereitetes Nachbergbausubstrat ohne Kompost;
- **B** : gewöhnlicher qualifizierter reifer Kompost;
- **C** : B + eine kleine Menge ganzer lebender Spendererde, gemischt bei der Anwendung;
- **D** : B + kultiviertes natives Bakterien-/Pilz-Inokulum, bei der Anwendung gemischt;
- **E** : vorkolonisierter reifer Kompost + definierte Sekundärreifung vor der Anwendung;
- **B-time** : derselbe reife Kompost mit der gleichen sekundären Haltezeit wie E, jedoch ohne lebendes Inokulum;
- **C-killed** : die gleiche Masse an Spendermineralmaterial nach der Sterilisation;
- **D-killed/carrier** : inaktiviertes Kulturprodukt + identischer Träger;
- **E-killed/carrier-time** : der gleiche Träger und die gleiche Sekundärphase mit inaktiviertem Inokulum.

Obligatorische Regeln:

1. Gleichen Sie trockene Kompostmasse, Ziel-C/N/P/K, Spendermineralmasse, Wasser, Misch- und Inkubationstemperatur aus.
2. Legen Sie die Kalenderzeit nicht im Voraus fest: Definieren Sie den Übergang anhand von Temperaturstabilität, Sauerstoff, Atmung, $\text{NH}_4\text{:NO}_3$, EC, Keimung/Phytotoxizität und Hygienekriterien.
3. Spenderchargen und Mesokosmosposition blockieren; Behandlungen randomisieren.
4. Bestimmen Sie die Stichprobengröße anhand der Pilotvarianz und einer vorab registrierten Trennschärferechnung, nicht anhand einer attraktiven Zahl.
5. Bepflanzte und unbepflanzte Teilflächen müssen die Pflanzenfilterung von Prozessen unterscheiden, die nur durch das ausgebrachte Material verursacht werden.
6. Mehrere native Pflanzenfunktionsgruppen verwenden; Kombinieren Sie AMF-abhängige und weniger AMF-abhängige Pflanzen nicht in einer Maßnahme.

Co-primäre Ergebnisse:

- Sicherheit: Nitrat, Ammonium, gelöster/suspendierter P, DOC/CSB, DO, EC, pH, Salze und standortrelevante Metalle im Sickerwasser;
- Autonomieverlauf: Pflanzenüberleben/Rekrutierung, Streu-/Wurzeleinträge, mikrobielle Biomasse/Funktion, Pilzgemeinschaft/AMF, Aggregation, Infiltration und Wasserretention nach Beendigung der externen Einträge.

Stoppregeln: inakzeptables Sickerwasser, unzureichende Krankheitserreger-/Unkrautbekämpfung, anaerobe Instabilität, Pflanzentoxizität oder Metalmobilisierung. Nur sichere Behandlungen, die in Bezug auf wasserbezogene Messgröße nicht minderwertig sind, kommen voran.

Stufe 2 – wiederholtes Feldexperiment

Setzen Sie nicht auf die Behandlung mit der größten Biomasse, sondern auf Pareto-sichere Behandlungen. Verwenden Sie randomisierte Blöcke, eine Basissaison, Abfluss-/Sickerwassermessungen, keine erneute Anwendung nach der Einrichtung und Erhebungen nach 1, 2, 3, 5, 7 und mehr als 10 Jahren. Für den Erfolg ist eine geringere Abhängigkeit von Interventionen erforderlich, nicht eine einzige grüne Saison.



Feldstudie HYP-011 auf Bergbaufolgeland bei Konin/Kleczew. Abbildung 1 aus Choińska-Pulit et al. (2026), CC BY 4.0. Die Darstellung zeigt Kontrollfläche, Behandlungsfläche und Trennstreifen. Jede Variante umfasste eine große Fläche; viele gemessene Pflanzen ersetzen keine unabhängige Wiederholung von Versuchspartzellen.

18. Das polnische Experiment von 2026

FAKT · NAHE ANALOG · Feldexperiment (HYP-011). Das nächstliegende technologische Analogon verwendete eine Feder-/Stroh-/Braunkohle-Mischung bei 20:60:20, mikrobielle Inokulation, 41-tägige Verarbeitung und Anwendung auf Nachbergbauboden mit einer Feldmenge von 18,3 t/ha des Produkts; Im Maisexperiment wurde eine frühe positive Pflanzenreaktion beobachtet. Es ist nicht abschließend geklärt, ob der Feldpreis auf Basis der Nass- oder Trockenmasse berechnet wurde.

Kartenfeld	Aufgezeichnet
Rohstoffe	Feder: Stroh: Braunkohle = 20:60:20

Kartenfeld	Aufgezeichnet
Inokulation	Mikrobenstämme und Zeitpunkt sind im bibliografischen Datensatz HYP-011 angegeben
Verarbeitung	41 Tage; Reaktorbedingungen, C:N und NH ₄ -N sind im Evidenzdatensatz dokumentiert
Feldrate	18,3 t/ha; Die Berechnungsgrundlage sollte anhand der Originalveröffentlichung überprüft werden
Ernte / Ergebnis	Mais; frühe Pflanzenreaktion
Stärke der Belege	Untersuchung eines konstruierten Materials und seiner praktischen Anwendung; enges Analogon, kein direkter Test von System E

ES GAB KEINE FELDKONTROLLE MIT DEMSELBEN reifen, NICHT INOKULIERTEN KOMPOST. Das Experiment isoliert daher nicht die Wirkung der Inokulation und zeigt keinen Vorteil unserer Sequenz.



Feldversuch HYP-011 : Kontrolle ohne Kompost links, Kompostfläche rechts. Abbildung 6 aus Choińska-Pulit et al. (2026), CC BY 4.0. Der sichtbare Unterschied betrifft eine Saison und das vollständige Kompostmaterial; er isoliert weder den Effekt der Inokulation noch belegt er eine langfristige Bodenwiederherstellung.

G. Das polnische Experiment von 2026

Veröffentlichung: Anna Choińska-Pulit, Justyna Sobolczyk-Bednarek, Dominika Kufka, Amelia Zielińska. „Entwicklung und Feldbewertung eines mikrobiell inokulierten Feder-Stroh-Braunkohle-Kompostmaterials für die Rekultivierung von Böden nach dem Bergbau.“ *Materialien* 2026, 19(14), 3035; veröffentlicht am 14. Juli 2026; DOI 10.3390/ma19143035 (HYP-011).

Feld	Verifizierter Datensatz
Rohstoffe	Geflügelfedern 20%, Weizenstroh 60%, Braunkohle 20%
Inokulum	Mehrstammkomplex: <i>Bacillus altitudinis</i> 33, <i>Bacillus methylotrophicus</i> Alk, <i>Streptomyces fulvissimus</i> K59
Impfzeit	Zu Beginn des Prozesses, nicht nach der thermophilen Phase
Verfahren	Scale-up vom Labor auf einen dynamischen 200 dm ³ -Reaktor; 41 Tage
Produkt	C:N 12.09; NH ₄ -N 0.03%; Bewerbung bei 18,3 t/ha
Feld	Sandiger Bergbaufolgeboden bei Konin; Mais (<i>Zea mays</i>); Feldebewertung in 2025, eine Saison
Studiendesign	Eine behandelte Parzelle und eine unveränderte Parzelle; Viele gemessene Pflanzen innerhalb einer Parzelle ersetzen nicht die unabhängige Parzellenreplikation
Ergebnis	Bodenurease 3.91 UU; P ₂ O ₅ 3.4 g/kg; mittlere Sprosshöhe 30.23 gegenüber 25.88 cm, ein 15%-Unterschied, $t(645)=6.63$, $p<0.001$
Einschränkungen	Feuchtigkeit und Temperatur im zeitigen Frühjahr schränken die absolute Enzymaktivität ein; Keine Wasser-/Sickerwasser-, Mikrobiom-Persistenz- oder Autonomie-Messgröße

Kritische Grenze: **Es gab keine gewöhnliche Feldkontrolle für ausgereiften, nicht beimpften Kompost.** Bei der Kompostierung wurden beimpfte und nicht beimpfte Chargen verglichen, der Feldvergleich beantwortet jedoch nicht die Frage zwischen gewöhnlichem Kompost B und vorgeimpftem Material D/E. Dies ist eine enge Analogie und kein direkter Test der Hypothese (HYP-011).

19. Kultivierbares standortheimisches Mikrobiom

FAKT • DIREKTER BELEG FÜR DIE KULTIVIERBARE FRAKTION • kontrolliertes 28-wöchiges Experiment (MIC-001). Im Pilbara-Experiment wurde eine kultivierbare Bakterienfraktion aus 1 g Spenderboden gewonnen, vermehrt, auf einen Träger aufgebracht und auf Bergbaufolgeboden ausgebracht. Nach 28 Wochen führte die reine Bakterienbehandlung zu +75 % Gesamt-N gegenüber der Kontrolle und +147 % substratinduzierter Atmung gegenüber der Kontrolle; Bakterien plus Cyanobakterien verbesserten die gemessenen Bodeneigenschaften nicht zusätzlich.

DER KULTURIERBARE FRAKTION IST KEINE KOPIE DES GESAMTEN BODENMIKROBIOMS. Der kultivierbare Teil der Gemeinschaft war skaliert, nicht der gesamte Boden und nicht sein vollständiger Satz an Funktionen.

Kritische Grenze: Dies ist eine kultivierbare Fraktion, keine vergrößerte Kopie des Bodens. Durch die Kultivierung werden Organismen ausgewählt, die in dem gewählten Medium wachsen können. seltene Taxa, obligate Symbionten und einige Interaktionen gehen verloren, und die Drift der Gemeinschaft setzt sich während der Skalierung fort.

H. Kultivierbares standortheimisches Mikrobiom

Was sich tatsächlich kultivieren lässt

- Kultivierbare native Bakterien und einige frei lebende Pilze können in einem kontrollierten Medium vermehrt und über einen Träger (MIC-001/002) verabreicht werden.
- AMF kann durch Fallenkulturen mit einer Wirtspflanze erhöht werden; Sie sind obligate Biotrophen und erfordern daher kompatible lebende Pflanzen (MIC-004/005).
- Definierte Konsortien/SynComs sind leichter zu standardisieren, reproduzieren aber nur einen schmalen Teil des Nahrungsnetzes (MIC-007/008).

Direkte Tatsache über eine kleine Spenderprobe

MIC-001: 1 g natürlicher Boden → 25 mL -Brühe für 7 Tage → serieller Transfer von 1 mL für weitere 7 Tage → 1 mL -Kultur auf ein extrudiertes Pellet → degradiertes Boden nach dem Bergbau in der Pilbara. Nach 28 Wochen erhöhte die bakterielle Behandlung den Gesamtstickstoff um 75 % und die substratinduzierte Atmung um 147 %; Die Bakterien-plus-Cyanobakterien-Mischung verbesserte keine der gemessenen Bodeneigenschaften. Dabei handelt es sich um die Kultivierung des kultivierbaren Anteils, nicht um die Vermehrung des gesamten Bodens.

MIC-005: 50 g Feldmaterial → ein 1,000 mL Topf mit autoklaviertem Sand und Wirtspflanzen → vier Monate. Dies bestätigt die vom Wirt unterstützte Vermehrung von AMF, legt jedoch keine Dosis pro Hektar fest.

Lebender Spenderboden, kultiviertes Inokulum und SynCom

Ansatz	Nutzen	Verlust/Risiko	Evidenzgrenze
Ganzer Boden	Beste Rückhaltung unbekannter Bakterien, Pilze, Keime, Fauna und Wechselwirkungen	Spenderschäden, Krankheitserreger/Samen, geringe Skalierbarkeit	Richtung der Entwicklungspfad demonstriert; keine universelle Mindestdosis; Der Effekt kann innerhalb der inokulierten Schicht verbleiben (HYP-009, MIC-009)

Ansatz	Nutzen	Verlust/Risiko	Evidenzgrenze
Kultiviertes/angereichertes Inokulum	Großes Volumen aus einer kleinen Probe; Qualitätskontrolle und Speditionslieferung möglich	Auswahl schnell wachsender kultivierbarer Fraktionen, Community-Drift, Verlust von Gilden/Interaktionen	Einzelne Bodenfunktionen nach dem Bergbau verbessert; Ökologische Gleichwertigkeit nicht nachgewiesen (MIC-001/002/003)
Definiertes Konsortium / SynCom	Reproduzierbare Zusammensetzung und Zielfunktionen	Enges Nahrungsnetz; unvorhersehbarer Wettbewerb/Erleichterung	Etablierung und Nutzen sind kontextabhängig (MIC-007/008 , HYP-001/011)

Der Kultivierungsbias wählt Organismen nach Medium, C-Quelle, Sauerstoff, Temperatur und seriellen Transfers aus; seltene Gilden, trophische/räumliche Interaktionen und obligate Symbionten ohne Wirt gehen verloren (MIC-002/003). Die Trägerabgabe ist über Pellets, kompostbasierte Medien für AMF und technische organische/mineralische Matrizen möglich, aber der Träger selbst verändert den pH-Wert, das Wasser und die Nährstoffe, sodass eine nicht beimpfte Trägerkontrolle erforderlich ist (MIC-001/004).

Die Vorbesiedelung von reifem Kompost ist als Trägerkonzept technisch möglich, es konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, dass sie nach der Sekundärreifung die Anwendung des gleichen Inokulums direkt am Standort übertrifft. $E > D/C$ ist eine überprüfbare Hypothese, keine gesicherte Tatsache.

20. Lebender Spenderboden, kultiviertes Inokulum und synthetische Gemeinschaft (SynCom)

Ansatz	Was wird übertragen	Vorteil	Verlust	Skala	Risiko	Beleg
Ganzer Boden	Lebensgemeinschaft, mineralische Partikel, organische Materie, Ausbreitung und unbekannte Zusammenhänge	Maximale Vollständigkeit des übertragenen Materials	Variabilität; Biota kann nicht vom Medium getrennt werden	Begrenzt durch die Verfügbarkeit von Spendermaterial	Auswirkungen auf den Spenderstandort, Krankheitserreger, Unkräuter, ökologische Diskrepanz	Literatur zum Feldbodentransfer; enge Analoga
Kultiviertes natives Inokulum	Kultivierbare Fraktion ausgewählter Bakterien und Pilze	Maßstabsvergrößerung einer kleinen Probe; kontrollierter Träger	Kultivierungsvoreingenommenheit; seltene Taxa und obligate Symbionten	Labor, Mesokosmos und Feld sind möglich	Drift, Kontamination, geringe Persistenz	MIC-001 und verwandte Arbeiten
Synthetische Gemeinschaft (SynCom)	Definierte Stämme mit bekannten Funktionen	Wiederholbarkeit und kausale Tests	Vereinfachtes Netzwerk; Es fehlen unbekannte funktionelle Gruppen	Technisch skalierbar	Ökologisches Missverhältnis, Zusammenbruch der Gemeinschaft, fehlende Funktionen	Labor- und Gewächshausbeweise sind stärker als Feldbeweise
Direkte Impfung	Lebendes Material, das direkt auf das Substrat oder die Pflanzzone aufgetragen wird	Einfach; keine Nachreifung	Schwacher Schutz und kurzes Etablierungsfenster	Potenziell skalierbar	Austrocknung, Raub und Verdünnung	Viele unterschiedliche Feldanaloga
Vorbesiedelter reifer Kompost	Das Inokulum erhält vor dem Feldeinsatz Zeit im Träger	Möglicher Schutz und Anreicherung von Biomasse/Metaboliten	Die Community kann sich vor der Nutzung vor Ort ändern	NOCH NICHT BERECHNBAR	Kontamination, Haltbarkeit, Verlust der Zieltaxa	Zentrale Hypothese; keine direkten Vergleichsbeweise

21. Mykorrhiza

FAKT. Arbuskuläre Mykorrhizapilze sind obligate Biotrophen: Sie können nicht auf die gleiche Weise wie freilebende Bakterien bekämpft werden. Für die Vermehrung ist eine lebende Wirtspflanze erforderlich; Es werden Fallenkulturen, Sporen und besiedelte Wurzelfragmente verwendet.

Einschränkungen: Die Wahl der Wirtspflanze verändert die Gemeinschaft; Die Vermehrung im Gewächshaus ist keine Garantie für die Etablierung auf dem Feld. Eine hohe Kolonisierung ist nicht gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Enzymaktivität, des Glomalins, des Wasserzustands oder des Wachstums. Die Auswirkungen auf die Entnahmestelle und das Krankheitserregerrisiko bleiben bestehen. In A–E erfordern AMF ein separates Wirtspflanzen-Multiplikationsmodul und die entsprechenden Steuerungen.

7. Mykorrhiza

AMF sind obligate Biotrophen: Für die normale Vermehrung ist ein kompatibler lebender Wirt erforderlich. Demonstrierte Schemata nutzen Fallenpflanzen, Sporen, kolonisierte Wurzelfragmente und Hyphensubstrat. MIC-004 zeigt die Vermehrung auf dem Bauernhof in einem verdünnten Medium auf Kompostbasis; MIC-005 verwendet 50 g Minen-/Referenzmaterial in einem 1-l-Fangtopf mit drei Wirtspflanzengruppen für vier Monate.

Dies ist das stärkste Beispiel dafür, dass eine kleine Spenderprobe vergrößert werden kann, ohne dass Oberboden in großem Umfang entfernt werden muss. Das Ergebnis ist jedoch nicht universell:

- die Wirtspflanze wählt einen Teil der AMF-Gemeinschaft aus;
- Eine hohe P-Verfügbarkeit kann die Symbiose und Sporulation verringern.
- Inokulum aus der Region ist möglicherweise besser angepasst, aber „lokal“ garantiert keine Kompatibilität oder Sicherheit;
- Kommerzielles Inokulum ist besser reproduzierbar, passt jedoch möglicherweise schlecht zu lokalen Pflanzen und der lokalen Umgebung.
- Wurzelbesiedlung garantiert kein Pflanzenwachstum, wiederhergestellte Enzymaktivität oder Feldpersistenz (MIC-006).

22. Experiment A–E

A vorbereitetes Substrat ohne Kompost	B gewöhnlicher reifer Kompost	C B + lebender Spenderboden / direkte Inokulation
D B + kultiviertes standortheimisches Inokulum	E vorbesiedelter reifer Kompost + sekundäre Reifung	B-time gleiche Reifezeit ohne lebendes Inokulum

Abbildung 4. Hauptvarianten A–E und Zeitkontrolle. Kontrollen mit inaktiviertem Material, Trägermaterial und AMF ergänzen das kausale Design; E gilt nicht im Voraus als überlegen.

HYPOTHESE (HYPOTHESIS). Das Experiment muss die Auswirkungen von reifem Kompost, ganzer Spendererde, kultiviertem Inokulum, Zeit vor der Besiedlung und Träger getrennt identifizieren. Es wird nicht davon ausgegangen, dass E gewinnt.

HYPOTHESE (HYPOTHESIS). Der folgende Entwurf soll die Hypothese testen; Es handelt sich nicht um eine Erlaubnis zur Feldanwendung.

1. Überprüfbare Hypothese

Kann eine einzige Anwendung von qualifiziertem organischem Material, allein oder zusammen mit einer biologischen Impfung, den Übergang eines sicheren Nachbergbausubstrats zu einem System beschleunigen, das nach der Etablierung zunehmend Pflanzen, Bodenstruktur und Nährstoffkreislauf durch seine eigenen Wurzeln, Streu und Mikrobiom unterstützt – ohne inakzeptable Auswirkungen auf das Wasser?

Verschachtelte Frage: Unterscheidet sich kultiviertes Inokulum aus einer kleinen lokalen Spenderprobe von der direkten Anwendung von Spenderboden, und erzeugt die Vorbesiedlung von reifem Kompost einen zusätzlichen Effekt?

2. Ingenieurtechnische Sicherheitsfreigabe der Stufe Null: der Standort

Ein biologisches Experiment ist verboten, wenn aktive Verbrennung, geotechnische Instabilität, unkontrollierte Säurebildung/-entwässerung oder eine unzulässige Mobilität von Salzen und Giftstoffen vorliegen. Vor der Randomisierung müssen Mineralogie, Säure-Base-

Gleichgewicht, pH-Wert, EC/SAR (sofern zutreffend), Gesamt- und auslaugbare Schadstoffe, Partikelgrößenverteilung, Lagerungsdichte, Hydrologie, Neigung und thermischer Zustand charakterisiert werden.

3. Stufe 1: kontrollierter Mesokosmos

Ein homogenisiertes, sicheres und charakterisiertes Nachbergbausubstrat; eine Charge qualifizierter reifer Kompost; ein kompatibles Spender-Ökosystem; identische mineralische und pflanzliche Inputs.

Hauptvarianten

- **A** : Bergbaufolgesubstrat ohne Bodenverbesserungsmaterial;
- **B** : Nachbergbausubstrat + reifer Kompost;
- **C** : reifer Kompost + eine kleine Menge lebender Spendererde, gemischt bei der Anwendung;
- **D** : reifer Kompost + kultiviertes Bakterien-/Pilz-Inokulum aus derselben Spenderprobe, gemischt bei der Anwendung;
- **E** : reifer Kompost, der mit dem gleichen kultivierten Inokulum vorbesiedelt wurde und vor der Anwendung einer definierten Sekundärreifeung unterzogen wurde.

Obligatorische kausale Kontrollen

- **B-time** : Kompost erhält die gleiche sekundäre Haltedauer wie E, jedoch ohne lebendes Inokulum;
- Kontrolle mit inaktiviertem Material für C (**C-killed**): die gleiche Masse an Spendermineralmaterial nach der Sterilisation;
- inaktiviertes Material und Trägerkontrolle für D (**D-killed/carrier**): inaktiviertes Kulturprodukt mit identischem Träger;
- inaktiviertes Material, Träger und Haltezeitkontrolle für E (**E-killed/carrier-time**): der gleiche Träger und die gleiche Sekundärphase mit inaktiviertem Inokulum;
- AMF-Subfaktor nur mit kompatiblen Wirtspflanzen und einer gepaarten No-AMF-Kontrolle.

Trockene Kompostmasse, Wasser, Träger, Mischung, Temperatur und messbare C/N/P/K/Salz-Einträge müssen bei allen Behandlungen ausgeglichen werden. Gleiches Flüssigkeitsvolumen bedeutet nicht gleiche Inokulumdosis: lebensfähige Zellen/Propagula, Biomasse, Gemeinschaftszusammensetzung und funktionelle Marker müssen aufgezeichnet werden.

Replikation und Randomisierung

- Unabhängige Spenderchargen und Kompostchargen sind Zufallseffekte und keine Pseudoreplikate.
- Ein Pilot schätzt zunächst die Varianz, gefolgt von einer Leistungsberechnung für die co-primären Sicherheits- und Autonomieergebnisse.

- Block-Randomisierung wird für die Kammer-/Bankposition verwendet;
- bepflanzte und unbepflanzte Unterbehandlungen trennen die Pflanzenfilterung von der Eigendynamik des Materials;
- Das Protokoll und die Ausschlussregeln werden vorab registriert, bevor die Ergebnisse bekannt sind.

Dauer und Probenahme

Grundlinie; eine Zeitreihe bis zur Sekundärreifung; nach der Anwendung – 1, 2, 4 und 8 Wochen, dann 3, 6, 12, 18 und 24 Monate. Der Übergang zum Feldstadium erfordert mindestens einen vollständigen Wachstumszyklus und ein sicheres Sickerwasserprofil.

4. Messungen

Ko-primäre Sicherheitsendpunkte

Sickerwasser-/Abflussvolumen; pH-Wert; EG; Alkalität/Säuregehalt; NO₃; NH₄; gelöstes/suspendiertes P; DOC; COD/DO, sofern zutreffend; Sulfat; ortsspezifische Metalle/Metalloide; rohstoffbezogene PFAS und organische Verunreinigungen; Krankheitserreger und Unkrautvermehrung.

Ko-primäre Messgröße für Funktion und Autonomie

Überleben, Wachstum, Fortpflanzung und Rekrutierung von Pflanzen; Wurzel-/Streueinträge; mikrobielle Biomasse; Atmung und Enzymaktivität; N Transformationen; P-Mobilisierung; Bakterien-/Pilzzusammensetzung; funktionelle Gene, soweit möglich; AMF-Kolonisierung; Aggregatstabilität; Lagerungsdichte/Porosität; Infiltration/Wassereinlagerung; Erosion; Zustand nach Beendigung der Bewässerung, Düngung und Materialeinträge.

Persistenz des Inokulums

Die Spender-/Kulturgemeinschaft wird mit stammgerechten Markern und Community-Sequenzierung verfolgt. Sowohl das Vorhandensein als auch die Funktion werden gemessen: Der DNA-Nachweis allein stellt keine Feststellung dar, und die Feststellung allein stellt keinen Nutzen dar.

5. Stoppregeln

Eine Behandlung wird abgebrochen oder nicht fortgesetzt, wenn sie zu einem inakzeptablen Schadstoffexport im Sickerwasser, unzureichender Krankheitserreger-/Unkrautbekämpfung, anaerober Instabilität, Pflanzentoxizität, Salzschiiden, Metallmobilisierung, Erosion oder einem offensichtlichen ökologischen Missverhältnis führt. Die Auswahl folgt einer Pareto-Regel: Keine Behandlung schreitet nur deshalb voran, weil sie maximale Biomasse produziert.

6. Stufe 2: wiederholtes Feldexperiment

Nur sichere Mesokosmenbehandlungen, die den Kontrollen nach vordefinierten Kriterien nicht unterlegen sind, kommen ins Feld. Mindeststruktur:

– zwei unabhängige Standorte innerhalb einer breiten Substratklasse, vorzugsweise drei;

- randomisierte Blöcke innerhalb jedes Standorts nach Neigung, Ausrichtung, Feuchtigkeit und Basischemie;
- endgültige Replikationszahl, bestimmt durch eine Leistungsberechnung; Bei sechs Blöcken pro Standort handelt es sich lediglich um einen illustrativen Wert und nicht um eine feste Anforderung.
- Parzellen etwa $10 \times 10 \text{ m}$ oder größer, mit Pufferzonen und permanenten Beobachtungskernen;
- isolierte Maschinenwege, damit die Verdichtung nicht zu einer verdeckten Behandlung wird;
- replizierte Abflussdiagramme und/oder Lysimeter innerhalb von Blöcken;
- Angrenzendes Referenzökosystem und das beste alte lokale Technosol, aufgezeichnet als Referenzwerte für die Entwicklungspfad, nicht als experimentelle Behandlungen.

A–E sollten im Feldvergleich möglichst beibehalten werden. Wenn die Kosten weniger Behandlungen erfordern, dürfen C, D und E nicht kombiniert werden, während die Hypothese des kultivierten Mikrobioms die Hauptfrage bleibt.

7. Zeithorizont

Sofern möglich, wird vor der Behandlung eine vollständige hydrologische und biologische Basislinie erhoben. Nach der Behandlung: ereignisbasierte Probenahme, dann 1, 2, 4 und 8 Wochen; 3, 6 und 12 Monate; jährlich von Jahr 2 bis Jahr 5; obligatorische Nachuntersuchungen im Alter von 7, 10, 15 und 20 Jahren. Kein Ergebnis vor dem fünften Jahr wird als anhaltende Bodenbildung bezeichnet.

8. Erfolgskriterium

Der Erfolg besteht darin, die Abhängigkeit von Interventionen und nicht nur von grüner Deckung zu verringern. Nach einer vorab festgelegten Etablierungszeit werden wiederholte Materialausbringung, regelmäßige Bewässerung und „Notdüngung“ eingestellt. Eine Behandlung ist nur dann erfolgreich, wenn sie ohne wiederholte äußere Belastung sicheres Wasser, Pflanzenrekrutierung, interne Wurzel-/Streueinträge, biologische Kreisläufe, physische Struktur und eine akzeptable Entwicklung in der Gemeinschaft aufrechterhält.

9. Tiermodul

Ziegen, Schafe und Rinder sind von den Stufen 1–2 ausgeschlossen. Ein separater Spätbeweidungsversuch ist erst dann zulässig, wenn die Grenzwerte für Bedeckung, Wurzeln, Erosion, Wasser und Schadstoffe erreicht wurden. Es erfordert unbeweidete Ausläufe, nachgebildete Koppeln, eine Regel zur Begrenzung der Bodenfeuchtigkeit, den Schutz junger Gehölze und die Überwachung der Exposition von Tieren. Angoraziegen sind eine mögliche Behandlung, nicht die bevorzugte Lösung im Voraus.

10. Was das Experiment feststellen kann

Das Design trennt die Auswirkungen von organischem Material (B gegenüber A), direktem gesamten Spenderboden (C gegenüber B und C-killed), kultiviertem nativem Inokulum (D gegenüber B und D-killed/carrier) und Vorbesiedlung mit sekundärer Reifung (E gegenüber D, B-time und E-killed/carrier-time). Außerdem wird getestet, ob eine Veränderung der mikrobiellen Gemeinschaft zu nützlichen Pflanzen-, Prozess- und Wasserergebnissen führt und ob ein Effekt bestehen bleibt, nachdem externe Einträge eingestellt wurden. Ein Kausalschluss gilt nur für das angegebene Substrat, Material, Spender, Klima und Sanierungsziel; es wird keine universelle Anwendbarkeit beweisen.

23. Kusbass: Übertragbarkeit

SYNTHESE (SYNTHESIS). Kusbass wird verwendet, um die Übertragbarkeit zu testen, nicht als Grundlage für eine globale Schlussfolgerung. Ein Rezept kann nicht gleichermaßen auf brennende, säureerzeugende, salz-/natronhaltige, instabile, grobe, verdichtete, junge Technosol- und alte, begrünte Bergehalden angewendet werden.

Übertragbarkeit der globalen Belege auf Kusbass

Die Matrix empfiehlt keine bestimmte Site; Es definiert Tore zum Testen, ob globale Belege an einen bestimmten Standort übertragen werden.

Art/Zustand des Schadens	Was Sie zuerst überprüfen sollten	Was kann übertragen werden?	Was nicht automatisch übertragen werden sollte	Entscheidung
Brennen/Heizen	Thermische Untersuchung, Gase, Verbrennung, Stabilität	Technische Löschung/Isolierung und Überwachung	Kompost, Mist, Inokulum, Tiere	BIOLOGICAL EXPERIMENT PROHIBITED bis die Quelle kontrolliert wird
Aktiv säurebildend / pyritisch	Säure-Base-Rechnung, Sulfat/Fe, Entwässerung	Quellenkontrolle, Abdeckungen, alkalische/mineralische Korrektur	Erfolg von organischem Material allein auf neutralem Abraum	ENGINEERING FIRST
Kochsalzlösung/Natriumsalz	EC, SAR/ESP, Salze, Entwässerung	Auswahl salztoleranter Behandlungen; gerechtfertigte Gips-/Mineralkorrektur	Kompost/Gärrest mit hohem EC-Gehalt; bewässerungsabhängiger Fall als Beleg für Autonomie	Begrenzter Mesokosmos nach Korrektur
Geotechnisch instabiler/erodierender Steilhang	Gefälle, Bewegung, Setzung, Abflusswege	Planierung, Entwässerung, Erosionsschutz, Wurzelzonenstabilisierung	Großflächiger Nassauftrag vor der Stabilisierung	ENGINEERING FIRST
Grob/steinig, wenig Feinerde, chemisch unbedenklich	Korngrößenverteilung, Feinerde, Lagerungsdichte, Wasserretention	Lockere mineralische Wurzelzone, Lehm/Feinerde, qualifizierter Kompost in begrenzter Dosierung, heimisches Saatheu	Kompost als Ersatz für das Mineralgerüst	Am vielversprechendsten nach einem material × substrate -Test
Verdichtete rekonstruierte Schicht	Penetrationswiderstand, Porennetzwerk, Maschinenverkehr	Verkehrskontrolle, Aufreißen/lose Platzierung, Wurzeln, risikoarmes organisches Material	Den Nutzen allein aus der Chemie ableiten	Die körperliche Korrektur geht der biologischen Interpretation voraus

Art/Zustand des Schadens	Was Sie zuerst überprüfen sollten	Was kann übertragen werden?	Was nicht automatisch übertragen werden sollte	Entscheidung
Vorhandenes junges revegetiertes Technosol	Gemeinschaft, Wurzeln/Streu, Wasser, Grundmikroben	Faktorielle <code>compost × inoculum</code> - Studie; Autonomie ohne wiederholte Eingaben	Tiere in einem frühen Stadium	Möglicher Versuchsort
Alter, spontan wiederbelebter Abraumphaufen	Sicherheit/Geochemie, Referenzgeschichte	Referenzentwicklungspfad, Chronosequenz/Erneutvermessung, kleine zerstörungsfreie Probenahme	Das Alter als Eingriff oder unnötige organischer Bodenverbesserer behandeln	Referenz/Kontrolle; normalerweise keine Versuchsfläche

Lokaler Beleg, der das Design verändert

KUZ-003/005/006/007 zeigen, dass Feuchtigkeit, Relief, Feinerde, Wurzelzonenmaterial und lokale Ausbreitungen wichtiger sein können als das Alter. Lössartiges Material und heimisches Saatheu erfüllten unterschiedliche Funktionen; Der Oberboden führte auch zu einer Unkrautsamenreserve. Globale Kompostergebnisse können daher nicht ohne eine gemeinsame mineralische Grundlage und Kontrolle der Pflanzeneinträge übertragen werden.

KUZ-008 schließt brennende Bergehalden von der biologischen Behandlung aus. KUZ-009/010 zeigen, warum ein regionaler Name keine Substratspezifikation ist und warum standortspezifische Daten einem Rezept vorangehen müssen.

Übertragbare globale Schlussfolgerungen

1. Die Dosierung wird durch das Wasser- und Schadstoffrisiko begrenzt, nicht durch die gewünschte Schichtdicke.
2. Qualifizierter reifer Kompost unterscheidet sich von frischem Mist, gemischten Siedlungsabfällen und unbehandeltem Klärschlamm.
3. Wurzelzonenphysik und Hydrologie sind unabhängige Eingriffsmessungen.
4. Fossiler Kohlekohlenstoff muss vom neuen biologischen Kohlenstoff getrennt werden.
5. Eine erfolgreiche erste Saison bedeutet Etablierung, nicht Wiederherstellung.
6. Vorgeimpftes lebendes Material und Angoraziegen bleiben experimentelle Module und keine Standardpraxis.



Auf einer Bergehalde bei Apanas, 2020. Archiv Natalia Zubkova. Die Aufnahme belegt die Anwesenheit der Autorin und den sichtbaren Maßstab der industriell veränderten Geländeform; sie misst weder Temperatur noch Gaszusammensetzung oder die Grenzen eines inneren Brandherds.

24. Angoraziegen und das Solarkraftwerk Maiminskaya

24.1. Angoraziegen

Kurze Antwort

Für das erste Feldexperiment – **nein**. Gülle kann als verarbeitetes und qualifiziertes externes Material untersucht werden, ohne dass Ziegen, Schafe oder Rinder auf einen jungen Standort gebracht werden müssen. Tiere würden schwer zu entwirrende Effekte hinzufügen: selektive Fütterung, Trampeln, Verdichtung, lokale Urin- und Mist-Hotspots sowie den Transport von Samen und Parasiten. Dies würde die kausale Antwort verschlechtern und nicht verbessern.

Was wird unterstützt?

- Auf einer regenerierten spanischen Kohleweide ([BIO-006](#)) waren die Wasserhaltekapazität und das verfügbare Wasser in einer Ausgrenzung größer; Das Trampeln von Huftieren erhöhte die Verdichtung. Ammensträucher schützten den Boden teilweise vor dem Zertrampeln und sammelten gleichzeitig organisches Material an.
- Beweidung kann eine akzeptable **endgültige Landnutzung** sein, wenn das wiederhergestellte Land ihr bereits standhalten kann. Das Risikobewertungssystem [BIO-007](#) verknüpft Sicherheit mit Besatzdichte, Produktivität, Managerverhalten und der Durchsetzbarkeit von Beschränkungen.
- Am Navajo-Kohlestandort ([BIO-008](#)) war eine sorgfältig geplante Viehweide mit Zäunen, täglicher Überwachung, Futter- und Wasserkontrolle sowie Tiergesundheitstests vorläufig

möglich. Aber es handelte sich um ein Experiment zur Landnutzung nach dem Bergbau und nicht um einen Beleg dafür, dass Rinder Boden schufen. Ein Vorfall mit sulfatreichem Grubenwasser zeigte, dass Futter allein keine Garantie für die Standortsicherheit darstellt.

Ziegen gegen Schafe

Im Korpus wurde kein verlässliches Vergleichsexperiment zur Wiederherstellung verminteten Landes mit Ziegen und Schafen gefunden. Schafe können daher nicht als „besser“ bezeichnet werden, nur weil sie häufiger Gras grasen, während Ziegen stärker Sträucher abfressen, und Ziegen können auch nicht aufgrund ihres Mists als vorteilhaft eingestuft werden.

Biologisch plausible Unterschiede bedürfen einer gesonderten Prüfung:

- Ziegen können die Gehölzverjüngung schädigen und Sträucher dort, wo sie sie erreichen können, stärker pflegen;
- Schafe können sich stärker auf die Grasnarbe konzentrieren und auch eine nasse oder schwach strukturierte Oberfläche verdichten;
- Bei beiden Arten bestimmen Besatzdichte, Dauer, Jahreszeit, Feuchtigkeit, Neigung, Futter und Schutz der Jungpflanzen das Ergebnis stärker als der Name des Tieres.

Hierbei handelt es sich um funktionierende Mechanismen zur Risikobewertung, nicht um eine etablierte Artenklassifizierung.

Was die globale Suche hinzugefügt hat

Beleg	System	Was wurde tatsächlich gemessen?	Was nicht übertragbar ist
BIO-010	Angoraziegen / Merinoschafe / Mischweide; 7.5–12.5 Tiere/ha; Südastralien, 1981–1984	Weidezusammensetzung, Grasnarbe, nackter Boden und Wechselwirkung mit der Besatzdichte in einem Wiederholungsversuch	Reife, verbesserte Weide, kein junger Abraumhaufen; Ein günstiges Ziegenergebnis auf einer Weide begründet nicht die allgemeine Priorität der Ziegen
BIO-011	Angoraziegen unter Kurzzeitweide in Texas	Saisonale Ernährung mit Gras, Kräutern und Sträuchern sowie Verzehr	Die Strauchauswahl hat keinen Vorteil für den Nährstoffkreislauf; Es birgt auch eine Gefahr für Sträucher und junge Bäume
BIO-012	Angoraziegen gegen Blattwolfsmilch, North Dakota	Vierjährige Reaktion auf die Zielunkrautdichte	Bei der Bekämpfung invasiver Arten handelt es sich um eine Landbewirtschaftungsdienstleistung und nicht um Hinweise auf Pedogenese
Literatur zur Solarstandortweide	Hauptsächlich Schafe auf etablierten Agrar-/Solarrasen	Frühzeitige Reaktionen auf Bodengesundheit, Weideland und Biodiversität	Bebauung, Schatten und frühere Landwirtschaft werden mit Beweidung verwechselt; Diese Seiten sind keine Schrottplätze

Der erste vergleichende Feldversuch mit Angoraziegen und Merinoschafen wehrt uns gegen die einfache Schlussfolgerung „Schafe sind immer sicherer“. Auf einer etablierten Jahresweide führte eine hohe Besatzdichte zu einem stärkeren Anstieg des nackten Bodens unter Schafen, während Angoraziegen mehr Klee und weniger Unkraut behielten. Begleitende Tierreaktionsdaten deuteten jedoch auf eine höhere Sterblichkeit bei Angoraziegen unter hohem Besatzdruck und Kältestress hin. Art und Rasse ersetzen daher nicht den Bewirtschaftungsrahmen: Klima, Besatzdichte, Jahreszeit, Unterschlupf und Zielvegetation bleiben entscheidend.

Angoraziegen – vorläufiges Profil, nicht die endgültige Antwort

- **Größe:** Beratungsquellen bestätigen, dass Angoraziegen kleiner sind als viele verbreitete Rassen; ausgewachsene Böcke wiegen etwa 180–225 lb (rund 82–102 kg). Für weibliche Ziegen wurde eine Mindestmasse für die Zucht von ≥ 75 lb (~ 34 kg) gefunden; dies ist jedoch kein verlässliches mittleres Gewicht erwachsener Weibchen, daher wird hier kein Durchschnittsgewicht festgelegt.
- **Ernährung:** Dies ist ein gemischter Grasfresser, kein reiner „Strauchfresser“. In der Texas-Diätstudie schwankte der Anteil der Bräuche saisonal zwischen etwa 10 % und 38 %; der Mittelwert lag bei etwa 21 %, wobei zeitweise Gras vorherrschte.
- **Vegetationsmanagement:** Es liegen direkte Belege für die Bekämpfung der Blattwolfsmilch und für Veränderungen in der verbesserten Weidezusammensetzung vor.
- **Ökologisches Risiko:** Die Bevorzugung von Sträuchern macht junge Bäume, Ammensträucher und Gehölzverjüngung anfällig. Tiere können Samen transportieren; Hufdruck und Urin-/Kotflecken bleiben räumlich ungleichmäßig.
- **Tierwohl:** Die Mohair-Rasse ist ernährungstechnisch anspruchsvoll und anfällig für Kälte/Nässe, insbesondere nach der Schur; Ungeeignetes Klima oder ungeeigneter Schutz können die Idee inakzeptabel machen, selbst wenn die Vegetation positiv reagiert.
- **Nährstoffrückführung:** Der Stuhlausstoß wurde in der Texas-Diätstudie gemessen, aber universelle Kilogramm N/P pro Angoraziege und Jahr können ohne ein Szenario für Ernährung, Aufnahme, Retention, Urin und Lebendmasse nicht abgeleitet werden. Allgemeine Ziegenmisttabellen sind keine rassespezifischen Belege.

Derzeit ist nur eine bedingte Antwort vertretbar: Angoraziegen **könnten** ein Werkzeug für gezieltes Vegetationsmanagement auf einem bereits stabilen, gut etablierten Standort mit geschützter Gehölzverjüngung sein. Es gibt noch keine Hinweise darauf, dass sie ein Bodensystem schaffen oder einen Nettovorteil auf einer ehemaligen Bergehalde bieten.

Designentscheidung

1. Nutztiere sind von den Phasen 1–3 des Feldversuchs ausgeschlossen.
2. Mistkompost wird als separates Material mit bekannter Dosierung und Zusammensetzung getestet.
3. Wenn das zukünftige Landnutzungsziel die Beweidung umfasst, beginnt ein separater Spätversuch erst, nachdem die Schwellenwerte für Pflanzenbedeckung,

Wurzelverankerung, Erosion, Verdichtung, Wasserzustand und Schadstoffe im Futter erreicht wurden.

4. Eine Beweidungsbehandlung erfordert eine unbeweidete Ausgrenzung, nachgebildete Weiden, eine definierte Besatzrate, eine Regel zum Stoppen der Bodenfeuchtigkeit sowie die Überwachung der Lagerungsdichte, der Infiltration, der Erosion, der Pflanzengemeinschaft und der Tierexposition.

Abschluss

Tiere können Teil der zukünftigen Bewirtschaftung einer nachhaltigen Weide sein. Es gibt derzeit keine Grundlage dafür, sie zu einem Teil des Mechanismus zu machen, der die Bodenbildung auslöst. Sie sind für die ursprüngliche Fragestellung unnötig und behindern in einem frühen Stadium eher ein sauberes und sicheres Experiment.

Quellen

- BIO-006 : DOI 10.1016/j.agee.2023.108483.
- BIO-007 : DOI 10.1016/j.agsy.2012.03.002.
- BIO-008 : DOI 10.21000/JASMR97010255.
- BIO-010 : DOI 10.1071/AN09128.
- BIO-011 : DOI 10.2307/3899028.
- BIO-012 : Lym, Sedivec & Kirby (1997), Range Science-Archiv der Montana State University.

Hauptschlussfolgerung: Angoraziegen werden nicht benötigt, um die Bodenbildung einzuleiten. Ihre mögliche Rolle ist das Vegetationsmanagement in einem späten Stadium, nachdem eine stabile Pflanzen- und Bodenschicht vorhanden ist. Beweidung und Verbiss können die botanische Zusammensetzung verändern und einige Sträucher bekämpfen, aber Besatzdichte, Jahreszeit, Trampeln, Verdichtung, nackter Boden, Wasserhaltevermögen und Tierschutz bestimmen die Richtung der Wirkung. Angoraziegen reagieren nach der Schur empfindlich auf Kälte und Nässe; Sie benötigen Schutz und ordnungsgemäße Verwaltung.

24.2. Solarkraftwerk Maiminskaya: Herkunftsgrenzen

Status	Was kann man behaupten
DOKUMENTIERT	Natalia war im Winter 2019 (AUTH-002) im Solarkraftwerk Maiminskaya.
ERINNERUNG DES AUTORS	Natalia erinnert sich, dass sie die Verwendung von Schafen vorgeschlagen hatte.
MÖGLICHER ZEUGNIS	Als möglicher Zeuge des Gesprächs wird Denis Shakin genannt; Im Korpus liegt keine unabhängige Bestätigung vor.

Status	Was kann man behaupten
EXTERNER BERICHT	Am 29. Juni 2020 berichtete <i>Kommersant Krasnoyarsk</i> unter Berufung auf Hevels Pressedienst über 50 Schafe im Solarkraftwerk Ust-Kanskaya und eine mögliche Ausweitung der Praxis, auch auf Maiminskaya (AUTH-003).
NICHT NACHGEWIESEN	Es wurde nicht nachgewiesen, dass Natalias Vorschlag das Hevel-Experiment verursachte.

25. Wirtschaftsmodell

SZENARIO-MODELL. KEINE PROGNOSE FÜR APANAS. Das Modell beschreibt eine hypothetische, komplexe, 100 ha große Bergehalde vom Typ Apanas. Dabei handelt es sich nicht um standardmäßige, durchschnittliche Sanierungskosten, kommerzielle Schätzungen oder Rekonstruktionen der Ausgaben an einem bestehenden Standort.

MODELL EINES KOMPLEXEN 100 HA APANAS-TYPS Bergehalden – KEINE PROGNOSE FÜR DIE BERGEHALDE APANAS. Apanas definiert die Art der Komplexität und den Umfang der Argumentation; Das Modell rekonstruiert nicht seine tatsächlichen Arbeiten, Volumina oder Ausgaben.

25.1. Drei Ergebnisebenen

Szenario	100 ha	Pro Hektar	Status
Szenario mit geringerer Komplexität	\$4.7–5.9 Millionen	\$47,000–59,000/ha	Szenariobereich
Zentral	\$9.5 Millionen	\$95,000/ha	Abgerundetes zentrales Szenario
Hohe Komplexität	\$15.4–21.3 Millionen	\$154,000–213,000/ha	Szenariobereich

Umrechnungskurs: 84.3414 RUB/USD am **26. September 2026**, offizielle Serie der Bank of Russia (ECO-004).

25.2. Zentrales Szenario

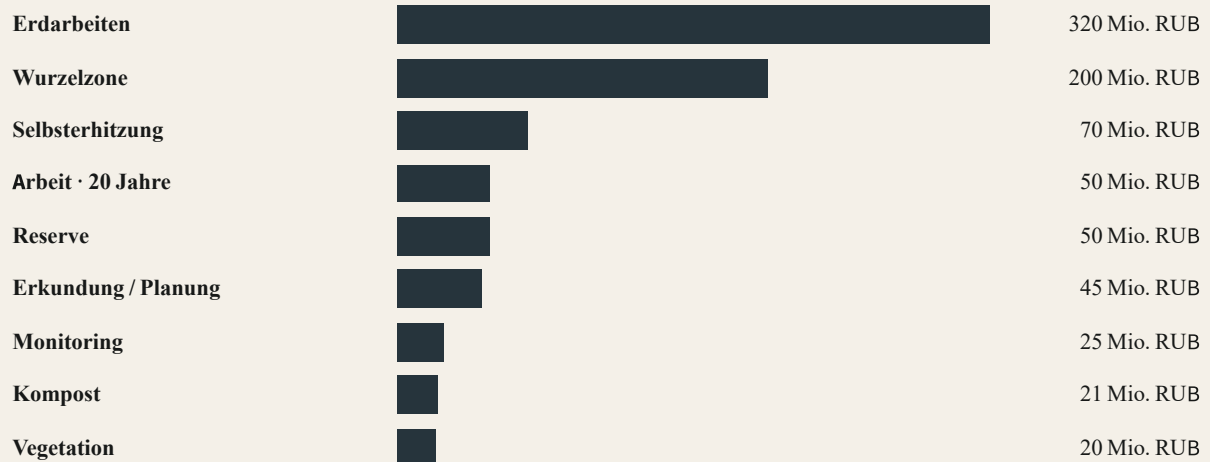


Abbildung 5. Struktur des zentralen Szenarios; die Einzelpositionen sind gerundet, die Modellsumme ist auf 800 Mio. RUB gerundet. Dies sind keine beobachteten Ausgaben eines Standorts.

Werbuchung	Millionen Rubel	Belegstatus	Kommentar
Kontrolle/Beseitigung der Eigenerwärmung	~70	SZENARIOANNAHME + externer Benchmark	Die tatsächliche Fläche der aktiven Zone ist unbekannt
Umfragen, Design und Überwachung	~45	EXTERNER BENCHMARK + SZENARIOANNAHME	Kein Vorschlag für eine bestimmte Standort
Teilweise Umformung der Masse	~320	Berechnet aus Volumen und Rate	Hauptkostentreiber; Der Betreiberpreis wird nicht doppelt angerechnet, sofern er im Auftragnehmertarif enthalten ist
Rekonstruktion der mineralischen Wurzelzone	~200	BERECHNET + SZENARIO-ANNAHME	Hängt von der Dicke und dem lokalen Material ab
Kompost / organisches Material	~21	Berechnet anhand eines Benchmarks	Beinhaltet nicht die unbekannten Kosten für System E
Vegetation	~20	EXTERNER BENCHMARK + SZENARIOANNAHME	Etablierung, keine Ökosystemgarantie
Zusätzliche menschliche Arbeit, 20 Jahre	~50	SZENARIO-ANNAHME	Langfristiger Support über die Vertragstarife hinaus
Umweltüberwachung, 20 Jahre	~25	SZENARIO-ANNAHME	Probenahme, Umfragen, Gerätewartung und Daten
Notfall-/Wiederholungseingriffe	~50	SZENARIO-ANNAHME	Wiederholen Sie die Arbeit ohne falsche Präzision
Gerundete Summe	800	BERECHNET, gerundet	\$9.5 Millionen / 100 ha

Unerwartetes Ergebnis des Modells: Im zentralen Szenario sind die Hauptkostentreiber Erdarbeiten und Umbau der Wurzelzone, nicht Kompost. Dies ist kein universelles Gesetz. Die ursprüngliche Frage begann mit Mist, aber die Wirtschaftlichkeit führte dazu, dass sie ins Wanken geriet.

25.3. Menschliche Arbeit

Der gesonderte Arbeitszweig betrifft die langfristige Unterstützung: Feldarbeiter, Techniker, Umweltspezialisten, Agronomen, Bodenkundler, Personal für Probenahmen und Vegetationsuntersuchungen, Überwachung, Wartung und Datenerfassung. Bediener und Fahrer werden nicht ein zweites Mal hinzugefügt, wenn sie bereits in den Tarifen für Maschinen-/Transportunternehmer enthalten sind.

25.4. Abraumfaktor: Evidenzgrenze

Quelle / Standort	Zeitraum	Abraumfaktor	Einheit	Kontext	Einschränkung
Kusbass Fuel Company (ECO-005)	Q4 2010	6.1	m ³ /t Kohle	Tatsächlicher aggregierter vierteljährlicher Indikator für die Tagebauproduktion des Unternehmens	Nicht eine Mine und keine Apanas; 2010
KFC (ECO-005)	2010 / 2009	7.3 / 7.1	m ³ /t Kohle	Jährliche Produktionsindikatoren	Gruppendurchschnittlicher Kontext
Zentraler Kusbass, sanft eintauchende Nähte (ECO-006)	Daten-/Designpraxis zu 2017	9.3–12.3; berechnet 11.5	m ³ /t Kohle	Aktueller tatsächlicher Bereich und begrenzender Entwurfsparameter für ein kombiniertes System	11.5 ist kein universeller Mittelwert
Quintett, Kanada (ECO-007)	Veröffentlicht 2016	3.5–6.4	m ³ /t Kohle	Vergleichbarer Tagebaukontext	Unterschiedliche Geologie und System
Cerrejón, Kolumbien (ECO-007)	Veröffentlicht 2016	5–6	m ³ /t Kohle	Großer Tagebaubetrieb	Nicht Kusbass

Der Bereich 6.1–11.5 m³/t coal wird nur als **Szenario-Vergleichsparameter** für einen komplexen Tagebaubetrieb verwendet. Es lässt sich nicht auf den Untertagebergbau übertragen, wird nicht als universell für Kusbass bezeichnet und wird nicht Apanas zugeschrieben.

25.5. Modellierte Kohlemenge und Wiederherstellungskosten je Tonne

SZENARIOMODELL. Hypothetisches Abraumvolumen: 32.3 million m³ / 100 ha.

associated coal production = spoil volume / stripping ratio

- $32.3 / 11.5 = 2.8087$ million t ;
- $32.3 / 6.1 = 5.2951$ million t ;
- Veröffentlichter Bereich: 2.8–5.3 million t coal.

DAS IST KEINE REKONSTRUKTION DER PRODUKTION AM APANAS-STANDORT. Es handelt sich um eine mathematische Beziehung zwischen einem hypothetischen Abraumvolumen und der damit verbundenen Kohleproduktion.

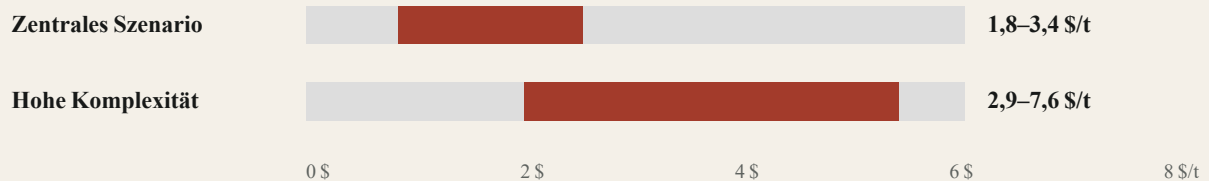


Abbildung 6. Szenarische Wiederherstellungskosten je Tonne der zugeordneten modellierten Kohleförderung. Nicht die gesamten Umweltkosten der Kohle.

scenario restoration burden = scenario restoration cost / associated modelled coal production

- Zentrales Szenario, \$9.485 million : $\$9.485 / 5.295 = \$1.79/t$; $\$9.485 / 2.809 = \$3.38/t$ → **1,8–3,4 \$/t.**
- Hohe Komplexität, \$15.4–21.3 million, unabhängige Kombination von Extremen: $\$15.4 / 5.295 = \$2.91/t$; $\$21.3 / 2.809 = \$7.58/t$ → **2,9–7,6 \$/t.**

SZENARIO-WIEDERHERSTELLUNGSKOSTEN SIND NICHT DIE GESAMTEN UMWELTKOSTEN VON KOHLE. Die Bereiche 1.8–3.4/t und 2.9–7.6/t sind die Szenariokosten für die Wiederherstellung gestörter Flächen pro Tonne der zugehörigen modellierten Kohleproduktion. Sie stellen keine „echten Kosten“, keine Gesamtweltkosten oder die Gesamtkosten pro Tonne dar.

25.6. Eingeschlossen und ausgeschlossen

Im Modell enthalten	Vom Modell ausgeschlossen
Sicherheit und Kontrolle der Eigenerwärmung; Ingenieurvermessungen; Erdarbeiten; Wurzelzone; organisches Material; Vegetation; zusätzliche Arbeit; Überwachung; Möglichkeit eines wiederholten Eingriffs	Klimaschäden; Verbrennung CO ₂ ; Gesundheitsschäden; externe Effekte der Luftverschmutzung; monetäre Bewertung der Biodiversität; historischer Wasserschaden; landwirtschaftliche Verluste; Umsiedlung; soziale/kulturelle Konsequenzen; volle gesetzliche Haftung und andere externe Effekte

25.7. Sensitivität ohne Scheingenauigkeit

Sehr starker Einfluss	Erdarbeitsvolumen $\times$ Satz je m ³	Wurzelzonenvolumen $\times$ Herkunft/Transport
Starker Einfluss	Fläche aktiver Selbsterhitzung	Anteil des umzuformenden Materials
Reserve für wiederholte Eingriffe		
Mittlerer Einfluss in der zentralen Struktur	Transportentfernung	Kompostdosis
Arbeits- und Monitoringintensität		

Abbildung 7. Transparente Rang-Sensitivitätsanalyse: drei bis fünf führende Parameter ohne erfundene Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Der Rang gilt für die zentrale Modellstruktur.

Ein transparenter Szenariovergleich mit jeweils einem Parameter zeigt, dass die Gesamtsumme am stärksten beeinflusst wird von: (1) dem Anteil/Volumen der Erdarbeiten und der Rate pro bewegtem m³; (2) das Volumen und die Quelle des mineralischen Wurzelzonenmaterials; (3) die Fläche der aktiven Selbsterwärmungszone; gefolgt von der Transportentfernung und der Möglichkeit eines wiederholten Eingriffs. Kompostdosis, Arbeitsaufwand und Überwachung spielen eine Rolle, haben aber in der zentralen Struktur ein geringeres absolutes Gewicht. Dies ist keine Monte-Carlo-Modellierung: Verteilungen für probabilistische Schlussfolgerungen wurden nicht erstellt.

Durch die Erhaltung geeigneter Oberböden, Lehm- oder Feinerde während des Abbaus können die künftigen Kosten für den Wiederaufbau der Wurzelzone gesenkt werden. Dies ist eine wirtschaftliche Implikation des Szenariomodells, die eine standortspezifische Berechnung erfordert, kein fertiges quantitatives Versprechen.

25.8. System E

UNBEKANNT (UNKNOWN). System E ist **NOCH NICHT BERECHNBAR**. Für vorbesiedelten reifen Kompost plus Nachreifung sind folgende Angaben nicht bekannt: Inokulumdosis pro Hektar; Ausbeute an lebensfähigem Inokulum; donor-product -Skalierung; Haltbarkeit; Träger; Dauer und Bedingungen der Reifung; Flächen- und Ausrüstungsanforderungen; Kontaminationskontrolle; und Feldpersistenz. Die Kosten können vor dem Experiment nicht berechnet werden.

1. Zusammenfassende Parametertabelle

Parameter	Min.	Typisch/Referenz	Max.	Einheit	Bedingungen	Quelle	Vertrauen
Kommunal-, Hof- und sonstiger Kompost in Feldversuchen nach dem Bergbau	10	—	112	Mg/ha; Die Dosisbasis variiert je nach Fall	10–90 in Minnesota; 112 Gartenabfallkompost in kombinierter Ohio-Behandlung; Kein allgemein empfohlener Bereich	CASE-004/016	Mittel: Werte bekannt, Feuchtigkeit oft nicht gemeldet
Grünabfallkompost um Bäume herum	0.75	—	0.75	kg/Baum, tatsächlich aufgebrachte Masse	Lokale Anwendung, keine pauschale Ausbringung pro Hektar	CASE-002	Hoch
Technisch inokulierter Kompost	18,3	—	18,3	t/ha; Massenbasis des Produkts nicht vollständig definiert	Polnischer Bergbaufolgesand; Feder:Stroh:Braunkohle 20:60:20; 41-tägiger Prozess	HYP-011	Mittel
Verwitterter Geflügelstreu	1	—	4	t/ha; Dosisbasis nicht angegeben	Faktorieller Versuch mit Torf, Schlamm, Alginure und Kalk auf pyritischem Kohleabraum	CASE-033	Hoch für die angegebene Dosis; wenig Feuchtigkeit
Rindermist im Experiment mit gleichem C-Input	8.0	—	8.0	t/ha; wie berichtet	Gelieferte 2.7 t C/ha im fünfjährigen Shanxi-Experiment	CASE-025	Hoch dosiert; Feuchtigkeit nicht verfügbar

Parameter	Min.	Typisch/Referenz	Max.	Einheit	Bedingungen	Quelle	Vertrauen
Zersetzer Geflügelmist	12	—	12	t/ha pro Anwendung; Dosisbasis nicht angegeben	Siebenjähriges Rekultivierungsmais- System; wiederholte Düngung vor der Aussaat	CASE-026	Hoch dosiert; Die Häufigkeit muss vor der Kostenberechnung anhand der vollständigen Tabelle bestätigt werden
Organische Bodenverbesserungsmischungen	40	—	132	t/ha; wie für die Versuchsbehandlungen berichtet	Einjähriges Containerexperiment mit rekonstruiertem Kohleprofil; Komponenteneffekte gemischt	CASE-035	Mittel
Biosolide in langfristigen einmaligen Feldversuchen	22	—	250	Trockenmasse , Mg/ha	Virginia 22/56/112/224 ; British Columbia 150/250; andere Feldfälle 224	CASE-009/010/012/013	Hoch
Biosolids im kurzen Minnesota- Versuch	7.17	—	28.69	Trockenmasse , Mg/ha	Ursprünglich 3.2/6.4/12.8 trockene kurze Tonnen/Morgen	CASE-015	Hoch
Biosolide bei wiederholter kumulativer Anwendung	801	—	1,815	Kumulierte Trockenmasse , Mg/ha	35-jährige Felder in Illinois; mehrere Anwendungen, nicht eine Dosis	CASE-011	Hoch für kumulative Gesamtsumme ; Anwendungsplan fehlt in der aktuellen Extraktion
Klärschlamm im alten schottischen Prozess	5	—	20	t/ha, teilweise getrocknet; genaue Trockenmasse fraktion nicht verfügbar	Kombiniert mit 0/10/25/50 t Kalk/ha	CASE-033	Hoch dosiert; niedrig für Trockenmasse
Papierfabrikrückstände im Minnesota- Prozess	62.77	—	125.54	Trockenmasse , Mg/ha	Ursprünglich 28/56 trockene Kurztonnen/Acre; in 15.2 cm integriert	CASE-015	Hoch
Torf-, Papier- und Kompostrückstände im Minnesota- Programm	10	—	90	Mg/ha; Die Grundlage variiert je nach Material und Studie	Frühe Multi- Site- Experimente	CASE-016	Mittel

Parameter	Min.	Typisch/Referenz	Max.	Einheit	Bedingungen	Quelle	Vertrauen
Pflanzenkohle im Equal-C-Input-Experiment	8.3	—	8.3	t/ha; wie berichtet	Geliefert 2.7 t C/ha	CASE-025	Hoch dosiert; Feuchtigkeit fehlt
Kompost im Equal-C-Input-Experiment	11.0	—	11.0	t/ha; wie berichtet	Geliefert 2.7 t C/ha	CASE-025	Hoch dosiert; Feuchtigkeit fehlt
Biogasanlagen rückstände im Experiment mit gleichem C-Input	7.7	—	7.7	t/ha; wie berichtet	Geliefert 2.7 t C/ha	CASE-025	Hoch dosiert; Feuchtigkeit fehlt
Maisstroh im Experiment mit gleichem C-Input	6.7	—	6.7	t/ha; wie berichtet	Geliefert 2.7 t C/ha	CASE-025	Hoch dosiert; Feuchtigkeit fehlt
Kalk in gewöhnlichen Minen- und Feldexperimenten	2	—	224	Mg/ha oder t/ha	Jamari 2; Candiota 10,4; Schottland 10/25/50; Metallrückstände 224	CASE-013/031/032/033	Hoch; substratabhängig, kein allgemeiner Bereich
Zusätzlicher Kalk unter einer alten Pyritregel	40	—	40	t CaCO ₃ /ha pro 1% FeS ₂	Historische Designregel aus schottischer These; kein modernes Site-Rezept	CASE-033	Niedrig; Nur historischer Benchmark
REA-Mineraländerung	280	—	280	Mg/ha	Saures Kohleland in Ohio; manchmal +112 Mg/ha Gartenabfallkompost und 20 cm rekonstruierte Schicht	CASE-004	Hoch für den Fall; ohne Chemie nicht übertragbar
Fruchtbare Boden-/Wurzelzonenschicht	0.10	—	0.50	Dicke, m	Kusbass: 10 cm im Test / ≥20 cm im operativen Betrieb; Virginia 30 cm; Candiota 30–40 cm; Polen über 50 cm	KUZ-006, CASE-009/030/031	Hoch

Parameter	Min.	Typisch/Referenz	Max.	Einheit	Bedingungen	Quelle	Vertrauen
Trebermalzkorn in aufgebauter Kohle Technosol	5	—	5	% w/w	95% Rückstände aus der Kohleflotation ; vorläufiges Optimum über 5–10%, endgültiges Design 5%	HYP-001	Hoch für Pot-Experimente
Aktiviertes mikrobielles Inokulum in konstruiertem Technosol	$2,5 \times 10^7$	—	$2,5 \times 10^7$	Zellen/g Technosol	Nach Herstellung und Aktivierung des „Tees“; 7-tägige Inkubation nach dem Mischen	HYP-001	Hoch
Extraktionsverhältnis für Boden/Kompost-„Tee“	1:4	—	1:4	Feststoff: Wasser, Masse zu Volumen	22 °C, Dunkelheit, tägliches manuelles Schütteln, 7 Tage, dann Grobfiltration	HYP-001	Hoch
Ausgangsprobe zur Kultivierung nativer Bakterien	1	—	1	g Spendererde pro 25 mL Brühe	7 Tage bei 30 °C, serielle Übertragung von 1 mL, einem anderen 7 Tage; 1 mL Kultur pro Pellet	MIC-001	Hoch
Ausgangsprobe für die AMF-Fallenkultur	50	—	50	g Feldmaterial pro 1.000 mL Topf	Autoklavierter Sand + drei Wirtspflanzen gruppen; vier Monate	MIC-005	Hoch
Inokulumdosis für den gesamten Boden	—	—	—	—	Kein universelles Minimum; Studien verwenden unvergleichliche volumetrische, geschichtete und suspendierte Dosen	BIO-001/002/005, HYP-009	Hohes Vertrauen, dass kein universeller Wert etabliert ist
Anfängliche Feuchtigkeit der Kompostmischung	50	60	70	% Nassmasse	USDA-Prozessmanagementbereich, nicht die Feuchtigkeit des versendeten Produkts	ORG-010	Hoch als technische Anleitung

Parameter	Min.	Typisch/Referenz	Max.	Einheit	Bedingungen	Quelle	Vertrauen
Ausgangskompostmischung C:N	20:1	—	40:1	Massenverhältnis	Sortiment zur schnellen Kompostierung; kein Reifenachweis	ORG-010	Hoch
Prozess zur weiteren Reduzierung von Krankheitserregern (PFRP), im Gefäß oder belüfteter statischer Haufen	3	—	3	Tage bei $\geq 55^{\circ}\text{C}$	Hygienisches Zeit-Temperatur-Regime, nicht die gesamte Kompostierungsdauer	ORG-010	Hoch
PFRP, Schwad	15	—	15	Tage bei $\geq 55^{\circ}\text{C}$	Mindestens fünf Umdrehungen; Nur die Hygienephase, gefolgt von der Reifung	ORG-010	Hoch
Obere lose Lagerungsdichte der Kompostmischung zur Belüftung	—	—	641	Ca. kg/m^3	Ursprünglicher Schwellenwert $1,080 \text{ lb}/\text{yd}^3$; Darüber kann die Luftzirkulation unzureichend sein	ORG-010	Medium nach Einheitenumrechnung; Prozess, nicht Transport, Benchmark
Lagerungsdichte sauberer Hackschnitzel	264	—	368	Ca. kg/m^3	Ursprünglich $445\text{--}620 \text{ lb}/\text{yd}^3$; Nur Rohstoffschätzung	ORG-010	Medium; tatsächliche Chipgröße und erforderliche Feuchtigkeit

2. Aufwandmenge, Wiederholung und Wirkungsdauer in einzelnen Fällen

Fall	Material	Dosis	Bewerbung/Vorbereitung	Wiederholung	Beobachtung, Jahre	Hat der Effekt angehalten?	Quelle
Virginia CASE-009/010	Biosolide; Sägemehl; Oberboden	Biofeststoffe 22/56/112/224 trocken Mg/ha ; Sägemehl 112 Mg/ha ; 30 cm Bodenschicht	Altkohlestandort; randomisiert, $n=4$; genaue Einarbeitungstiefe fehlt bei aktueller Gewinnung	Eine Erstanwendung	16 und 27	Einige frühe Massenunterschiede konvergierten; C/N-Fraktion und MBC-Vermächtnisse blieben bestehen	CASE-009/010

Fall	Material	Dosis	Bewerbung/Vorbereitung	Wiederholung	Beobachtung, Jahre	Hat der Effekt angehalten?	Quelle
Ohio CASE-004	REA ± Gartenabfallkompost; rekonstruierte Schicht/Kalk	280 Mg/ha FGD; 112 Mg/ha Kompost; 20 cm rekonstruierte Schicht	Kombinierte mineralische, organische und profilierte Intervention	Eine Erstanwendung	16	Das Erbe der Vegetation blieb bestehen; Wasser- und Autonomiedaten unvollständig	CASE-004
Wales CASE-002	Kommunaler Grünabfallkompost	0.75 kg/Baum	Lokale Anwendung rund um gepflanzte Bäume	Eins	11	Kein universeller Höhen-/DBH-Vorteil; Das Überleben hing von der Art ab	CASE-002
Illinois CASE-011	Biosolide	801–1,815 trocken Mg/ha kumulativ	Wiederholte Feldanwendungen	Wiederholt; Detaillierter Zeitplan nicht extrahiert	35	Der Grundwasser-Metall-Rekord war weiterhin gering; Ökologische Wirkung nicht bewertet	CASE-011
British Columbia CASE-012	Biosolide	150/250 trocken Mg/ha	Einmalige Zugabe zu Tailings	Eins	13	Der C/Biomasse-Vorteil blieb bestehen; geringere Dosis, effizienter pro Masseneinheit ; Zn-Risiko bei 250	CASE-012
Metallrückstände CASE-013	Kalk + Biofeststoffe	224 + 224 Mg/ha	Mitbewerbung ; genaue Mischtiefe nicht extrahiert	Eins	21	Viele Bodenfunktionen blieben bestehen; Das Cd/Zn-Risiko blieb bestehen	CASE-013
Minnesota CASE-015	Biofeststoffe ± Papierfabrikrückstände	7.17/14.35/28.69 trockene Mg/ha Biofeststoffe; 62.77/125.54 trockene Mg/ha Papierrückstände	Oberflächenaufrag und Einarbeitung bis etwa 15.2 cm; Hänge zuvor geplant; Saatgut und 4.48 Mg/ha Strohmulch	Einmal	2–3 Vegetationsperioden	Die Vegetationsdeckung nahm zu, doch Nitrat- und Kostennachteile stiegen mit der Dosis; spätere Persistenz unbekannt	CASE-015

Fall	Material	Dosis	Bewerbung/Vorbereitung	Wiederholung	Beobachtung, Jahre	Hat der Effekt angehalten?	Quelle
Minnesota CASE-016	Torf, Gartenkompost oder Kompost aus Siedlungsabfällen, Papierreste	10–90 Mg/ha	Feldparzellen und vollflächige Böschungen; Quellen im Umkreis von 100 km angegeben	Eine gemeldete Anwendung	5–9 Jahre für Parzellen; 2 Jahre für den frühen Großmaßstab	Einige Behandlungen mit 10 Mg/ha erreichten eine Deckung von 90 % bis zum 5. Jahr; 44,8 Mg/ha erreichten den Standard in 3–5 Jahren	CASE-016
Shanxi CASE-025	Pflanzkohle /Kompost/Gärrest/Mist/Stroh	8.3/11.0/7.7/8.0/6.7 t/ha; 2.7 t C/ha pro Stück	Eingegliedert in 0–30 cm; Grundlinie und Anwendung in 2011; 0–20 cm gesammelt in 2011 und 2016	Eine anfängliche Equal-C-Anwendung	5	C-Pool-Unterschiede blieben bis 2016 bestehen	CASE-025
Shanxi CASE-026	Zersetzter Geflügelmist	12 t/ha plus definiertes Nährstoffäquivalent	Verdichtete, eingeebnete/verfüllte landwirtschaftliche Flächen; Düngung vor der Maisaussaat	Im Sieben-Jahres-System wiederholt; Die Anzahl der Anträge muss vor der Kostenberechnung überprüft werden	7	SOM/N und Bakterien verändert; Die Gemeinde unterschied sich weiterhin vom angrenzenden Ackerland	CASE-026
Polen CASE-027	Schlamm oder Kompost + Seekreide	Schlamm 33; Kompost 45 Mg/ha in maximalen Behandlungen	Phytoremediation auf dem Feld; Tiefe nicht extrahiert	Nicht gemeldet	Die genaue Dauer erfordert eine Überprüfung anhand der vollständigen Tabelle	SOC/Pflanzenreaktion, aber Kiefernphytotoxizität bei der Schlammbehandlung	CASE-027
Schottland CASE-033	Torf/Schlamm /Geflügelstreu /Alginure + Kalk	Torf/Schlamm 5/10/20; Wurf 1/2/4; Alginure 2.4/5.2/10.4; Kalk 0/10/25/50 t/ha	Pyritischer Beute; auch 300 kg/ha NPK und Aussaat	Die Autoren waren der Ansicht, dass alte Ergänzungen erneuert werden müssten; keine dokumentierte wiederholte Gabe	Über 10	Die Wirkung von 50 t-Kalk hielt oft an; Nur biologische Behandlungen blieben größtenteils unbepflanzt	CASE-033

Fall	Material	Dosis	Bewerbung/Vorbereitung	Wiederholung	Beobachtung, Jahre	Hat der Effekt angehalten?	Quelle
Chile CASE-034	Ziegenmist/Biofeststoffe/Trauben- und Olivenrückstände/Mischungen	Genaue Behandlungsdosen stehen im Primärartikel; im Register wurde keine sichere Normalisierung vorgenommen	In 20 cm eingearbeitet; 13 Behandlungen $\times$ 3; über drei Etablierungsperioden bewässert	Keine wiederholte organische Anwendung; Bewässerung wiederholt	3	Späte Biomasse bei einigen Behandlungen; Fruchtbarkeit nahm ab, früher DOC/Cu-Impuls, Behandlungen mit Olivenrückständen scheiterten	CASE-034
Südafrika CASE-035	Mischungen aus Mist, Hackschnitzel, Gras, Luzerne und Flugasche	40 oder 132 t/ha durch Behandlung	Rekonstruiertes Fels-Untergrund-Boden-Profil in $1 \times 1 \times 1,2$ m-Containern	Eins	1	Positive Multi-Indikator-Mischung im Experiment; Feldpersistenz unbekannt	CASE-035
Kusbass KUZ-006	Lössartiger Lehm oder Oberboden + heimisches Saatheu	10 cm-Schicht im faktoriellen Versuch; operativ ≥ 20 cm + 5 t Saatheu über 3 ha	Sortierung, Platzierung der Wurzelzone, mechanische Saat-Heu-Verteilung	Eine Material-/Saatgut-Heu-Anwendung	4–9	Starke Deckungs-/Community-Entwicklung; Boden-Wasser-Autonomie nicht nachgewiesen	KUZ-006
Polen HYP-011	Beimpfter Federstroh: Braunkohlekompost	18,3 t/ha	Rohstoffe 20:60:20, Impftag 0, 41 Tage Reaktorkompostierung, Anwendung auf Nachbergbaugrund	Eine Feldanwendung	Eine Saison	Pflanzen-/Bodenreaktion gemeldet; Keine Feldbehandlung mit ungeimpftem Kompost und kein Langzeittest	HYP-011
Coaltech HYP-001	5% verbrauchtes Malzkorn + Kultur-/„Tee“-Inokula	Träger 5% nach Masse; $2,5 \times 10^7$ Zellen/g	7-tägige Extraktion, 7-tägige Aktivierung, Mischen bei 50%-Feldkapazität, 7-tägige Inkubation bei 30 °C mit täglichem Gasaustausch	Für jeden Topfzyklus vorbereitet; Nicht wiederholte Feldanwendung	Zwei Pflanzensyklen von etwa 90 Tage	Früher Nutzen von Kompost-„Tee“/EM; „Tee“ aus einheimischem Boden half nicht; Später verringerten sich die Unterschiede	HYP-001

Fall	Material	Dosis	Bewerbung/Vorbereitung	Wiederholung	Beobachtung, Jahre	Hat der Effekt angehalten?	Quelle
Pilbara MIC-001	Kultivierte native Bakterien/Cyanobakterien in Pellets	1 g Spenderboden → Kultur; 1 mL Kultur pro Pellet	Zwei 7-tägige Kulturstadien; Der Träger war ein extrudiertes Samenpellet	Eins	28 Wochen	Bakterien verbesserten N/SIR; Mischung mit Cyanobakterien nicht; Langzeitpersistenz unbekannt	MIC-001

3. Untergrundvorbereitung vor dem Auftragen von organischem Material

Das Wirtschaftsmodell muss separate Module enthalten; Der Einsatz organischer Materialien ist nicht die erste Kostenlinie:

Zustand	Obligatorische Arbeit vor der biologischen Phase	Beleggrundlage
Brennender/erhitzter Abraum	Thermische Überwachung, Löschung/Isolierung, Gas- und Stabilitätskontrolle	SUB-003 , KUZ-008
Aktiv säurebildendes Material	Säure-Base-Rechnung; Trennung/Einkapselung/Abdeckung/Entwässerung und berechnete alkalische Korrektur	SUB-001/003 , FAIL-003 , CASE-022/033
Geotechnische Instabilität/Erosion	Planierung, Geländeform- und Entwässerungsplanung, Stabilisierung	SUB-003 , KUZ-006 , CASE-024
Verdichtete Wurzelzone	Kontrollierter Maschinenverkehr, Aufreißen/Auflockern oder loses Ablegen	KUZ-005/006 , CASE-021/030
Grobes Material/wenig Feinerde	Bei Bedarf mineralische Feinerde oder Wurzelzonenschicht; Kompost ersetzt kein Mineralgerüst	KUZ-005/006 , CASE-016
Salzhaltiges/natriumhaltiges Material	Entwässerung und materialspezifische Salzgehalt-/Sodizitätskorrektur vor Bodenverbesserungen bei hohem EC	CASE-008/029/034
Giftiges/mobiles Material	Isolations-/Entfernungs-/Stabilisierungs- und Auslaugungstests	SUB-001 – SUB-006 , CASE-005/013/034

4. Kompostierung: Prozessinputs, kein festes Rezept

Stufe/Parameter	Dokumentierter Wert	Prozessanforderung	Quelle
Rohstoffmischung	Anfängliches C:N 20:1–40:1 ; Feuchtigkeit 50–70% , Ziel um 60%	Sortieren, Zerkleinern, Rezeptur-/Materialbilanz	ORG-010
Aktive aerobe Phase	Sauerstoff-, Feuchtigkeits- und Temperaturkontrolle	Mietenwender/-lader oder Zwangsbelüftungs-/Reaktorausrüstung	ORG-010

Stufe/Parameter	Dokumentierter Wert	Prozessanforderung	Quelle
Sanitäre Behandlung, statisch/im Behälter	≥55 °C für mindestens 3 Tage	Bestätigen Sie die Erwärmung der gesamten Masse, nicht eines Punktes	ORG-010
Sanitäre Behandlung, Miete	≥55 °C für mindestens 15 Tage und mindestens fünf Umdrehungen	Dokumentiertes Wende- und Temperaturprotokoll	ORG-010
Reifung	Keine universelle Kalenderdauer	Langsamere Zersetzung, bis die Stabilitäts-/Reifeindikatoren bestehen	ORG-005/010
Produktfreigabe	Dewar-/Selbsterwärmungstest, Atmung, NH ₄ :NO ₃ wo verwendet, Keimung/Phytotoxizität, EC/pH, Krankheitserreger/Unkräuter/Kontaminanten	Repräsentative Probenahme und Chargenqualitätskontrolle	ORG-005/008/010
Demonstrierter technischer Prozess	41 Tage insgesamt	Dynamischer Reaktor für Feder-/Stroh-/Braunkohleprodukte; Inokulum am Tag 0	HYP-011

Im ausgewählten Korpus wurde keine gerechtfertigte universelle Endproduktausbeute gefunden. ORG-006 dokumentiert erhebliche Massen-, C- und Nährstoffverluste während der Kompostierung, quellspezifische Faktoren können jedoch nicht als allgemeiner Ertrag herangezogen werden. Eine zukünftige wirtschaftliche Berechnung muss die Materialbilanz der jeweiligen Charge und Anlage verwenden.

5. Sekundäre Reifung und Inokulum-Eingaben

Technologie	Menge	Spediteur / Konditionen	Zusätzliche Phase	Anforderungen an die Ausrüstung	Evidenzgrenze
Coaltech: Tee aus heimischer Erde/Kompost	1:4 Feststoff:Wasser; final 2.5×10 ⁷ cells/g Technosol	Flüssig; Aktivierung auf Malzrückständen; 95:5 Kohlerückstände: Malz	7 Tage-Extraktion + 7 Tage-Aktivierung + 7 Tage-Inkubation nach dem Mischen	Dunkle Gefäße, Schüttler/Mischer, Filtration, Zellzahl, Inkubation bei 30 °C	Gewächshaus, kein reifer Kompost und kein Feld (HYP-001)
Kultivierte einheimische Bakterien	1 g Boden/25 mL Brühe; serielle 1 mL-Übertragung; 1 mL Kultur pro Pellet	Nährbrühe, dann extrudiertes Pellet	7 + 7 Tage Kultur	Sterile Gefäße/Inkubator, Kultur-QC, Pelletproduktion/Tröcknung	Nur kultivierbare Fraktion; 28 Wochen (MIC-001)
AMF Fallenkultur	50 g Feldmaterial pro 1,000 mL Topf	Autoklavierter Sand, Wirtspflanzen <i>Brachiaria</i> /Sonnenblume/Soja	4 Monate	Gewächshaus, Bewässerung, Wirtspflanzen, Stress/Schnitt, Sporen-/Wurzelanalyse	Multiplikationsexperiment, keine Felddosis (MIC-005)

Technologie	Menge	Spediteur / Konditionen	Zusätzliche Phase	Anforderungen an die Ausrüstung	Evidenzgrenze
Direktes Inokulum für den gesamten Boden	Keine Universaldosis	Spenderboden/Suspension/Krümel	Variiert	Probenahme, Biosicherheit, Schadensbegrenzung an der Entnahmestelle	Kontextabhängig (BIO-001/002/005 , HYP-009)
System E	Nicht gemeldet: kein direktes Experiment	Reifer Kompost, vorbesiedelt mit kultiviertem einheimischem Inokulum	Dauer, Temperatur und Feuchtigkeit nicht festgelegt	Vor dem Mesokosmos unbekannt	Hypothese; Prozesskosten können noch nicht berechnet werden

6. Transportmasse und -volumen

Dokumentierte Beispiele:

- Das CASE-015 -Design ging von Biosoliden mit etwa 28 % Trockenmasse aus: 11 nasse Short-Tonnen/Acre ergaben etwa 3,1 trockene Short-Tonnen/Acre. Die transportierte Nassmasse betrug somit etwa das 3,6-fache der Trockenmasse. Der Bericht enthält auch eine Beschreibung der Chargenfeuchtigkeit, die im extrahierten Text inkonsistent erscheint; Vor der wirtschaftlichen Nutzung ist der Originaltisch einer Sichtprüfung zu unterziehen.
- In CASE-015 werden Papierreste im Design mit etwa 40 % Feuchtigkeit und in einer späteren Beschreibung der analysierten Charge mit 25,9 % Feuchtigkeit beschrieben; Es muss der Wert für die spezifische Charge und kein Durchschnitt über Fragmente hinweg verwendet werden.
- In ORG-007 lag die mittlere Laborfeuchtigkeit des erhaltenen Komposts zwischen 28 % für Rinderkompost und 54 % für Ziegenkompost; Hierbei handelt es sich um vorläufige Beispiele, nicht um Projekteingaben.
- In ORG-010 betrug die Rohdichte der sauberen Hackschnitzel $445\text{--}620 \text{ lb/yd}^3 \approx 264\text{--}368 \text{ kg/m}^3$; Bei einer Kompostmischung über etwa $1,080 \text{ lb/yd}^3 \approx 641 \text{ kg/m}^3$ fehlt möglicherweise der Luftraum. Keiner der Bereiche ersetzt die gemessene Dichte der gelieferten Charge.

Erforderliche Felder für ein zukünftiges Projekt:

wet mass = dry mass / dry-matter fraction

loose volume = wet mass / measured loose bulk density

equivalent applied layer = volume / 10,000 m²

Alle drei Formeln müssen denselben Batch- und Verdichtungszustand verwenden. Eine nominell 20 cm mächtige behandelte Schicht bedeutet nicht 2.000 m³ Kompost pro Hektar, wenn Kompost mit mineralischem Material vermischt wird.

7. Tatsächlich dokumentierte Monitoringzeiträume

Evidenzgruppe	Tatsächliche Probenahme-/Beobachtungsstruktur	Wirtschaftliche Implikation
CASE-015	Zehn Infiltrationswasserproben vom Juni 2002 to September 2003 plus Abflussereignisse; Vegetation über drei Jahreszeiten verfolgt	Eine frühzeitige ereignisbasierte Wasserüberwachung ist arbeitsintensiv
CASE-009/010	Ein randomisiertes Experiment wurde nach etwa 5, 16 und 27 Jahre ausgewertet	Langfristige Untersuchungen zeigen Konvergenz und Restvermächtnisse, die im ersten Jahr nicht sichtbar sind
CASE-011	35-jährige Grundwasseraufzeichnung bei wiederholter Anwendung von Biofeststoffen	Wiederholte Anwendungen erfordern eine Wasserüberwachung über den gesamten Lebenszyklus und nicht eine einzige Verschlussprobe
CASE-012/013	Erneute Befragung von 13 und 21 Jahre nach einer einmaligen hohen Dosis	Eine einmalige Anwendung schafft dennoch langfristige Vorteile und Überwachungspflichten
CASE-025	0–20 cm-Beispiele in 2011 und 2016	Zwei Punkte zeigen eine anhaltendes C-Signal, jedoch keine saisonalen Verluste
CASE-026	Siebenjähriger Befruchtungsversuch; abschließende Bodenchemie und Bakteriensequenzierung	Die mikrobielle Analyse muss nicht monatlich erfolgen, aber ein Messgröße allein lässt keine Übergänge zu
CASE-034	Dreijährige mehrjährige Überwachung von Porenwasser, Chemie, Mikroben und Biomasse	Wasser und Biomasse können sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen; Beide Blöcke werden benötigt
KUZ-006	Grundboden in 2014, Wiederholung in 2018; Vegetation in 2015–2023 mit jährlichen Schwerpunktflanzenmessungen	Die Bodenchemie wird möglicherweise seltener gemessen als die Vegetation, die Basislinie ist jedoch obligatorisch
BIO-009 / lange Chronosequenzen	Altersintervalle von 2 to 32+ Jahren	Referenz/Chronosequenz reduziert die Kosten für wiederholte Stichproben, ersetzt jedoch nicht die Längskausalität

Synthesegestützter Überwachungsplan: Baseline + frühe ereignisbasierte Probenahme + jährlich in den Jahren 1–5 + Jahre 7, 10, 15 und 20. Hierbei handelt es sich um einen vorgeschlagenen Entwurf, der aus Lücken zwischen den Fällen abgeleitet wird, und nicht um einen aus einer Quelle kopierten Zeitplan; Die Überwachung ist eine separate Zeile im Szenariomodell.

8. Interpretation im Lebenszyklus

- Erste messbare Pflanzeneffekte: Wochen bis eine Vegetationsperiode in Topf-/Feldversuchen.
- Frühe Chemie-/Wasserschäden: erste Abfluss-/Sickerwasserereignisse und die ersten 1–2 Jahre (FAIL-001/004/005, CASE-015/034).
- Physikalische/biologische Bodeneffekte: oft 3–10 Jahre vor anhaltender Behandlungstrennung.

- Anhaltende Veränderungssignale: für einige Behandlungen nach 10–27 Jahren dokumentiert.
- Spontane/vegetationsbedingte Profilentwicklung: 20–65 Jahre in Chronosequenzen.
- Wiederholter Eingriff: explizit in Biosoliden und landwirtschaftlichen Düngesystemen in Illinois; Alte schottische Bio-Behandlungen wurden als erneuerungsbedürftig eingestuft. Viele einmalige Experimente zeigten nicht, dass zukünftige Eingriffe unnötig wären.

9. Fehlende Wirtschaftsmodell-Inputs

Diese Werte dürfen nicht durch Annahme gefüllt werden:

- anlagenspezifischer Kompostertrag aus feuchtem Ausgangsmaterial;
- Feuchtigkeit des gelieferten Produkts und lose/verdichtete Lagerungsdichte;
- Ausschussanteil aufgrund von Kontamination;
- Dauer der Sekundärreife und System-E-Behälter-/Bereichsanforderungen;
- Ausbeute an lebensfähigem Inokulum und Haltbarkeit pro Spenderprobe;
- genaue C/D/E-Felddosis;
- Erdbauvolumen, Entwässerung und technische Freigabekosten;
- lokales Laborpanel und Überwachungshäufigkeit;
- Wahrscheinlichkeit und Kosten eines Ausfalls/einer Nacharbeit.

Diese Parameter erfordern Messungen für den jeweiligen Standort und die jeweilige Einrichtung; das Evidenzkorpus liefert sie nicht.

26. Zeit als Teil der Wiederherstellung

SYNTHESE (SYNTHESIS). Geld für die Wiederherstellung kann geplant und ausgegeben werden; Verlorene Jahrzehnte können nicht zurückgekauft werden. Dies ist die Interpretation des Autors des tatsächlichen Zeitrahmens, kein monetärer Koeffizient. Das Korpus lässt keine Zuordnung eines Preises zu einem „verlorenen Jahr“ zu.

Langfristige Erkenntnisse zeigen Beständigkeit und Konvergenz zugleich: Einige aggregierte Behandlungseffekte verschwinden, während einige Hinterlassenschaften bestehen bleiben; Horizonte, Aggregate, Fauna und persistente C-Pools entwickeln sich über Jahrzehnte; in Chronosequenzen bis zu 65 Jahren setzt sich die bodenbildende Bahn fort. Dies bedeutet nicht, dass jeder Standort genau 65 Jahre benötigt.

56–65 JAHRE: EINIGE DER BEWEISE IST EINE CHRONOSESEQUENZ, KEINE KONTINUIERLICHE BEOBACHTUNG EINES STANDORTES. Die längsten Entwicklungspfade im Korpus dürfen nicht als ein 65-jähriges Längsschnittexperiment nacherzählt werden.

27. Was unbekannt bleibt

1. Es gibt kein allgemeingültiges Rezept zur Verbesserung von Kohleabfällen: Mineralogie, pH-Wert, Salze, Textur, Hydrologie und Klima beeinflussen das Ergebnis.
2. Auf abgebauten Flächen wurde kein direktes faktorielles B/C/D/E- und B-Zeit-Experiment gefunden, bei dem reifer Kompost, direkter lebender Spenderboden, kultiviertes einheimisches Inokulum und vorkolonisiertes Material nach der sekundären Reifung verglichen wurden.
3. Es wurde kein direktes faktorielles C/D/E-Experiment gefunden, bei dem eine kleine Menge Spendererde, kultiviertes Inokulum und vorkolonisierter Kompost verglichen wurden.
4. Es gibt keine allgemein gültige Mindestdosis oder Koeffizient $1 \text{ kg donor} \rightarrow X \text{ tonnes equivalent living substrate}$ für den Spenderboden.
5. Es wurde nicht nachgewiesen, dass eine kultivierte Gemeinschaft die Funktionen des gesamten Bodens behält; Durch die Anreicherung werden zwangsläufig Taxa ausgewählt.
6. Es ist nicht bekannt, ob ein möglicher Vorteil vor der Kolonisierung noch Jahre nach der Übertragung auf Kohleabraum bestehen bleibt.
7. Die meisten Feldstudien messen Wasser, Chemie, Physik, Mikrobiom, Fauna und Pflanzenreproduktion nicht gleichzeitig.
8. Chronosequenzen trennen Zeit- und Ortsunterschiede weniger zuverlässig als longitudinale randomisierte Experimente.
9. Der Gesamtkohlenstoffgehalt in Kohleabfällen trennt nicht immer fossiles C vom neuen biogenen C.
10. Der langfristige Verbleib von PFAS, Pharmazeutika, Mikroplastik und gemischten Schadstoffen in einigen organischen Strömen ist nur unzureichend verstanden.
11. Es gibt keinen direkten Vergleich von Ziegen und Schafen auf abgebauten Flächen, geschweige denn ein Experiment mit Angoraziegen als bodenbildende Technologie.
12. Es gibt keine Grundlage dafür, eine Mistart allgemein als die beste zu bezeichnen.
13. Die tatsächlichen Kosten pro Hektar und der CO₂-/Logistik-Fußabdruck können nicht ohne eine bestimmte Anlage, Feuchtmasse, Entfernung, Dosis und Standort berechnet werden.

14. Kusbass verfügt nicht über eine ausreichende gepaarte Langzeitüberwachung von Wasser, Mikrobiologie und Bodenphysik in einem experimentellen Netzwerk.
15. Die Wissenschaft bietet kein allgemeines Versprechen, historischen Boden wiederherzustellen; Ein erreichbares Ziel kann ein sicheres, sich selbst tragendes Technosol oder Ökosystem sein.

Diese Lücken erfordern keine endlose Suche. Die Punkte 2–6 werden durch ein neues Kausalexperiment beantwortet; 7–9 durch Design und Messung; 10 nach Rohstoffqualifikation; 11–12 durch optionale Experimente im Spätstadium; 13–14 durch eine zukünftige standortspezifische Machbarkeitsbewertung; und 15 durch vorherige Auswahl des Wiederherstellungsziels.

Weitere standortspezifische Unsicherheiten bestehen weiterhin in Bezug auf Schadstoffe, das Fehlen eines direkten Experiments zur Wiederherstellung abgebauten Bodens mit Angoraziegen, das Fehlen eines universellen „besten“ Düngers, die unbekannten Kosten von System E und das Fehlen jeglicher Garantie dafür, dass historischer Boden wiederhergestellt werden kann.

28. Schlussfolgerung und Programm für ein neues Experiment

Kategorie	Abschluss
UNTERSTÜTZT	Ein sicheres mineralisches Wurzelsubstrat, Pflanzen und Bodenbiota können die Wiederherstellung individueller Funktionen einleiten; Organische Materialien beschleunigen oder verändern manchmal die Entwicklungspfad.
BEDINGT UNTERSTÜTZT	Kontrollierter reifer Kompost und ausgewählte Inokula können nach der technischen Schutztür im Nullstadium nützlich sein; Es ist technisch möglich, eine kultivierbare Fraktion aus einer kleinen Spenderprobe zu skalieren.
NICHT UNTERSTÜTZT	Ein universelles Rezept; Gleichwertigkeit von Grünfläche und saniertem Boden; die Fähigkeit organischer Materialien, technische Arbeiten zu ersetzen; kultiviertes Inokulum als Kopie des Bodens; Ziegen als bodenbildende Technologie.
UNBEKANNT (UNKNOWN)	Anhaltender Vorteil von System E gegenüber B/C/D; optimale Dosis und Zusammensetzung; Feldpersistenz; langfristiger Wasserzustand; Kosten der Skalierung.

Das neue Experiment sollte A/B/C/D/E und B-Zeit unter Verwendung desselben reifen Materials vergleichen, mit Kontrollen für inaktiviertes Material, Träger und AMF, Randomisierung und ausreichender Replikation; zuerst in einem Mesokosmos, dann in einem replizierten Feldstadium. Co-primäre Ergebnisse sind Wassersicherheit und

Funktionalität/Autonomie. Stoppregeln müssen bei Nitrat-, DOC-, Metall-, Salzgehalt-, Phytotoxizitäts- oder Standortstabilitätsproblemen aktiviert werden. E kann nur durch einen gemessenen, dauerhaften Vorteil gewinnen, nicht als vorab ausgewähltes Narrativ.

Menschen können wahrscheinlich keine exakte Kopie des durch den Bergbau verlorenen Bodens nachbilden. Doch nach der bautechnischen Freigabe können sie Ausgangsbedingungen schaffen, unter denen bodenbildende Prozesse wieder zu wirken beginnen, diese messen und den eigenen Eingriff sukzessive reduzieren.

28.1. Was diese Untersuchung nicht belegt

Nicht nachgewiesen	Präzise Grenze
System E ist besser als B/C/D	Im geschlossenen Korpus wurde kein direktes Vergleichsexperiment gefunden; Dies belegt nicht, dass es in der Weltliteratur keine solche Studie gibt.
Ein kultiviertes Mikrobiom entspricht einem ganzen Boden	MIC-001 zeigt eine Vergrößerung der kultivierbaren Fraktion, ohne die gesamte Gemeinschaft, seltene Taxa, obligate Symbionten und alle Funktionen zu kopieren.
Es gibt einen allgemein besten Mist	Die Zusammensetzung ist abhängig von Art, Ernährung, Einstreu, Feuchtigkeit, Lagerung und Verarbeitung.
Es gibt eine universelle Dosis organischer Bodenverbesserung	Die Dosierung ist abhängig von Material, Berechnungsgrundlage, Untergrund, Klima, Wasser, Ziel und Schadstoffen.
Angoraziegen stellen den Boden auf abgebauten Flächen wieder her	Im Korpus ist kein direktes Experiment zur Wiederherstellung verminten Landes mit Angoraziegen vorhanden; Es bleibt nur eine mögliche Rolle bei der Bewirtschaftung der Spätvegetation übrig.
56–65 Jahre garantiert die Rückgabe historischen Bodens	Einige Langzeitbelege bestehen aus Chronosequenzen; Selbst eine lange Entwicklungspfad verspricht keine Kopie des Bodens vor dem Abbau.
Das Wirtschaftsmodell ist eine Schätzung für Apanas	Es handelt sich um ein Szenario für eine komplexe Bergehalde vom Typ 100 ha Apanas, nicht um eine Berechnung für einen bestehenden Standort.
\$1.8–3.4/t sind die gesamten Umweltkosten von Kohle	Es handelt sich lediglich um Kosten für die Wiederherstellung des Szenarios; Klima, Gesundheit, Artenvielfalt, historische Wasserschäden und soziale Externalitäten sind ausgeschlossen.

Bei dieser Einschränkungskarte handelt es sich um eine Kurznavigation. Die vollständigen Gründe und Source IDs finden Sie in den Abschnitten 3, 15, 17–20 und 24–27 sowie im Quellenregister.



Tagebau im Kusbass, 2. Januar 2019. Foto: Natalia Zubkova. Die Aufnahme dokumentiert den sichtbaren Maßstab der Geländeumformung; sie belegt weder Substratchemie noch Eigentum, Stilllegungsstatus, Bodenerholung oder ökologische Wiederherstellung.

29. Quellregister

Die vollständige eingefrorene Registrierung wird unten angezeigt. Verifizierungspfad: Anspruch → Quell-ID → Titelsatz → DOI/URL oder lokale Kopie → Einschränkung.

Quellenregister der evidenzbasierten Recherche V1.0

Version: 26. September 2026. Bei dieser Datei handelt es sich um die eingefrorene Registrierung für die deutsche Ausgabe der evidenzbasierten Recherche V1.0. Ein Quellennachweis bedeutet die Aufnahme in den Belegkorpus und nicht die automatische Übernahme jeder Schlussfolgerung in der Veröffentlichung. Veröffentlichungen, die einer Evidenzgruppe angehören, werden nicht als eigenständige Bestätigungen behandelt.

Evidenzgrenze: Das Vorhandensein einer Quelle im Register bedeutet nicht, dass ihre Schlussfolgerungen ohne Überprüfung akzeptiert wurden.

Felder

SUB-001 · Li et al. (2019), *Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review*

Typ	Peer-Review-Übersichtsarbeit	Gegenstand / Geographie	Kohlebergbaugebiet, global
Was es unterstützt	Störungen und Umbauten wirken sich auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften aus; Zumindest Landform, Boden, Hydrologie, Vegetation und Landschaft müssen berücksichtigt werden	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Übersichtsarbeit zeigt nicht die Wirksamkeit einer bestimmten organischen Bodenverbesserung
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.carsci.2019.02.015	Lokale Kopie	—
Status	Für Feldkarte akzeptiert		

SUB-002 · OSMRE / ARRI, *Forestry Reclamation Approach*

Typ	Bundesprogramm und technische Anleitung	Gegenstand / Geographie	Appalachen, USA
Was es unterstützt	Geeignetes Wurzelmaterial, lockere Platzierung, verträgliche Bodenbedeckung, heimische Bäume und richtige Pflanzung sind Voraussetzung; Verdichtung ist eine unabhängige Einschränkung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Eine Begrünung oder das Pflanzen von Bäumen stellt keinen Beleg für die Wiederherstellung des ursprünglichen Ökosystems dar
URL/DOI	https://www.osmre.gov/programs/arri	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

SUB-003 · **INAP, Global Acid Rock Drainage Guide**

Typ	Internationale technische Beratung	Gegenstand / Geographie	Bergbauabfälle
Was es unterstützt	Sulfide, Sauerstoff und Wasser können kontaminierte Abflüsse über Jahrzehnte oder Jahrhunderte hinweg aufrechterhalten; Vorhersage und Prävention an der Quelle haben Vorrang	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Biologische Maßnahmen ersetzen nicht die Quellenkontrolle
URL/DOI	https://www.inap.com.au/acid-drainage/	Lokale Kopie	papers/SUB-003_GARD_2024_Sustainable_Mine_Closure.pdf
Status	Akzeptiert		

SUB-004 · **Tibbett (2024), *Post-mining ecosystem reconstruction***

Typ	grundlegende Peer-Review-Arbeit	Gegenstand / Geographie	Bergbaufolgelandschaften
Was es unterstützt	Gefährliche und tiefgreifend veränderte Materialien erfordern oft den Wiederaufbau eines sicheren, stabilen Ökosystems und nicht die buchstäbliche Rückkehr in einen früheren Zustand	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein Versuch einer bestimmten Technologie
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.03.065	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

SUB-005 · **Ren et al. (2022), monitoring spontaneous combustion after reclamation**

Typ	primäre Feldstudie	Gegenstand / Geographie	Shanxi, China
Was es unterstützt	Nach der Sanierung kann es zu einer Selbstentzündung kommen und die Vegetation erneut schädigen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein Vegetationsindikator ersetzt nicht die technische Diagnose der Verbrennungsquelle
URL/DOI	https://doi.org/10.1002/ldr.4297	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

SUB-006 · **Querol et al. (2011), soil cover and spontaneous combustion**

Typ	Überprüfungs- und Felddaten	Gegenstand / Geographie	Bergehalden, China
Was es unterstützt	Bei der Verbrennung entstehen Gase, Kondensate und Auswaschungen; Die Bodenbedeckung erfordert eine gesonderte ingenieurwissenschaftliche Beurteilung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Das Problem lässt sich nicht auf „Boden und Pflanzen anwenden“ reduzieren.
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.09.002	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

CHEM-001 · **Angst et al. (2021), plant- vs microbial-derived stabilised SOM**

Typ	Peer-Review-Übersichtsarbeit	Gegenstand / Geographie	Böden
Was es unterstützt	Persistente SOM-Formen aus pflanzlichen und mikrobiellen Verbindungen in Aggregaten und MAOM; Die Beiträge hängen vom Boden und der Umgebung ab	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Bietet keine universelle stabile Kohlenstofffraktion für Bergehalden
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

CHEM-002 · **Witzgall et al. (2021), particulate OM**

Typ	Primäres Isotopenexperiment	Gegenstand / Geographie	Mineralböden
Was es unterstützt	Aggregate und organomineralische Verbindungen bilden sich gleichzeitig an der Oberfläche zersetzender Streu	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein Labormechanismus lässt sich nicht automatisch auf den Feldmaßstab einer Bergehalde übertragen
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

CHEM-003 · **Müller et al. (2024), roots, aggregation and OM formation**

Typ	Primäre Inkubationsstudie	Gegenstand / Geographie	trockener Ober- und Unterboden
Was es unterstützt	Wurzeln und Pilze fördern die Aggregation; Wurzelhinterlassenschaften unterscheiden sich zwischen oberem und unterem Horizont	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein Versuch vor Ort; Einige Auswirkungen im Untergrund blieben nach dem Absterben der Wurzeln nicht bestehen
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109503	Lokale Kopie	—
Status	Mit Einschränkungen akzeptiert		

CHEM-004 · **Álvarez et al. (1996), P adsorption in coal mine soils**

Typ	Primärstudium	Gegenstand / Geographie	Als Pontes, Spanien
Was es unterstützt	Fe/Al, pH-Wert und organisches C erklärten einen wesentlichen Anteil der Variation bei der P-Sorption	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Zeigt nicht die P-Verfügbarkeit für jede Anlage oder das Abflussrisiko
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04934-7	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

CHEM-005 · **Kleber et al. (2021), mineral–organic interfaces**

Typ	Peer-Review-Synthese	Gegenstand / Geographie	Böden und Sedimente
Was es unterstützt	Mineral-OM-Wechselwirkungen sind dynamisch: Adsorption kann zu Schutz, Reaktion oder weiterer Oxidation führen; „an ein Mineral gebunden“ bedeutet nicht „für immer stabilisiert“	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Es handelt sich nicht um einen Feldversuch vor Ort und liefert keinen einfachen C-Speicherkoeffizienten
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

CHEM-006 · **Lavallee et al. / Cotrufo framework (2022 chapter), SOM formation and persistence**

Typ	Peer-Review-Synthese	Gegenstand / Geographie	Böden
Was es unterstützt	Bietet eine funktionierende Unterscheidung zwischen DOM, POM und MAOM; Die Persistenz hängt von der mikrobiellen Verarbeitung, dem Zugang und der Mineralogie ab und nicht von einem mythischen einzelnen „Humus“.	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Der konzeptionelle Rahmen ersetzt nicht die Fraktionierung auf einer bestimmten Bergehalde
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

ORG-001 · **US EPA, *Composting Yard Trimmings and Municipal Solid Waste***

Typ	Offizielle technische Anleitung	Gegenstand / Geographie	kommunaler Kompost
Was es unterstützt	Beschreibt mesophile und thermophile Phasen, Belüftung und Temperaturkontrolle von Krankheitserregern	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Das Erhitzen eines Stapels allein zeigt noch nicht die Reife des gesamten Produkts an
URL/DOI	https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/cytmsw.pdf	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

ORG-002 · **Ontario Compost Quality Standards**

Typ	offizieller Standard	Gegenstand / Geographie	Kanada
Was es unterstützt	Die Reife wird anhand einer Kombination von Indikatoren beurteilt; Atmungs- und Keimungs-/Wachstumstests sind zulässig	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Lagerzeit allein ist kein ausreichendes Kriterium
URL/DOI	https://www.ontario.ca/page/ontario-compost-quality-standards	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

ORG-003 · **USDA ARS, fresh poultry manure vs compost in reclaimed coal mine soil**

Typ	offizieller Bericht der Primärforschung	Gegenstand / Geographie	USA
Was es unterstützt	Frischer Mist mit niedrigem C:N-Gehalt birgt ein hohes N-Verlustrisiko; Die Kompostierung mit C-reichem Material reduzierte den Export von gelöstem organischem C	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Geflügelmist ersetzt nicht den Vergleich von Ziegen-, Schaf-, Rinder- und Pferdemist
URL/DOI	https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=333125	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

ORG-004 · **FAO manure composition tables**

Typ	zwischenstaatliche Referenzdatenbank	Gegenstand / Geographie	Landwirtschaft
Was es unterstützt	Die Zusammensetzung von Mist hängt von der Art und der Feuchtigkeit ab. Werte müssen auf einer gemeinsamen Basis verglichen werden	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Referenzdurchschnitte ersetzen nicht die Analyse einer bestimmten Charge
URL/DOI	https://www.fao.org/4/w6928e/w6928e22.htm	Lokale Kopie	—
Status	Als Bereiche akzeptiert		

ORG-005 · **US EPA, *Compost Use on State Highway Applications***

Typ	offizielle technische Spezifikation	Gegenstand / Geographie	Einarbeitung von Straßenrand- und Landschaftsboden
Was es unterstützt	Die Reife kann nicht anhand eines einzelnen Indikators festgestellt werden; Bioassay und Stabilität/Respirometrie sind erforderlich, mit Kontrolle von inertem Material, Metallen, Krankheitserregern und Unkrautsamen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein älteres, nicht bergwerksspezifisches Dokument; Die Einhaltung löst weder PFAS noch andere moderne Verunreinigungen
URL/DOI	https://archive.epa.gov/composting/web/pdf/highwy4.pdf	Lokale Kopie	<code>papers/ORG-005_EPA_compost_specification.pdf</code>
Status	Akzeptiert		

ORG-006 · **Faverial et al. (2016), manure-based compost quality**

Typ	Kontrolliertes Kompostierungsexperiment	Gegenstand / Geographie	Rinder-, Pferde-, Ziegen- und Geflügelmist sowie Grünabfälle, Guadeloupe
Was es unterstützt	Der anfängliche Misttyp veränderte C:N, Nährstoffe und NH ₄ erheblich; Die thermophile Behandlung und Stabilisierung reduzierte NH ₄ auf ähnlich niedrige Werte, brachte jedoch C/N/P/K-Verluste mit sich	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein kleiner tropischer Prozess bestimmt nicht die Zusammensetzung anderer Chargen und ist kein Minenfeldversuch
URL/DOI	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157884	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

ORG-007 · **Utah State University Analytical Laboratory, manure/compost averages 2005–2019**

Typ	offizielle Laborzusammenfassung	Gegenstand / Geographie	Festmist und Kompost, Utah
Was es unterstützt	Bietet vergleichbare Durchschnittswerte für N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, pH, EC, Feuchtigkeit und C:N für Ziegen-, Schaf-, Rind-, Milch- und Pferdemist und -kompost	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine peer-reviewte Studie; Chargengrundlagen und -bedingungen sind unterschiedlich; die Anzahl der rohen Ziegenproben wird nicht als groß angezeigt; Nur Screening-Anleitung
URL/DOI	https://extension.usu.edu/yardandgarden/research/sustainable-manure-and-compost-application	Lokale Kopie	—
Status	Zur empirischen Prüfung angenommen		

ORG-008 · **European Commission JRC (2014), *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment***

Typ	offizieller technischer Vorschlag und Analysekampagne	Gegenstand / Geographie	Kompost und Gärrest, EU
Was es unterstützt	Definiert Kompost und Gärrest separat und spezifiziert Quellentrennung, Stabilität, Krankheitserreger, Unkrautvermehrung, physikalische Verunreinigungen und Grenzwerte für Metalle/organische Schadstoffe	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine allgemein gültige Zulassung; älter als die aktuellen PFAS- und Mikroplastik-Belege; Die Produktkonformität belegt nicht die Eignung für ein bestimmtes Minensubstrat
URL/DOI	https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87124	Lokale Kopie	papers/ORG-008_JRC_end_of_waste_compost_digestate.pdf
Status	Als Qualifikationsrahmen anerkannt		

ORG-009 · **Zhang / UC Davis / US EPA workshop (2017), *Digestate Alone and With Compost***

Typ	Technische Präsentation mit Pilot- und Feldprodukt Daten	Gegenstand / Geographie	Lebensmittelabfälle und Gärreste aus Milchkühen
Was es unterstützt	Zeigt, dass ganze, flüssige, konzentrierte und pelletierte Gärreste unterschiedliche Produkte sind; Ein Lebensmittelabfallpellet enthielt 8.98% Feuchtigkeit, 4.99% N, 37.76% C, 1.75% P und 2.67% K auf feuchter Basis	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein technisches Produkt und ein agronomischer Versuch; keine Minenlandstudie, Regelung oder „typischer Gärrest“
URL/DOI	https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-11/documents/cba2017-digestate_alone_and_with_compost.pdf	Lokale Kopie	papers/ORG-009_EPA_food_waste_digestate_case.pdf
Status	Wird nur als konkretes Beispiel für Variabilität akzeptiert		

ORG-010 · **USDA NRCS (2010), *National Engineering Handbook, Part 637, Chapter 2: Composting***

Typ	Offizielle technische Leitlinien und Referenztabelle	Gegenstand / Geographie	Kompostrohstoffe für landwirtschaftliche und kommunale Zwecke
Was es unterstützt	Bietet vergleichbare Richtwerte für N, C:N, Feuchtigkeit und Lagerungsdichte für Lebensmittelabfälle, Mist, Blätter, Gras, Papier/Karton und Holzströme; beschreibt die Prozesskontrolle und mehrere unabhängige Reife-/Stabilitätstests	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Eine ältere Referenz, zusammengestellt aus verschiedenen Materialien; Bereiche ersetzen keine Batch-Analyse; deckt PFAS nicht ab und ist kein Minenlandversuch
URL/DOI	https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2017-11/Chapter%20-%20Composting.pdf	Lokale Kopie	papers/ORG-010_USDA_NRCS_composting_handbook.pdf
Status	Als Screening-Referenz akzeptiert		

BIO-001 · **Wubs et al. (2016), *Soil inoculation steers restoration***

Typ	sechsjähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	ehemaliges Ackerland, Niederlande
Was es unterstützt	Kleine Inokulumdosen können Pflanzen- und Bodengemeinschaften in unterschiedliche Bahnen lenken	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein Minenstandort; Eine Übertragbarkeit auf ein toxisches oder lebloses Substrat wurde nicht nachgewiesen
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/nplants.2016.107	Lokale Kopie	—
Status	Mit Einschränkungen akzeptiert		

BIO-002 · **Small-volume forest topsoil additions (2022)**

Typ	Primäre Gewächshausexperimente	Gegenstand / Geographie	Mount Polley Mine, Kanada
Was es unterstützt	Kleine Mengen Waldboden verbesserten die Symbiontenbesiedlung und das Wachstum einiger Sämlinge; Spender-Pflanzen-Kompatibilität ist wichtig	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Gewächshausbedingungen und frühes Wachstum lassen keine langfristige Feldpersistenz erkennen
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104622	Lokale Kopie	—
Status	Mit Einschränkungen akzeptiert		

BIO-003 · **Mycorrhizal fungi in mine restoration (2022)**

Typ	Peer-Review-Übersichtsarbeit	Gegenstand / Geographie	vermintes Land, global
Was es unterstützt	AMF-Effekte hängen vom mineralischen Untergrund und den Bedingungen ab; Langzeit-Felddaten sind unzureichend	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Rechtfertigt kein universelles kommerzielles Inokulum
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106580	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

BIO-004 · **Torres-Arias et al. (2021), 29-year revegetation and AMF**

Typ	Langzeitchronosequenz / Feldstudie	Gegenstand / Geographie	Eisenbergwerksrückstände, Quebec/Labrador
Was es unterstützt	Über 29 Jahre wurden gesäte Arten ersetzt und die Mykorrhizierung nahm nach der mehrjährigen Besiedlung zu; verschiedene AMF-Gattungen erschienen zu unterschiedlichen Zeiten	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine Kohle; Eine Chronosequenz über verschiedene Rückstände hinweg ist kein wiederholtes Experiment
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104145	Lokale Kopie	—
Status	Mit Einschränkungen akzeptiert		

BIO-005 · **Gerrits et al. (2023), soil translocation synthesis**

Typ	systematische Übersichtsarbeit von Feldversuchen	Gegenstand / Geographie	Wiederherstellungsstandorte
Was es unterstützt	Die Auswirkungen der Übertragung auf den gesamten Boden sind kontextabhängig. Wo Biota das Ziel sind, können kleine Krümel anstelle der umfassenden Entfernung von Spenderboden ausreichen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Überprüft die Ergebnisse der Pflanzengemeinschaft; demonstriert weder die Chemie noch die Sicherheit des Minenbodens
URL/DOI	https://doi.org/10.1111/1365-2664.14364	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

BIO-006 · Guignabert et al. (2023), *Soil amelioration induced by nurse shrubs in coal mines reclaimed to pastures and their synergistic effects with grazing*

Typ	Primärer Feldvergleich, Ausschluss × Strauch	Gegenstand / Geographie	Aufgewonnenes Tagebau-Gelände, Nordspanien
Was es unterstützt	Ohne Beweidung waren die Wasserhaltung und das verfügbare Wasser höher; Trampeln von Huftieren erhöht die Verdichtung; Ammensträucher sorgten für zusätzliche organische Substanz/Fruchtbarkeit und schützten den Boden teilweise vor dem Zertreten	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Vergleicht nicht Ziegen, Schafe und Rinder; Beweidungsgeschichte und Auswirkungen wilder/häuslicher Huftiere sind gemischt; zeigt nicht, dass für die Bodenbildung Nutztiere erforderlich sind
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108483	Lokale Kopie	—
Status	Hauptargument gegen Tiere im frühen Experiment		

BIO-007 · Maczkowiack et al. (2012), *Grazing as a post-mining land use: A conceptual model of the risk factors*

Typ	Peer-Review-Risikorahmenwerk und Stakeholder-Umfrage	Gegenstand / Geographie	sechs Tagebaue, Bowen Basin, Australien
Was es unterstützt	Das Weiderisiko hängt nicht nur vom Boden ab, sondern auch von der Produktivität, den Besitzentscheidungen, der wirtschaftlichen Rentabilität und der Einhaltung von Bewirtschaftungsvorbehalten	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein konzeptionelles/Risikomodell, kein Behandlungsversuch; betrifft die Beweidung von Rindern hauptsächlich als Endnutzung von Land, nicht als Bodenschaffung
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.002	Lokale Kopie	—
Status	Als Entscheidungsrahmen für die Zeit nach der Wiederherstellung akzeptiert		

BIO-008 · Gamble, Gadzia & Raisbeck (1997), *Livestock Grazing for Management of Reclaimed Land at Navajo Mine: Animal Response*

Typ	Erfahrungsbericht der Konferenz	Gegenstand / Geographie	saniertes Tagebau-Kohlebergwerk, New Mexico
Was es unterstützt	Dank sorgfältig verwalteter Viehweiden, Zäunen, Wasser-/Futterplanung und Gesundheitsüberwachung zeigten sich in den ersten beiden Jahren keine negativen Auswirkungen auf die Tiergesundheit; Es wurden betriebliche Gefahren und ein Vorfall mit der Wasserqualität festgestellt	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kurzfristiges, unternehmensbezogenes Programm und Fokus auf die Reaktion der Tiere statt auf die Bodenwiederherstellung; kein Ziegen-Schaf-Vergleich und kein Beleg für einen bodenbildenden Nutzen
URL/DOI	https://doi.org/10.21000/JASMR97010255	Lokale Kopie	papers/BIO-008_Navajo_Mine_grazing_animal_response.pdf
Status	Mit starker Einschränkung akzeptiert		

BIO-009 · Kane et al. (2020), *Soil microbial succession following surface mining is governed primarily by deterministic factors*

Typ	Peer-Review-Chronosequenz von Kohlebergwerken	Gegenstand / Geographie	Abgebautes Kohleland, West Virginia, USA; 2, 10, 15 und 32 Jahre nach der Sanierung
Was es unterstützt	Bakterien- und Pilzgemeinschaften veränderten sich mit dem Alter; Die Auswirkungen gemessener deterministischer Faktoren auf die Bakterienzusammensetzung waren etwa siebenmal stärker als die stochastische Komponente, während die Pilzvariation nur durch Umweltfaktoren erklärt werden konnte. SOM, Textur und pH-Wert waren besonders wichtig	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Vier verschiedene Standorte, keine wiederholte Beobachtung eines Standorts; Biomasse, Reichtum und Gemeinschaftszusammensetzung näherten sich auch nach 32 Jahre nicht eindeutig der Referenzweide an; Standard-Oberboden plus Gras-/Hülsenfruchtrückgewinnung, ohne organische Zusätze
URL/DOI	https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa114	Lokale Kopie	—; Vollständiges offenes HTML überprüft, Herausgeber-PDF-Messgröße hat 403 zurückgegeben
Status	Wird als langfristige mikrobielle Entwicklungspfad mit zeitlicher Begrenzung akzeptiert		

BIO-010 · McGregor (2010), *Influence of stocking rate and mixed grazing of Angora goats and Merino sheep... 1. Botanical composition...*

Typ	vierjähriges wiederholtes Beweidungsexperiment	Gegenstand / Geographie	verbesserte jährliche gemäßigte Weide, Südastralien; Angora/Merino/Mischweide bei 7.5, 10 und 12.5 Tieren/ha
Was es unterstützt	Die Wechselwirkung zwischen Art und Besatzrate war stark; Auf dieser besonderen Weide behielten Ziegen bei hoher Besatzdichte mehr Klee, weniger Unkraut und verursachten eine geringere Zunahme des unbedeckten Bodens als Schafe. Die Ernährung variierte saisonal	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nicht Nachbergbauland, junge Wiederherstellung oder Wiederherstellung einheimischer Ökosysteme; kontinuierliche Beweidung und Ergebnisse sind weide- und klimaspezifisch; Begleitnachweise deuten auf eine hohe Sterblichkeit bei Angoraziegen bei erhöhtem Besatz und Kältestress hin
URL/DOI	https://doi.org/10.1071/AN09128	Lokale Kopie	—
Status	Wird als Rassenvergleich akzeptiert, nicht als Beleg für die Übertragbarkeit von Bergehalden		

BIO-011 · Taylor & Kothmann (1990), *Diet Composition of Angora Goats in a Short-Duration Grazing System*

Typ	Primäre Feldstudie zur Ernährungsauswahl	Gegenstand / Geographie	Weideland Edwards Plateau, Texas
Was es unterstützt	Die Ernährung von Angoraziegen variierte saisonal; Sträucher wurden, sofern verfügbar, überproportional ausgewählt, während in einigen warmen Jahreszeiten Gräser dominierten; Aufnahme und Stuhlausstoß wurden gemessen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Zwei Weiden, ein spezifisches 0.19 AUY/ha System und Klima; Die Ernährungspräferenz zeigt keinen Wiederherstellungsvorteil oder akzeptablen Schaden für junge Gehölze
URL/DOI	https://doi.org/10.2307/3899028	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert für den Fütterungsmechanismus von Angoraziegen		

BIO-012 · Lym, Sedivec & Kirby (1997), *Leafy spurge control with Angora goats and herbicides*

Typ	vierjähriges Experiment zum Vegetationsmanagement an zwei Standorten	Gegenstand / Geographie	Das Weideland von North Dakota wurde von der Wolfsmilch befallen
Was es unterstützt	Wiederholtes Beweiden mit Angoraziegen verringerte die Dichte der invasiven Zielarten; unterstützt gezieltes Vegetationsmanagement unter einem definierten Regime	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Unkrautbekämpfung ist keine Bodensanierung; Beweidung kann lebensfähiges Saatgut verbreiten und Nichtzielvegetation verändern; Die Studie befasst sich nicht mit Verdichtung, Wasser oder Schadstoffen auf Bergehalden
URL/DOI	https://arc.lib.montana.edu/range-science/item/739	Lokale Kopie	—
Status	Wird nur als Beleg für gezieltes Surfen akzeptiert		

CASE-001 · Pichtel et al. (1994), *ten-year amendment comparison*

Typ	zehnjähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	saurer pyritischer Kohleabraum, USA
Was es unterstützt	Vergleicht Faulschlamm, Flugasche, kompostierten Papierfabrikschlamm und Oberboden; zeigt langfristige Unterschiede im pH-Wert und in der Vegetationsbedeckung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Hohe historische Schlammdosen und -standards erfordern eine moderne Schadstoffbewertung
URL/DOI	https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300040022x	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall		

CASE-002 · Haigh et al. (2019), *municipal green-waste compost*

Typ	11-jähriges kontrolliertes Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	ehemaliges Tagebau-Kohlebergwerk, Wales
Was es unterstützt	0.75 kg-Kompost pro Baum veränderte das Überleben, führte jedoch zu keinem allgemeinen Höhen-/DBH-Gewinn; Die Reaktion hing von der Art ab	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Misst nicht den gesamten Bodenzyklus
URL/DOI	https://doi.org/10.1177/1178622119877837	Lokale Kopie	—
Status	Vorrangiges gemischtes Ergebnis		

CASE-003 · Ružek et al. (2012), *sludge + paper waste + bark*

Typ	Feldexperiment, 2001–2008	Gegenstand / Geographie	Braunkohlebecken, Tschechische Republik
Was es unterstützt	Eine einmalige Abfallmischung und Nachsaat wurden von Messungen von C, mikrobieller Biomasse und Atmung begleitet	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die komplexe Mischung verhindert die Zuordnung der Wirkung zu einer Komponente
URL/DOI	https://doi.org/10.17221/397/2011-PSE	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall		

CASE-004 · FGD product ± yard-waste compost (2013)

Typ	16-jähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	saures Kohlebergbauggebiet, Ohio
Was es unterstützt	Die langfristige Reaktion der Vegetation unterschied sich von der frühen Reaktion; Materialkombinationen können länger als zehn Jahre funktionieren	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	REA ist kein organisches Material; Wasser- und Gesamtökosystemdaten sind erforderlich
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.081	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall		

CASE-005 · Tri-State residuals vs topsoil (2014)

Typ	12-jähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	Pb/Zn-Rückstände, Missouri
Was es unterstützt	Vergleicht Biofeststoffe/Kalk/Kompost mit geerntetem Oberboden; bewertet Pflanzen, Metalle und kleine Säugetiere	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Metallrückstände sind kein Kohleabraum
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.029	Lokale Kopie	—
Status	Vergleichbarer Fall		

CASE-006 · Detour Lake amendment trial (2026)

Typ	neunjähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	Tagebau-Goldmine, Boreal Kanada
Was es unterstützt	Vergleicht acht Strategien, darunter Torf, Biosolide und Kombinationen; Bewertet gemeinsam die Ergebnisse von Boden, Pflanzen und Mikroben	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine Kohle; erst vor Kurzem veröffentlicht und erfordert eine vollständige Überprüfung des Textes
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.130328	Lokale Kopie	—
Status	Vorrangiger neuer Fall		

CASE-007 · Dong et al. (2026), leguminous green manure

Typ	zehnjähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	sanierter Kohlebergwerk, Gujiao, Shanxi
Was es unterstützt	Die natürliche Erholung wurde mit kontinuierlicher Luzerne und Haarwicke verglichen; Luzerne erhöhte SOC, TP, nassstabile Aggregate, Bakterienvielfalt und Biomasse	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein verwaltetes Agrarsystem, keine Rückkehr des zonalen Ökosystems; Handlungsverlauf/Replikation und Wasserergebnisse erfordern eine zusätzliche Überprüfung im verfügbaren Text
URL/DOI	https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1802650	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall des internen C/N-Eingangs		

CASE-008 · Walmsley et al. (2022), *From spoil to soil*

Typ	Gewächshaus- und früher Feldversuch	Gegenstand / Geographie	Braunkohleminen Loy Yang, Australien
Was es unterstützt	Lokaler Abraum/Unterboden/Oberboden, Kohle, Flugasche, ESR aus Papierfabriken und Grünabfallkompost wurden in Technosols eingemischt; Geplant waren fünf Jahre Feldüberwachung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Es liegen nur frühe Pflanzenergebnisse vor; hohe EC/Sodizität war bereits ein Problem; Ein produktives Weidelandziel ist keine ökologische Wiederherstellung
URL/DOI	https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2215_92	Lokale Kopie	—
Status	Vielversprechender, aber unvollständiger Fall		

CASE-009 · Bendfeldt et al. (2001), *Quality of Amended Mine Soils After Sixteen Years*

Typ	16-jähriges randomisiertes Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	Tagebau-Kohlebergwerk, Wise County, Virginia
Was es unterstützt	Kontrolle, 30 cm Oberboden, 112 Mg/ha Sägemehl und Biofeststoffe bei 22/56/112/224 Mg/ha, n=4; im Jahr 16 näherte sich die ausschließlich begrünte Kontrolle bei SOM/N-Mineralisierung den Behandlungen mit Bodenverbesserungsmaterialien an	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Der kurzfristige Vorteil blieb nicht als allgemeiner Vorteil der Bodenqualität bestehen; historische Zusammensetzung der Biofeststoffe und Kontext der Bepflanzung mit Schwingel und Kiefern
URL/DOI	https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1736	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiger negativer Langzeitfall		

CASE-010 · Wick et al. (2010), *27-year Virginia follow-up*

Typ	27-jährige Fortsetzung desselben randomisierten Experiments	Gegenstand / Geographie	Tagebau-Kohlebergwerk, Wise County, Virginia
Was es unterstützt	Parzellen mit Biofeststoffen bewahrten mehr aggregatgebundenen C/N; 22–56 Mg/ha schnitten bei einigen verfügbaren C/N-Messgrößen besser ab; der mikrobielle Biomasse-C war unter Biofeststoffen höher, während die Gesamtverteilung der Aggregate weitgehend konvergierte	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Das Konvergenzergebnis im Jahr 16 für andere Indikatoren wird dadurch nicht aufgehoben; hohe Variabilität zwischen Replikaten, ein einziges Experiment und historische Biofeststoffe verlangen Vorsicht
URL/DOI	https://doi.org/10.21000/JASMR10011364	Lokale Kopie	papers/CASE-010_Wick_27_year_Virginia.pdf
Status	Wichtiger gemischter Langzeitfall; Primärquelle geprüft		

CASE-011 · Oladeji et al. (2012), *Effects of long-term application of biosolids for mine land reclamation on groundwater chemistry: trace metals*

Typ	35-jährige Grundwasserüberwachung	Gegenstand / Geographie	1,790 ha von Tagebauland, Fulton County, Illinois
Was es unterstützt	In sieben Biofeststofffeldern mit kumulativer Belastung von 801–1,815 trockenem Mg/ha und sieben Düngemittelfeldern blieben die meisten Grundwassermetalle unter den gesetzlichen Grenzwerten; Fe/Mn waren durchweg höher, während Zn vor Teil 503 hauptsächlich unterschied	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Testet Spurenmetalle, nicht Nitrat, PFAS, Pharmazeutika, Krankheitserreger, Mikroplastik oder ökologische Wiederherstellung; Wiederholte historische Anwendungen sind kein moderner Einzeldosis-Kompost
URL/DOI	https://doi.org/10.2134/jeq2011.0472	Lokale Kopie	—
Status	Sehr lange Wassersicherheitsserie; in einem engen Rahmen akzeptiert		

CASE-012 · Antonelli et al. (2018), *Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation*

Typ	13-jährige Nachverfolgung vor Ort	Gegenstand / Geographie	Cu/Mo-Rückstände, British Columbia
Was es unterstützt	Einzelne Anwendungen von 150/250 trockenem Mg/ha sorgten nach 13 Jahre für einen größeren C-Vorrat und eine größere Biomasse; die niedrigere Dosis speicherte mehr C pro Einheit Biofeststoffe	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Tailings sind kein Kohleabraum; Biosolide mit hoher Rate; Zn mit 250 Mg/ha übertraf die Bundesbodenrichtlinie; Wasser-, Mikroben- und Gemeinschaftsautonomie wurden nicht vollständig bewertet
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.001	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiger positiver Langzeitfall mit Dosiseinschränkung		

CASE-013 · Ippolito et al. (2024), *Soil health as a proxy for long-term reclamation success of metal-contaminated mine tailings using lime and biosolids*

Typ	21-jährige Nachverfolgung vor Ort	Gegenstand / Geographie	alluviale Bergehalden aus Metallminen
Was es unterstützt	Nach 224 Mg/ha Kalk plus 224 Mg/ha Biofeststoffen verbesserten sich pH, Aggregation, SOC, mineralisierbarer N, mikrobielle Indikatoren und Vegetation im Vergleich zur degradierten Fläche	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine randomisierte Kohlebergwerksstudie; bioverfügbares Cd/Zn im Sickerwasser/Boden blieb über den ökologischen Prüfwerten und das Futter könnte eine Bewirtschaftung erfordern; Ein grüner Standort bedeutet nicht, dass keine Nahrungskette oder kein Wasserrisiko besteht
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.seh.2024.100096	Lokale Kopie	—
Status	Sehr langer Fall mit gemischtem Erfolg		

CASE-014 · **Bogorodskaya (2016), “Microbiological assessment of anthropogenically disturbed forest ecosystems in Central Siberia”**

Typ	sechsjährige Überwachung einer Chronosequenz von bis zu 30 Jahren, plus Überprüfung lokaler Versuche	Gegenstand / Geographie	Braunkohlebergwerk Borodinsky, Kansk-Achinsk-Becken
Was es unterstützt	Auf der stabilen, ebenen Oberfläche einer 30 Jahre alten Bergehalde war qCO ₂ mit der Kontrolle vergleichbar; auf einem 23-jährigen Erosionshang blieb die Mikrobiozönose wegweisend und unausgeglichen; Anwendung der fruchtbaren Bodenschicht beschleunigte mikrobielle und pflanzliche Sukzession	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nicht Kusbass; Eine Chronosequenz ist keine wiederholte Beobachtung einer Behandlung; Der Kurzversuch mit Gülle/Sägemehl/Bakterienpräparat liefert keine langfristigen Belege für Wassersicherheit oder Wasserautonomie
URL/DOI	https://doi.org/10.15372/SJFS20160207	Lokale Kopie	papers/CASE-014_Bogorodskaya_2016_microbiological_assessment.pdf
Status	Schlüsselfall: Die Topographie könnte das Alter überwiegen		

CASE-015 · **Eger & Antonson (2005), *Use of Biosolids to Reclaim Coarse Taconite Tailings***

Typ	offizieller abschließender Erfahrungsbericht	Gegenstand / Geographie	grobe Taconitrückstände, Minnesota
Was es unterstützt	Kombiniert nachgebildete Versickerungsbehälter und eine 12 Hektar große Hangdemonstration; vergleicht Biofeststoffe bei 100/200/400 Pfund verfügbarem N/Acre ± Papierfabrikrückstände, Wasserchemie, Vegetation und tatsächliche Projektkosten	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein Kohlesubstrat; zwei bis drei Vegetationsperioden reichen für die Bodenautonomie nicht aus; Nitrat überstieg in den meisten behandelten Parzellen 10 mg/L und die hohe Dosis erzeugte etwa dreimal mehr Nitrat als 200 N; historische Standards für Biofeststoffe/Kontaminanten
URL/DOI	https://www.lrl.mn.gov/docs/2024/other/241364.pdf	Lokale Kopie	papers/CASE-015_Eger_2004_taconite_biosolids_cost_water.pdf
Status	Schlüssel integrierter Wasser–Kosten–Schutzkoffer		

CASE-016 · **Eger, Melchert & Dewar (1999), *Waste for Wastelands***

Typ	Konferenzpapier, Zusammenfassung des Multi-Site-Programms	Gegenstand / Geographie	grobe Taconitrückstände, Minnesota
Was es unterstützt	Frühe kleine Parzellen und großflächige Anwendung von 10–90 Mg/ha Torf, Gartenkompost, Hausmüllkompost und Papierresten; zeigt Dosis, Düngemittelinteraktion und Transport-Distanz-Ökonomie	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Teil desselben Minnesota-Programms wie später CASE-015, daher keine unabhängige Bestätigung; Der Erfolg wurde hauptsächlich durch einen Vegetationsstandard definiert und die Preise sind historisch
URL/DOI	https://www.asrs.us/wp-content/uploads/2021/09/0132-Eger.pdf	Lokale Kopie	papers/CASE-016_Eger_Waste_for_Wastelands.pdf
Status	Akzeptiert als Frühphasen- und Wirtschaftsfall		

CASE-017 · Tripathi, Singh & Hills (2016), *Re-vegetation of coal mine spoil: Carbon budget and carbon sequestration potential*

Typ	Peer-Review-Feldstudie mit Altersgradienten	Gegenstand / Geographie	revitalisierte Bergehalde, Singrauli, Indien; 2, 4, 10, 14, 16 und 19 Jahre
Was es unterstützt	Über den Altersgradienten hinweg stieg die oberirdische Biomasse um etwa das 23-fache, die unterirdische Biomasse um das 26-fache, das gemessene organische C um das Vierfache und die MBC um das 6,6-fache; weist auf eine mögliche Streu-Wurzel-Mikroben-C-Trajektorie nach dem Pflanzen hin	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine wiederholte Überwachung: verschiedene Standorte/Alter werden verglichen; Artenmix und Ausgangsbedingungen können unterschiedlich sein; Walkley-Black auf Kohlesubstrat kann fossiles/kohlenähnliches C enthalten; Das berechnete Kohlenstoffbudget ist keine direkte Flussmessung und zeigt keine Autonomie
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.019	Lokale Kopie	papers/CASE-017_Tripathi_2016_19y_coal_spoil_carbon.pdf
Status	Akzeptiert mit starken Design- und C-Methoden-Einschränkungen		

CASE-018 · Domínguez-Haydar et al. (2018), *Assessment of soil fauna footprints at a rehabilitated coal mine using micromorphology and NIRS*

Typ	peer-reviewte Chronosequenz	Gegenstand / Geographie	Tagebau-Kohlebergwerk El Cerrejón, Kolumbien; 1–20 Jahre
Was es unterstützt	Zwischen zwei und 20 Jahre alten Standorten veränderte sich die Matrix von praktisch unstrukturiertem Material ohne sichtbare biogene Aktivität zu konsolidierten Aggregaten, einer homogenen Mikrostruktur und Spuren makrofaunaler Bioturbation	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Eine Chronosequenz, nicht eine wiederholt gemessene Handlung; Die Sanierung umfasste die Translokation und Wiederbegrünung des Oberbodens, sodass einzelne Mechanismen nicht getrennt werden können. kein organischer Bodenverbesserungsprozess
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.032	Lokale Kopie	—; vollständiges Repository PDF im Browser überprüft, automatischer Download durch Anti-Bot-Kontrolle geschützt
Status	Wird als direkter mikromorphologischer Beleg für die Pedogenese akzeptiert		

CASE-019 · Castellanos-Barliza & León-Peláez (2023), *Soil recovery in a chronosequence of revegetated coal mine spoils in Colombian drylands*

Typ	peer-reviewte Chronosequenz	Gegenstand / Geographie	El Cerrejón, Kolumbien; Trockenwald-Technosole im Alter von 7, 10 und 21 Jahren
Was es unterstützt	Mit zunehmendem Alter verbesserten sich die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften; Als Schlüsselmechanismus wurde feiner Streufall identifiziert; Die OBS an sanierten Standorten betrug 63–89 % des Referenzwertes für ausgewachsene Trockenwälder	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Drei Altersgruppen/verschiedene Standorte; nur teilweise Umkehrung der Störung; gleiches Rehabilitationsprogramm wie CASE-018, also kein eigenständiges Projekt; testet keinen Kompost/Mist
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00652	Lokale Kopie	—; Öffnen Sie das im Browser überprüfte Autor-PDF
Status	Als integrierter langfristiger Kohlefall akzeptiert		

CASE-020 · Šourková, Frouz & Šantrůčková (2005), *Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining*

Typ	Peer-Review-Chronosequenz mit 19 Standorten	Gegenstand / Geographie	Braunkohlebezirk Sokolov, Tschechien; Erlenbestände im Alter von 4–65 Jahren
Was es unterstützt	C und N reichern sich in den ersten 15–20 Jahren rasch an; nach 30–40 Jahren näherten sich die oberen organischen Schichten einem halbnatürlichen Erlenwald; N-Fixierung und Streuqualität waren wahrscheinliche Treiber	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Mineralschichten und Ganzprofilbestände hinkten immer noch hinterher; verschiedene Standorte/Materialien (tertiärer Ton oder Kies-Sand), kein Längsschnittversuch; Erlenanpflanzung ist kein universelles Ziel
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.001	Lokale Kopie	—
Status	Als Langzeit-Pedogenese-Fall akzeptiert		

CASE-021 · Pihlap et al. (2019), *Initial soil formation in an agriculturally reclaimed open-cast mining area*

Typ	peer-reviewte replizierte Chronosequenz	Gegenstand / Geographie	Braunkohlebergwerk Garzweiler, Deutschland; Lössfelder im Alter von 0, 1, 3, 6, 12 und 24 Jahren
Was es unterstützt	CaCO ₃ Ausgangsmaterial stark geformte Aggregation; Luzerne reduzierte die mikrobielle N-Limitierung; Makroporosität/Porenkonnektivität nahm erst nach Kompostieren und Pflügen zu; Ernterückstände hielten den hohen SOC nicht stand	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Landwirtschaftlich aufbereiteter Löss unterscheidet sich erheblich von steinigem/pyritischem Kohleabraum; Kompostwirkung ist an die Bewirtschaftungssequenz gebunden; Chronosequenz, nicht wiederholte Handlung
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.023	Lokale Kopie	—
Status	Als physikalisch-biologischer Mechanismusfall akzeptiert		

CASE-022 · Hüttel & Weber (2001), *Forest ecosystem development in post-mining landscapes: a case study of the Lusatian lignite district; and chronosequence water study*

Typ	Peer-Review-Synthese und Feldchronosequenzen	Gegenstand / Geographie	saure schwefelhaltige Braunkohlebergbau-Böden, Lausitz, Deutschland; bis 35–37 Jahre
Was es unterstützt	Die Aktivität der Bodenorganismen könnte innerhalb von 20–30 Jahren Werte regionaler ungestörter Standorte erreichen, doch die Pyritoxidation bestimmte weiterhin die Chemie; in einer Eichenchronosequenz nahm die Auswaschung von Fe/Al/Mn/Ca/Mg/NH ₄ /SO ₄ über Jahrzehnte ab	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Oberirdische Übereinstimmung bedeutet nicht identischen Boden; Braunkohle-C kann einige Funktionen organischer Bodensubstanz nachbilden; Bestände, Arten und Rekultivierungsverläufe unterscheiden sich
URL/DOI	https://doi.org/10.1007/s001140100241 ; https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00102-X	Lokale Kopie	—
Status	Als technische und geochemische Einschränkung akzeptiert		

CASE-023 · **Mustafa et al. (2023), *Soil carbon storage in unreclaimed post mining sites estimated by a chronosequence approach and comparison with historical data***

Typ	Peer-Review-Chronosequenz und Neubefragung	Gegenstand / Geographie	sich spontan entwickelnde Kohlenhalden in Sokolov, Tschechien; 16–56 Jahre, Nachbefragung nach ca. 15 Jahren
Was es unterstützt	Der mittlere beobachtete Boden-C-Gewinn bei der erneuten Untersuchung betrug etwa 0,50 t C/ha/Jahr; Standorte höheren Alters unterstützten die Laubnachfolge ohne formelle Rekultivierung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Hohe Variabilität und kein einfacher Alterstrend im Inkrement einzelner Standorte; 2–10 % fossiles C im Substrat erschweren die Messung; rechtfertigt keine Untätigkeit gegenüber gefährlichem Abraum
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106664	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert als seltener Chronosequenz-plus-Resurvey-Fall		

CASE-024 · **Haagner, Abraha & van Wyk (2025), *Benchmarking rehabilitation in the South African opencast coal industry***

Typ	24-jährige standardisierte Beobachtungsbewertungsdatenbank	Gegenstand / Geographie	299 Gutachten, 48 Tagebaue, Südafrika
Was es unterstützt	Landkapazität/Bodenverlust erreichten oft die Schwellenwerte, aber Landform, Artenzusammensetzung und insbesondere Bodenfruchtbarkeit schränkten die Leistung ein; unzureichende Nachsorge ging mit Unkräutern/invasiven Pflanzen einher und schlecht gestaltete Bermen gingen mit Erosion einher; Nachsorge könnte für mindestens fünf Jahre erforderlich sein	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine randomisierte Studie oder ein Vergleich mit organischen Bodenverbesserungen; aggregierte Branchendaten und auftragnehmerbezogene Urheberschaft; Ein Management-Score zeigt keine Bodenautonomie
URL/DOI	https://doi.org/10.17159/2411-9717/792/2025	Lokale Kopie	papers/CASE-024_South_Africa_2025_benchmarking.pdf
Status	Akzeptiert als Betriebsausfall-/Wartungsbeweis		

CASE-025 · **Zhang et al. (2020), *Response of soil organic carbon fractions to exogenous carbon input in mine reclamation***

Typ	Fünffähriger replizierter stationärer Feldvergleich	Gegenstand / Geographie	rekultiviertes Ackerland über einer bergbaubedingten Absenkung, Xiangyuan, Shanxi, China
Was es unterstützt	Bei gleichem Einsatz von 2,7 t C/ha, verglichen mit Pflanzenkohle 8,3, Kompost 11,0, Biogastrückständen 7,7, Rindermist 8,0 und Maisstroh 6,7 t/ha; Biokohle erhöht die Gesamt-/stabilen C-Indikatoren am meisten, im Kompost ist leicht oxidierbares C und Mist erhöhte die labilen Pools vorhanden	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nur C-Anteile bei 0–20 cm; Wasser, Salze, Schadstoffe, Vegetationsgemeinschaft und Interventionsabhängigkeit wurden nicht bewertet; gleicher C-Eintrag bedeutet nicht die gleiche Nährstoff- oder pH-Wirkung; landwirtschaftliches Maisziel
URL/DOI	https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190925	Lokale Kopie	papers/CASE-025_Zhang_2020_exogenous_carbon_China.pdf
Status	Wichtiger direkter Materialvergleich mit schmalem Messgröße		

CASE-026 · Li et al. (2021), *Effects of Seven-Year Fertilization Reclamation on Bacterial Community in a Coal Mining Subsidence Area in Shanxi, China*

Typ	siebenjähriges RCBD-Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	verdichtetes Ackerland in einem Kohleabbaugebiet, Lu'an, Shanxi; Mais
Was es unterstützt	Kontrolle, chemischer Dünger und zersetzter Hühnermist bei 12 t/ha; drei Replikate, 100 m ² große Parzellen; Gülle erhöht SOM/verfügbares N und veränderte Bakterienreichtum/-zusammensetzung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Bakteriengemeinschaft unterschied sich immer noch vom angrenzenden Ackerland; Gülle könnte Metalle/Antibiotikarückstände transportieren; ein Pflanzendüngungssystem, kein autonomes Ökosystem; keine Wasser-, Pilz- oder Bodenfauna-Messgröße
URL/DOI	https://doi.org/10.3390/ijerph182312504	Lokale Kopie	papers/CASE-026_Li_2021_7y_manure_China.pdf
Status	Wird als wiederholter Beleg für die Auswirkungen von Mist auf das Mikrobiom akzeptiert		

CASE-027 · Placek-Lapaj et al. (2019), *Post-mining soil as carbon storehouse under Polish conditions*

Typ	Feldversuch mit Materialien und Phytoremediation	Gegenstand / Geographie	externe Abraumdeponie des Braunkohlebergwerks Bełchatów, Polen
Was es unterstützt	Klärschlamm oder Kompost mit Seekreide erhöhten die berichteten SOC- und Pflanzen-C-Vorräte unter Waldkiefer/Miscanthus; der höchste SOC wurde bei 33 Mg/ha Schlamm und 45 Mg/ha Kompost gemeldet	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Konzentriert sich auf C-Vorräte; Wasser, Schadstoffe und Autonomie wurden nicht untersucht; Schlamm verlangsamte das Kiefernwachstum, vereinbar mit schneller Nährstofffreisetzung/Phytotoxizität; genaue Dauer und Replikation erfordern eine Prüfung der Volltexttabellen
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.005	Lokale Kopie	—
Status	Vorläufig angenommen; gemischtes Ergebnis und Phytotoxizität		

CASE-028 · Mukhopadhyay et al. (2015), *Soil development in 2–21 years old coalmine reclaimed spoil with trees*

Typ	Chronosequenz	Gegenstand / Geographie	Kohlebergwerk Sonepur Bazari, Raniganj, Indien; 2, 5, 9, 15 und 21 Jahre
Was es unterstützt	Organisches C/N, austauschbare Kationen/CEC, Feuchtigkeit, mikrobielle Aktivität/MBC und der Reichtum einheimischer Arten stiegen entlang der Alterssequenz unter künstlicher/natürlicher Erholung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Verschiedene Standorte und Interventionsverläufe werden verglichen; die Chronosequenz isoliert das Alter nicht; Die aus Kohle gewonnene C-Messung erfordert eine methodische Kontrolle. kein direkter Vergleich organischer Materialien
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.043	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert als integrierte Entwicklungspfad, nicht als kausales Experiment		

CASE-029 · ACARP C28035 (2023), <i>Topsoil Deficits in Site Rehabilitation: Accelerated Transformation of Spoils to Functional Soils</i>			
Typ	offizielle Projektzusammenfassung; 12-monatige Feld- und Gewächshausversuche	Gegenstand / Geographie	Kohleabraum, Bowen Basin, Queensland, Australien
Was es unterstützt	Kompost, Vermi-Flüssigkeit und getrockneter Mist erhöhten die frühe Enzymaktivität im Vergleich zu Gips plus Mulch, im Rahmen des Projekts wurde jedoch keine dauerhafte Verbesserung beobachtet; pH, EC, Sodizität und niedrige OM blieben entscheidend; Pflanzenwachstum war durch Wasser begrenzt	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nur 12 Monate/saisonale Daten; Zusammenfassung einer Projektseite anstelle eines vollständigen Berichts; „langfristig“ bedeutet Beharrlichkeit innerhalb eines kurzen Versuchszeitraums, nicht von Jahren; keine Behandlung mit Tieren
URL/DOI	https://www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repId=C28035	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiges kurzfristiges Gegenbeispiel für Nichtbeharrlichkeit		

CASE-030 · Misebo et al. (2026), <i>Effects of afforestation on Technosol properties in reclaimed hard coal deep mining spoil heaps</i>			
Typ	Querschnittsfeldvergleich an 30 Standorten	Gegenstand / Geographie	Steinkohlenhalde Sośnica, Oberschlesien, Polen; ca. 20–25 Jahre
Was es unterstützt	Die Sukzession auf nacktem Abraum, auf etwa 50 cm Oberboden und auf bepflanztem Boden unterschied sich in Porosität, Wasserretention, Nährstoffen und C-Anteilen; bepflanzter Oberboden enthielt mehr okkludiertes/mineralienassoziiertes C, obwohl sich der Gesamt-SOC nicht unterschied	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Historisch gesehen nicht randomisiert; Behandlungen vermischen Oberboden, Bepflanzung und Standortgeschichte; die Subtraktion des geogenen C geht von einer vergleichbaren ursprünglichen Abraumschicht aus; Biologie und Kosten wurden nicht bewertet
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/s41598-026-37992-z	Lokale Kopie	papers/CASE-030_Misebo_2026_Sosnica_Poland.pdf
Status	Mit Designvorbehalt akzeptiert		

CASE-031 · Leal et al. (2015), *Organic Matter Fractions and Quality of the Surface Layer of a Constructed and Vegetated Soil After Coal Mining. I — Humic Substances and Chemical Characterization*

Typ	Sechsjähriges Feldexperiment mit randomisierten Blöcken	Gegenstand / Geographie	konstruierter Oberboden über einem Tagebau-Kohlebergwerk, Candiota, Rio Grande do Sul, Brasilien
Was es unterstützt	Vier mehrjährige Gräser, vier Replikate, 20 m ² -Parzellen; Deckfrüchte erhöhten teilweise den TOC und einige Fraktionen im Vergleich zu nacktem bebautem Boden, während Hemarthria/Urochloa größere Huminsäure-C-Vorräte produzierte	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Alle Parzellen erhielten anfänglichen Kalk/NPK und jährliche 40 kg N/ha ; natürliche und kahle Standorte lagen außerhalb des randomisierten Experiments; nur 0–3 cm wurde beprobt; Nach sechs Jahren blieb der Gesamt-C deutlich unter dem natürlichen Boden und die Grasbehandlungen unterschieden sich größtenteils nicht im Gesamt-C
URL/DOI	https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140783	Lokale Kopie	papers/CASE-031_Leal_2015_Candiota_grasses_carbon.pdf
Status	Wird als brasilianische Kohle-Boden-Trajektorie akzeptiert, kein Beleg für organisches Material		

CASE-032 · Longo, Ribeiro & de Melo (2011), *Use of green fertilizing in the recovery of soils degraded by mining in the amazon forest*

Typ	15-monatiges faktorielles Feldexperiment mit randomisierten Blöcken	Gegenstand / Geographie	saure sandige Kassiteritrückstände, Jamari National Forest, Rondônia, Brasilien
Was es unterstützt	Sechs Pflanzenbedeckungsbehandlungen × vier Behandlungsregime, sechs Wiederholungen (144 Parzellen, 1.5 ha); Kompost war Sägemehl und Viehmist bei 3:1 ; Kalk/organische Stoffe/Dünger veränderten die chemische Fruchtbarkeit	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine Kohlerückstände; nach 15 Monaten gab es keine signifikanten Unterschiede in der gemessenen OM oder den physikalischen Eigenschaften; Intensive Einträge führten nicht schnell zur Bodenstruktur/-biologie; Kurze Dauer und gemischte Komponenten schränken die Zuordnung ein
URL/DOI	https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100020	Lokale Kopie	papers/CASE-032_Longo_2011_Jamari_compost.pdf
Status	Wird als frühes repliziertes Non-Response-Gegenbeispiel akzeptiert		

CASE-033 · Barrett (1992), *Colliery Spoil Reclamation: An Appraisal of Two Sites in West Lothian*

Typ	These; Langzeit-Resampling und historische Behandlungsdiagramme	Gegenstand / Geographie	pyritischer Zechenabraum in Foulshiels und Baads, Schottland; Arbeiten seit den 1970er Jahren, erneut erhoben 1990–1991
Was es unterstützt	Die 1978 angelegten Baads-Parzellen verglichen Torf, Klärschlamm, verwitterten Geflügelmist, Alginure und 0/10/25/50 t Kalk/ha; Etwa zehn Jahre später kontrollierte 50 t/ha -Kalk in den meisten Parzellen immer noch den Säuregehalt; Foulshiels bewertete auch Wasser und Metalle	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die verbleibenden Parzellen waren spärlich und unausgeglichen und Exposition/Zufluss waren verwechselt; Schlamm wurde vor der Verwendung nicht analysiert; Reine Bio-Behandlungen blieben in der Regel unverändert und es wurde beurteilt, dass sie erneut angewendet werden müssten, eine genaue relative Rangfolge kann jedoch nicht als ursächlich betrachtet werden
URL/DOI	https://theses.gla.ac.uk/75629/	Lokale Kopie	papers/CASE-033_Barrett_1992_West_Lothian_colliery.pdf
Status	Wird im Vereinigten Königreich als seltener Langzeitbeweis für einen Ausfall/Wartungsbedarf akzeptiert		

CASE-034 · Santibáñez & Ginocchio (2012), *Potential Use of Organic- and Hard-Rock Mine Wastes on Aided Phytostabilization of Large-Scale Mine Tailings under Semiarid Mediterranean Climatic Conditions*

Typ	dreijähriges Feldexperiment mit randomisierten Blöcken	Gegenstand / Geographie	Kupferrückstände von La Cocinera, Coquimbo, Chile; 2,400 m ²
Was es unterstützt	Dreizehn Behandlungen, drei Wiederholungen, 25 m ² -Plots; Ziegenmist, Biofeststoffe, Trauben-/Olivenrückstände und Mischungen wurden in 20 cm eingearbeitet. Biosolide und Traubenrückstände erzeugten die späteste Biomasse; chemische/mikrobielle Reaktionen und Porenwasser-Cu wurden gemessen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine Kohle; bewässert über drei Etablierungsperioden; Die meisten Fruchtbarkeits-/SOC-Indikatoren gingen mit der Zeit zurück; Die frühe Biosolid-Reaktion umfasste extreme DOC/Cu-Pulse und fast keine Biomasse im ersten Jahr, und Olivenrückstände versagten; Autoren geben ausdrücklich an, dass Autonomie nicht nachgewiesen wurde
URL/DOI	https://doi.org/10.1155/2012/895817	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiger lateinamerikanischer Vergleich von Materialien und Fehlern; vollständiger HTML-Check		

CASE-035 · Coetsee (2015), *Organic Matter Contribution of Ameliorants to Reclaimed Surface Mined Soil and Carbon Storage*

Typ	einjähriges Outdoor-Mini-Lysimeter-Experiment, Masterarbeit	Gegenstand / Geographie	rekonstruiertes Abraum-/Unterboden-/Oberboden-Kohleprofil auf der Versuchsfarm der Universität Pretoria, Südafrika
Was es unterstützt	Zehn Behandlungen × vier Wiederholungen; 40 Behälter; Kombinationen aus kompostiertem Rindermist, Holzspänen, Grasschnitt, Luzerne und Asche. Luzerne plus Mist plus Holzspäne verbesserten den pH-Wert, die Lagerungsdichte, die Wurzel-/Sprossbiomasse und den C-Bestand im Vergleich zur Kontrolle	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	1×1×1.2 m -Container, kein Versuch innerhalb einer Bergehalde; nur eine Winter- und eine Sommerernte; Dosen von 40 oder 132 t/ha, mit in Mischungen vermischten Komponenten; Wasserqualität, Schadstoffe, einheimische Gemeinschaft und Persistenz wurden nicht getestet
URL/DOI	https://repository.up.ac.za/handle/2263/50925	Lokale Kopie	papers/EXP-003_South_Africa_organic_ameliorants.pdf
Status	Wird als Beleg für einen kontrollierten Mechanismus akzeptiert, nicht als langfristiges Feldergebnis		

HYP-001 · Coaltech Research Association / University of Cape Town (2023), *Development of Fabricated Soils from South African Coal Waste*

Typ	offizieller Abschlussbericht; kontrolliertes Technosol/Topf-Experiment	Gegenstand / Geographie	ultrafeine Kohleflotationsrückstände, Südafrika
Was es unterstützt	95% -Rückstände und 5% -Malztreber wurden mit mehreren mikrobiellen Konsortien beimpft, sieben Tage lang gehalten und gepflanzt; EM und Komposttee verbesserten die frühen Pflanzenindikatoren, während dies bei Tee aus lokalem Minenboden nicht der Fall war. Die Unterschiede zwischen Mikroben und Biomasse haben sich im zweiten Wachstumszyklus weitgehend angeglichen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nächstes betriebsfähiges Analogon, aber kein ausgereifter Kompost, keine kleine Zugabe von Spenderboden, nur sieben Tage Vorinkubation, Gewächshaus statt Feld und keine langfristige Autonomie oder wasserbezogene Messgröße
URL/DOI	https://coaltech.co.za/wp-content/uploads/2023/08/Project-8.4.4-Fabricated-Soils-from-South-African-Coal-Waste-August-2023-1.pdf	Lokale Kopie	papers/HYP-001_Coaltech_2023_fabricated_coal_soils.pdf
Status	Schlüsselnahes Analogon und Gegenbeispiel zu „Jeder lebende Boden hilft“		

HYP-002 · Asemaninejad et al. (2018), *Blended pulp mill, forest humus and mine residual material Technosols for mine reclamation*

Typ	kontrolliertes Wachstumskammerexperiment	Gegenstand / Geographie	fünf saure und neutrale/alkalische Hartgesteinsbergwerksrückstände, Nord-Ontario
Was es unterstützt	Eine Spurenmenge Waldabfall – weniger als 0.02% trockene Schlammmasse – diente als mikrobielles Inokulum mit restlichem Zellstofffabrikschlamm; Pflanzenbiomasse könnte sich um das Vierfache erhöhen und mikrobielle Gemeinschaften verlagerten sich hin zu heterotrophen bodenähnlichen Taxa	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine Kohle; kein vollständiger B/C/D/E- und B-Zeitvergleich; Die verfügbare Methode sieht keine gesonderte Nachreifepériode vor. lösliches Cu/Ni stieg in einigen behandelten Substraten
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.114	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiges kleines Inokulum-Analogon mit Metallvorbehalt		

HYP-003 · Romero-Estonllo et al. (2023), *compost plus PGPR/mycorrhiza on Touro mine soil*

Typ	kontrolliertes Topfexperiment	Gegenstand / Geographie	Kupferminenboden/Rückstände, Spanien
Was es unterstützt	Der Kompost bei 1:10 w/w wurde vor dem Pflanzen 15 Tage lang stabilisiert; Anschließend wurden PGPR, kommerzielle Mykorrhiza oder beides hinzugefügt. PGPR verbesserte Überleben/Wachstum; Mykorrhiza allein und die Kombination ergaben keinen universellen Zusatznutzen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Das Inokulum wurde beim Pflanzen hinzugefügt, ohne anschließende Nachreifung; Kompost selbst war eine starke Behandlung; Topfwaage und kohlefreies Substrat
URL/DOI	https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1184070	Lokale Kopie	—
Status	Wird als enges Analogon zur direkten mikrobiellen Inokulation D akzeptiert, nicht als direkte Übereinstimmung und als Gegenbeispiel zu universellen Inokulumeffekten		

HYP-004 · Li, Zeng, Huang & Tan (2026), *Enhancing cow manure composting via staged inoculation of functional microbial consortia*

Typ	Kontrolliertes 50-Liter-Kompostierungsexperiment und Topf-Bioassay	Gegenstand / Geographie	Rindermist und Reisstroh, China
Was es unterstützt	Phasenspezifische Inokulationen wurden während der mesophilen, thermophilen, Abkühlungs- und Reifungsphasen hinzugefügt und mit einmaliger Inokulation und nicht inokulierter Kontrolle verglichen; Die schrittweise Impfung veränderte die Sukzessions-, TN-, Humifizierungs- und Reifeindikatoren und verbesserte den Pak-Choi-Bioassay	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein Spenderboden, abgebautes Material oder fertiger reifer Kompost mit anschließender zweiter Reifephase; Ein 30-Tage-Prozess und ein Topf-Bioassay belegen keine Feldpersistenz
URL/DOI	https://doi.org/10.3389/fmbi.2026.1855343	Lokale Kopie	—
Status	Wird als direkter Beleg dafür akzeptiert, dass der Zeitpunkt der Impfung die Kompostierung beeinflussen kann		

HYP-005 · de Gannes, Eudoxie & Hickey (2013), *Prokaryotic successions and diversity in composts as revealed by 454-pyrosequencing and companion fungal analysis*

Typ	Zeitreihe der primären Kompostgemeinschaft	Gegenstand / Geographie	verschiedene Kompostrezepte und postthermophile Prozesse
Was es unterstützt	Bakterien- und Pilzgemeinschaften veränderten sich zwischen der Thermophilie-, Abkühlungs- und Reifungsphase; Rezept und postthermophiles Management beeinflussten die endgültige Gemeinschaft und unterstützten die späte Wiederbesiedlung als überprüfbaren Mechanismus	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Testet keinen Spenderboden, Wiederherstellung nach dem Bergbau, Anlagenerrichtung oder E gegen B/C/D und B-Zeit
URL/DOI	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079512	Lokale Kopie	—
Status	Nur für Zeitmechanismus akzeptiert		

HYP-006 · **Danon et al. (2008), *Molecular analysis of bacterial community succession during prolonged compost curing***

Typ	primäre Zeitreihe der verlängerten Aushärtung	Gegenstand / Geographie	kommerziell ausgereifter Biofeststoff-Kompost
Was es unterstützt	Mikrobengemeinschaft, Atmung, DOC- und N-Umwandlungen veränderten sich auch nach der kommerziellen Reife weiter; sinkendes labiles C und zunehmende Nitrifikation zeigten, dass die Aushärtung nicht biologisch statisch ist	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein externes Spenderboden-Inokulum, Bergbaubsubstrat, Pflanzen oder Feldversuche
URL/DOI	https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00537.x	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert für den Sekundärreifungsmechanismus		

HYP-007 · **Ngo & Cavagnaro (2018), *Interactive effects of compost and pre-planting soil moisture on plant growth and mycorrhizal colonisation***

Typ	faktorielles Pot-Experiment	Gegenstand / Geographie	Agrarboden mit Tomaten/Weizen
Was es unterstützt	Kompost und 40-tägige Feuchtigkeitsregime vor der Pflanzung veränderten NH ₄ /NO ₃ und die Reaktion der Pflanze; Kompost erhöhte Nährstoffe/Pflanzenbiomasse, reduzierte jedoch die AMF-Besiedlung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nicht abgebautes Land oder Spenderboden-Vorimpfung; zeigt, dass zusätzliche Fruchtbarkeit eine gewünschte Symbiose unterdrücken kann
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/s41598-017-18780-2	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiges Analogon zum Gegenmechanismus		

HYP-008 · **Tkacz et al. (2015), *plant-driven selection from natural soil inoculum in sand and compost***

Typ	kontrollierter Mehrgenerationen-Mikrokosmos	Gegenstand / Geographie	autoklavierter Sand oder handelsüblicher Kompost mit 10% natürlichem Boden-Inokulum und serieller Verdünnung
Was es unterstützt	Das Empfängermedium und die Pflanzenarten selektierten die Gemeinschaft stark; Bodeninokulum könnte den Erreger <i>Olpidium Brassicae</i> übertragen; Kompost garantierte keine Mykorrhizierung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Pflanzen wurden sofort eingeführt, nicht nach getrennter Reifung; künstlicher Mikrokosmos und kein Bergbaubsubstrat
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/ismej.2015.41	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert für Empfängerfilterung und Biosicherheitsrisiko		

HYP-009 · Han et al. (2022), *Soil inoculum identity and rate jointly steer restoration*

Typ	dreijähriges wiederholtes Felddosis-Wirkungs-Experiment	Gegenstand / Geographie	degradiertes Grasland
Was es unterstützt	Zwei Spendergemeinschaften und Inokulumsschichten von 1, 3 und 5 cm erzeugten dosis- und identitätsabhängige Trajektorien; größere Beträge rückten das System näher an den Spender heran	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Dosen von etwa 10, 30 und 50 L/m ² sind kein kleiner Puls; nicht abgebautes Grünland; minimale ökologisch wirksame Dosis wurde nicht festgelegt
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/s43705-022-00144-1	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiger Beleg für Spender- und Dosisabhängigkeit		

HYP-010 · SARE ONE22-422 (2022–2023), *finished compost inoculated with spent mushroom substrate*

Typ	abgeschlossenes landwirtschaftliches Projekt, nur Laborphase	Gegenstand / Geographie	reifer Kompost plus pilzreiches verbrauchtes Pilzsubstrat, USA
Was es unterstützt	Reifer Kompost erhielt 10 %, 25 % oder 50 % Inokulum für 14 Tage; Pilzbiomasse und Pilz-Bakterien-Verhältnis stiegen mit der Dosis; Kompost- und reine Inokulumkontrollen wurden einbezogen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die geplante Feldphase wurde nicht abgeschlossen; hohe Inokulumanteile, kein Bergbaubsubstrat und keine Ergebnisse zu Pflanzen oder Wasser; graue Literatur
URL/DOI	https://projects.sare.org/project-reports/one22-422/	Lokale Kopie	—
Status	Nächstliegendes Verfahrensanalogon, aber unzureichende Ergebnisbelege		

HYP-011 · **Choińska-Pulit et al. (2026), *Development and Field Evaluation of a Microbially-Inoculated Feather–Straw–Lignite Compost Material for the Reclamation of Post-Mining Soils*, published 14 July 2026**

Typ	Peer-Review-Studie zur kontrollierten Kompostierung plus einjährige Feldauswertung	Gegenstand / Geographie	sandiger Bergbaufolgeboden, Braunkohlerevier Konin, Polen
Was es unterstützt	Eine Feder-Stroh-Braunkohle-Mischung bei 20:60:20 wurde zu Beginn des Prozesses mit <i>Bacillus altitudinis</i> 33, <i>Bacillus methylotrophicus</i> Alk und <i>Streptomyces fulvissimus</i> K59 beimpft und dann 41 Tage lang in einem dynamischen Reaktor 200 dm ³ kompostiert. Produkt C:N erreichte 12,09 und NH ₄ -N 0,03 %; 18,3 t/ha wurde in einem Maisfeldversuch im Jahr 2025 eingesetzt. Im Vergleich zur unbehandelten Parzelle erreichte die Urease 3.91 UU, P ₂ O ₅ 3.4 g/kg und die mittlere Sprosshöhe 30.23 gegenüber 25.88 cm (+15% ; t(645)=6.63 , p<0.001)	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Impfung erfolgte zu Beginn, nicht nach der thermophilen Reifung; Im Feldstadium gab es eine behandelte und eine unbehandelte Parzelle, ohne den gleichen reifen, nicht inokulierten Kompost, randomisierte Feldwiederholungen, mehrjährige Überwachung, Sickerwasser, Mikrobiom-Persistenz- oder Autonomietests
URL/DOI	https://doi.org/10.3390/ma19143035	Lokale Kopie	— (vollständiges offenes HTML überprüft; lokales PDF nicht heruntergeladen, da Host-DNS nicht verfügbar war)
Status	Nächstes Analogon zur Feldanwendung, beantwortet jedoch nicht den Vergleich zwischen B- und E-ähnlichem vorgeimpftem Material und unterscheidet nicht zwischen den Systemen B/C/D/E		

FAIL-001 · **Paper mill sludge runoff study (2008)**

Typ	Primärfeldexperiment	Gegenstand / Geographie	Tagebau-Kohlenbergwerk, USA
Was es unterstützt	224/672 trockenes Mg/ha stark reduzierter Abfluss und Erosion	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Bei der hohen Dosis vor dem Pflanzen betrug der gelöste gelöste Sauerstoff ≤ 0,4 mg/L und der CSB stieg stark an: Physischer Nutzen bedeutet nicht Wassersicherheit
URL/DOI	https://doi.org/10.2134/jeq2007.0648	Lokale Kopie	—
Status	Schlüssel-Gegenbeispiel		

FAIL-002 · **Branzini et al. (2014), compost/biochar and As**

Typ	primäres Pot-Experiment	Gegenstand / Geographie	kontaminierter Minenboden
Was es unterstützt	Kompost verringerte die Löslichkeit mehrerer Metalle	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kompost erzeugte den größten Anstieg der Löslichkeit anorganischer As; ein Feldtest ist erforderlich
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.11.026	Lokale Kopie	—
Status	Schlüssel-Gegenbeispiel		

FAIL-003 · **Element budgets at two afforested mine sites (2001)**

Typ	Zweijährige Überwachung der Feldlösung	Gegenstand / Geographie	pyritischer und nichtpyritischer Braunkohleabraum
Was es unterstützt	Zeigt deutlich die Substratabhängigkeit der Behandlungseffekte	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Am pyritischen Standort erzeugte die Oxidation Flüsse von bis zu 6 t Fe/ha/Jahr und 14 t Sulfat-S/ha/Jahr: Durch die Bodenverbesserungsmaterialien wurde die Geochemie nicht aufgehoben
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00143-9	Lokale Kopie	—
Status	Schlüssel-Gegenbeispiel		

FAIL-004 · **Stehouwer et al. (2006), *Nutrient and Trace Element Leaching following Mine Reclamation with Biosolids***

Typ	dreijährige Feldwasserüberwachung	Gegenstand / Geographie	Kohlebergwerksland, Pennsylvania
Was es unterstützt	Bei 134 Mg/ha an Biofeststoffen mit niedrigem C:N-Gehalt erreichte der Spitzenwert des Sickerwassers NO ₃ etwa 300 mg/L; Der geschätzte Verlust an anorganischem N betrug in den ersten beiden Jahren 2.327 kg N/ha; Al, Mn, Cu, Ni, Pb und Zn wurden gleichzeitig mobilisiert	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein Standort und eine zu diesem Zeitpunkt zulässige hohe Dosis begründen kein allgemeines Verbot, sondern belegen die Notwendigkeit einer N- und C:N-basierten Dosierung und Wassertüberwachung
URL/DOI	https://doi.org/10.2134/jeq2005.0134	Lokale Kopie	—
Status	Schlüssel-Gegenbeispiel		

FAIL-005 · **Dere et al. (2012), *Nutrient leaching and soil retention in mined land reclaimed with stabilized manure***

Typ	dreijähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	verlassenes Kohleland, Pennsylvania
Was es unterstützt	Kompostbehandlungen haben <1 % des eingesetzten N ausgelaugt; eine Mischung aus frischem Geflügelmist und Papierfabrikschlamm bei C:N 29 verlor in drei Jahren 393 kg N/ha, gegenüber 107 kg N/ha bei C:N 20	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Geflügelmist und eine spezielle Papierfabrikmischung; kann ohne Analyse nicht auf Ziegen-, Schaf-, Rinder- oder Pferdemist hochgerechnet werden
URL/DOI	https://doi.org/10.2134/jeq2012.0036	Lokale Kopie	—
Status	Wichtiger Vergleichsfall		

SAN-001 · US EPA (2025), Draft PFOA/PFOS Risk Assessment for Sewage Sludge

Typ	offizieller Entwurf einer Risikobewertung	Gegenstand / Geographie	Biosolide, USA
Was es unterstützt	In einigen Szenarien überschritt das modellierte Risiko die Schwellenwerte bei nur 1 ppb PFOA/PFOS; Risiko hängt von Dosis, Ort und Expositionsweg ab	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein Entwurf, keine endgültige Verordnung, der nicht alle PFAS abdeckt
URL/DOI	https://www.epa.gov/biosolids/draft-sewage-sludge-risk-assessment-perfluorooctanoic-acid-pfoa-and-perfluorooctane	Lokale Kopie	—
Status	Obligatorische Sicherheitsquelle		

SAN-002 · US EPA OIG (2018), unregulated pollutants in biosolids

Typ	Prüfung durch unabhängige Regulierungsbehörden	Gegenstand / Geographie	Biosolide, USA
Was es unterstützt	Die EPA identifizierte 352 Schadstoffe, konnte viele davon jedoch nicht bewerten; Dazu gehörten Arzneimittel, Steroide und Flammenschutzmittel	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Der Nachweis ist nicht ein Beleg für die Schädlichkeit jeder Substanz
URL/DOI	https://www.epa.gov/office-inspector-general/report-epa-unable-assess-impact-hundreds-unregulated-pollutants-land	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

SAN-003 · EU JRC, phosphorus loop

Typ	offizielles wissenschaftspolitisches Material	Gegenstand / Geographie	EU
Was es unterstützt	P kann aus Abwasser/Schlamm/Asche zurückgewonnen werden; Die Reinigung zu einem Produkt unterscheidet sich von der Verwendung von Vllschlamm	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die technische Machbarkeit begründet nicht die Wirtschaftlichkeit einer bestimmten Stadt
URL/DOI	https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities/circular-resource-management/closing-phosphorus-loop_en	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

SAN-004 · Huygens et al. / JRC (2022), sewage sludge risk

Typ	offizieller wissenschaftlicher Risiko-Screening-Bericht	Gegenstand / Geographie	EU
Was es unterstützt	Schlamm enthält Nährstoffe, aber auch persistente organische Schadstoffe, Mikroplastik, AMR-Gene/Krankheitserreger; Landverbreitungs- und Verwertungswege bedürfen einer gesonderten Beurteilung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Das Screening bedeutet nicht, dass für jede Charge das gleiche Risiko besteht. Der Nachweis eines ARG oder einer Chemikalie ist nicht automatisch ein Beleg für einen Schaden
URL/DOI	https://doi.org/10.2760/541579	Lokale Kopie	papers/SAN-004_JRC_2022_sewage_sludge_risk.pdf
Status	Obligatorische Sicherheitsquelle		

REG-001 · EU Regulation 2021/2086 on precipitated phosphate salts

Typ	Regulierung	Gegenstand / Geographie	EU
Was es unterstützt	Struvit ist unter eingeschränkten Rohstoffen, Verfahren und Qualitätskontrollen zugelassen; gemischter Siedlungsabfall ist ausgeschlossen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nicht für jedes Schlamm- oder Struvitprodukt eine Zulassung
URL/DOI	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32021R2086	Lokale Kopie	—
Status	Akzeptiert		

PAP-001 · Goossen et al. (2023), PFAS from compostable food serviceware

Typ	Grundstudium	Gegenstand / Geographie	kommerzielle Kompostierung, Maine
Was es unterstützt	Kompost, der „kompostierbares“ Servicegeschirr enthielt, enthielt wesentlich mehr PFAS als an der Quelle getrennte Lebensmittelabfälle plus Gras/Einstreu	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Drei Kompostchargen sind keine pauschale Bewertung aller Verpackungen
URL/DOI	https://doi.org/10.1116/6.0002746	Lokale Kopie	—
Status	Schlüssel-Gegenbeispiel		

PAP-002 · Li et al. (1997), papermill sludge on coal refuse

Typ	Feldstudie	Gegenstand / Geographie	Kohleabfälle, USA
Was es unterstützt	Als Ergänzung wurde in der Praxis Papierfabrikschlamm verwendet	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die vollständige Zusammensetzung, Dosierung und langfristige Wasserwirkung erfordert noch eine Wiederherstellung
URL/DOI	https://www.asrs.us/Publications/Conference-Proceedings/1997/0277-Li.pdf	Lokale Kopie	—
Status	Wird überprüft		

PAP-003 · Shipitalo & Bonta (2008), paper-mill sludge runoff

Typ	13-monatiges Feldabflussexperiment	Gegenstand / Geographie	jüngstes Tagebau-Kohlenbergwerk, Ohio
Was es unterstützt	Schlamm bestand aus Zellulosefasern, Ton und Kalk; 224/672 trockenes Mg/ha reduzierten den Abfluss um das Vier- bis Sechsfache und die Erosion von 47 auf <1 Mg/ha	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Vor dem Pflanzen betrug der Sauerstoffgehalt im Abfluss $\leq 0,4$ gegenüber 8,2 mg/L und der CSB 7.229 gegenüber 880 mg/L bei der hohen Dosis; ein Mühlenstrom, nicht alles Papier
URL/DOI	https://doi.org/10.2134/jeq2007.0648	Lokale Kopie	—
Status	Zweiseitiges Schlüsseletui		

PAP-004 · Choi et al. (2019), PFAA in municipal organic solid waste composts

Typ	primäre analytische Studie	Gegenstand / Geographie	neun kommerzielle OFMSW-Komposte und ein Hinterhofkompost, USA
Was es unterstützt	Komposte, die Lebensmittelverpackungen akzeptierten, hatten eine Gesamt-PFAA-Belastung von 28,7–75,9 µg/kg gegenüber 2,38–7,60 µg/kg ohne Verpackung; Trennung von Verpackungs-/Rohstoffangelegenheiten	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kleine Probe; keine Minenanwendung oder eine Risikobewertung für jedes PFAS
URL/DOI	https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00280	Lokale Kopie	—
Status	Hauptgrund, Essensreste nicht mit Verpackungen zu vermischen		

PAP-005 · Bugsel, B., Bauer, R., Herrmann, F., Maier, M. E., & Zwiener, C. (2022), *LC-HRMS screening of per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) in impregnated paper samples and contaminated soils, Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 414, 1217–1225

Typ	Primäres Non-Target/Target-Screening	Gegenstand / Geographie	imprägniertes Papier und kontaminierte Böden
Was es unterstützt	PFAS-Muster unterstützten einen möglichen Zusammenhang zwischen kontaminiertem Boden und PFAS-behandeltem Papierabfall/-schlamm	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein historischer Kontaminationsfall, keine Bewertung aller sauberen Papiere/Kartons
URL/DOI	https://doi.org/10.1007/s00216-021-03463-9	Lokale Kopie	—
Status	Innerhalb enger Grenzen akzeptiert; Bibliografischer Datensatz, unabhängig korrigiert für die EN-Ausgabe		

ECO-001 · **Reclamation of sulphide tailings with MSW compost**

Typ	Technischer Wirtschaftsbericht	Gegenstand / Geographie	Elliot Lake, Kanada
Was es unterstützt	Zeigt, dass bei einer Transportentfernung von etwa 600 km der Transport etwa 30–46 \$/t kostete und starken Verkehr verursachte	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ohne Indexierung und lokale Daten können historische Preise nicht auf den heutigen Kusbass angewendet werden
URL/DOI	https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2251a.pdf	Lokale Kopie	—
Status	Als Berechnungsstruktur akzeptiert		

ECO-002 · **BIOSALIX**

Typ	offizielles Demonstrationsprojektergebnis	Gegenstand / Geographie	Kohlebergwerk, Alberta
Was es unterstützt	Das 15,8 Mio. CAD teure Projekt testete Biofeststoffe plus Holzspäne plus Weide und meldete eine Reduzierung des erforderlichen Bodenvolumens um 29 %	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Der Konzeptnachweis stieß im kommerziellen Maßstab auf Schwierigkeiten; Die Projektwebsite ersetzt nicht den vollständigen Bericht
URL/DOI	https://www.eralberta.ca/projects/details/biosalix-mine-reclamation-using-and-organic-residuals-to-augment-soil-quality-and-underpin-a-cleantech-economy-through-short-rotation-willow-feedstock-production/	Lokale Kopie	—
Status	Vorrangiger wirtschaftlicher Fall		

ECO-003 · **Sergey Nikolaevich (26 September 2026), scenario model for a complex old 100 ha Apanas-type coal spoil heap**

Typ	Vom Autor bereitgestelltes Berechnungsmodell / keine Standortschätzung	Gegenstand / Geographie	hypothetische alte 100 ha große Bergehalde: gefährliche Prozesse, Erdarbeiten, mineralische Wurzelzone, organisches/biologisches Stadium, Vegetation, Arbeit, 20-Jahres-Überwachung und Notfall
Was es unterstützt	Definiert ein gerundetes zentrales Szenario von 800 Mio. RUB, Spannen von 400–500 Mio. RUB und 1,3–1,8 Mrd. RUB, eine Kostenstruktur, eine hypothetische 32,3 Mio. m ³ Taubgesteinsmasse und ein Abtragungsverhältnis von 6,1–11,5 m ³ /t; Die arithmetische Umrechnung zum ECO-004 -Kurs ergibt 1,8–3,4 \$/t für das zentrale Szenario und 2,9–7,6 \$/t für das schwerwiegende Szenario	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine Schätzung für Apanas, kein Marktpreis, keine Gesamtumweltkosten von Kohle oder standortspezifisches technisches Design; Der Abraumfaktorbereich wird separat von ECO-005 – ECO-007
URL/DOI	—	Lokale Kopie	SCENARIO_ECONOMIC_MODEL.md
Status	Als vom Autor bereitgestelltes Szenario akzeptiert; Die endgültige Berechnung pro Tonne erscheint im Haupt-PDF-Text		

ECO-004 · **Bank of Russia, official US-dollar exchange rate on 26 September 2026**

Typ	offizielle Währungsbasis	Gegenstand / Geographie	RUB/USD-Umrechnung für Szenariomodell ECO-003
Was es unterstützt	Fixiert 1 USD = 84,3414 RUB am Modelldatum und macht die Umrechnung von Rubel-Szenarien reproduzierbar	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Währungsumrechnung wandelt Szenarioannahmen nicht in beobachtete Marktkosten um
URL/DOI	https://www.cbr.ru/currency_base/dynamics/?UniDbQuery.From=01.01.2022&UniDbQuery.Posted=True&UniDbQuery.VAL_NM_RQ=R01235&UniDbQuery.mode=1&UniDbQuery.so=1	Lokale Kopie	—
Status	Offizielle Tarifquelle; Stichprobenkontrolle 26. September 2026		

KUZ-001 · **Bragina et al. (2014), soils on overburden dumps in Kuzbass**

Typ	Primärer Forschungsartikel	Gegenstand / Geographie	Waldsteppe und Gebirgstaiga, Kusbass
Was es unterstützt	Vergleicht Böden/Gesteine, Spurenelemente und Auswirkungen der Selbstentzündung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Eine Chronosequenz ist keine wiederholte Überwachung eines Standorts
URL/DOI	https://doi.org/10.1134/S1064229314050032	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall		

KUZ-002 · **Gorozhanina et al. (2023), forest vegetation on dumps of different ages**

Typ	20-jährige Feldbeobachtungsreihe	Gegenstand / Geographie	Kusnezker Becken
Was es unterstützt	Topographie, Substratdichte und Alter sind mit unterschiedlichen Wald-Vegetationsverläufen verbunden	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Waldstruktur ist keine vollständige Bewertung der Bodenfunktion
URL/DOI	https://doi.org/10.1002/ece3.10276	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall		

KUZ-003 · **Kupriyanov & Manakov (2016), “Patterns of vegetation-cover recovery on Kuzbass spoil heaps”**

Typ	primäre Feldstudie	Gegenstand / Geographie	Kusbass
Was es unterstützt	Identifiziert acht vom Menschen verursachte Ökotope; Die Nachfolge wird durch die Standortbedingungen bestimmt, nicht allein durch das Kalenderalter	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Kein Versuch städtischer Bioströme
URL/DOI	https://doi.org/10.15372/SJFS20160205	Lokale Kopie	papers/KUZ-003_Sheremet_2016_Kusbass_vegetation.pdf
Status	Prioritätsfall		

KUZ-004 · Problems of mine-technical reclamation for stable forest stands

Typ	Hauptartikel	Gegenstand / Geographie	25–45-jährige Kusbass-Bergehalden
Was es unterstützt	Zeigt die Heterogenität des potenziell fruchtbaren Materials, Qualitätsverluste während der Ablösung/Lagerung/Ausbringung und die Rolle der Partikelgrößenverteilung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Das Vorhandensein einer aufgetragenen Schicht weist nicht auf einen stabilen Wald hin
URL/DOI	https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-gornotekhnicheskogo-etapa-rekultivatsii-otvalov-kuzbassa-v-aspekty-formirovaniya-ustoychivyyh-drevesnyh-nasazhdeniy	Lokale Kopie	—
Status	Prioritätsfall		

KUZ-005 · Shipilova & Semina (2016), “Physical properties of soils in technogenic landscapes of the Kuzbass forest-steppe zone”

Typ	primäre Feldstudie	Gegenstand / Geographie	20 Jahre alte Bergehalden in der Bachatsky-Lagerstätte
Was es unterstützt	Vergleicht ein Technosol, vier Arten von Embryozem und zonalem Chernozem; zeigt hohe Steinigkeit, heterogene Dichte/Porosität und die Rolle der Deponietechnologie	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Beim räumlichen Vergleich handelt es sich nicht um die wiederholte Überwachung einer Entwicklungspfad; Das Alter allein erklärt keine Unterschiede
URL/DOI	https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-25-28	Lokale Kopie	papers/KUZ-005_Shipilova_Semina_2016_Bachatsky_physical_properties.pdf
Status	Akzeptiert		

KUZ-006 · Kupriyanov et al. (2025), “Restoration of steppe on spoil heaps”

Typ	wissenschaftliche Monographie mit einem mehrjährigen Feldversuch	Gegenstand / Geographie	Vinogradovsky-Mine und andere Kusbass-Bergehalden
Was es unterstützt	Vergleicht nacktes künstliches Eluvium, eine 10 cm dicke Schicht potenziell fruchtbaren Lehms und eine 10 cm dicke fruchtbare Bodenschicht unter vier Gras-Samen-Mischungsarten mit vier Wiederholungen; beinhaltet Daten 2014/2015–2023	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	städtischer Kompost oder Mist wird nicht getestet; Einige Autoreninterpretationen erfordern eine Überprüfung anhand aktueller SOM-Konzepte und Tabelleneinheiten. naturnahe Vegetation bedeutet nicht automatisch volle Bodenautonomie
URL/DOI	https://kuzbs.ru/images/stories/pdf/izdania/Rekonstruktsiya_na_otvalakh.pdf	Lokale Kopie	papers/KUZ-006_Rekonstruktsiya_ekosistem_na_otvalakh_Kusbassa.pdf
Status	Mit Einschränkungen akzeptiert		

KUZ-007 · Kupriyanov et al. (2021), “Reconstruction of the soil–vegetation layer on the surface of Kuzbass spoil heaps”

Typ	zweijähriges Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	Pervomaysky-Mine / Mayskoye-Minenverwaltung, Kusbass
Was es unterstützt	40 cm lössartiger Lehm plus 20/40/60 cm frische Boden-Vegetationsschicht; 200 m² pro Behandlung; 2019–2020: 43–50 Arten, mittlere Bedeckung bis etwa 80 %, weniger Ruderalbiomasse als bei natürlicher Begrünung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Den Behandlungen fehlten unabhängige Wiederholungen; zehn Teilproben innerhalb einer Parzelle ersetzen keine Replikation; die Spenderschicht wurde vor dem Abbau von genehmigten Flächen abgetragen; zwei Jahre und Biomasse belegen keine langfristige Bodenfunktion
URL/DOI	https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-46-52	Lokale Kopie	papers/KUZ-007_Ugol_2021_soil_vegetation_layer.pdf
Status	Mit starker Einschränkung akzeptiert		

KUZ-008 · Protasov, Portola & Seregin (2025), “Effects of seasonal atmospheric-temperature fluctuations on spontaneous-combustion centres in waste-rock dumps”

Typ	vierjährige instrumentelle Überwachung	Gegenstand / Geographie	aktives Selbstverbrennungszentrum auf einer Kusbass-Bergehalde
Was es unterstützt	In Tiefen von 0,5–2,5 m blieb die Temperatur bestehen und veränderte sich unabhängig von der saisonalen Oberfläche; Das Maximum erreichte 500 °C und 2,5-m-Bohrungen konnten die Tiefe der Quelle nicht bestimmen	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Eine Quelle; vergleicht keine Löschmethoden und impliziert nicht, dass alle Bergehalden brennen
URL/DOI	https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250210	Lokale Kopie	papers/KUZ-008_Protasov_2025_spontaneous_combustion.pdf
Status	Harte Grundlage für das Engineering Gate: Organisches Material wird ausgeschlossen, bis die Quelle beseitigt ist		

KUZ-009 · Vorobieva et al. (2022/2023), “Assessment of chemical and sanitary indicators in coal-spoil material in the southern Kuznetsk Basin”

Typ	einmaliger Vergleich von drei Zonen	Gegenstand / Geographie	Korchakol-Kohlenhalde, südlicher Kusbass
Was es unterstützt	Zeigt Heterogenität in Bezug auf pH-Wert, Feuchtigkeit, Ba, Enzymaktivität, organische Verunreinigungen und hygienisch-bakteriologische Indikatoren zwischen den Zonen eines 5–30 Jahre alten Haufens; einige Indikatoren übertrafen die Benchmarkwerte	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Die Zonen unterschieden sich in Alter, Gestein und Landgewinnung, daher handelt es sich hierbei nicht um eine eindeutige Chronosequenz; Die Empfehlung der Autoren zu biologischen Präparaten wurde in der Studie nicht geprüft; Eine Saison und ein Ort
URL/DOI	https://doi.org/10.23859/estr-220603	Lokale Kopie	papers/KUZ-009_Vorobieva_2022_chemical_sanitary_indicators.pdf
Status	Wird als Baseline-Screening-Evidenz akzeptiert, nicht als Behandlungsevidenz		

KUZ-010 · **Kuzbass Ministry of Natural Resources (2026), report on the state of the environment in 2025**

Typ	offizieller Regionalbericht	Gegenstand / Geographie	Region Kemerowo – Kusbass
Was es unterstützt	Ende 2025 waren 123.634 ha Land gestört; im Laufe des Jahres wurden 4.620 ha neu gestört und 1.265 ha rekultiviert; bietet regionale Basisdaten zu Wasser, Abfällen und Flächen sowie eine Liste aktueller Studien	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Aggregierte Zahlen geben keinen Aufschluss über die Qualität der Wiederherstellung, Alter und Typ einzelner Bergehalden oder einen kausalen Behandlungseffekt
URL/DOI	https://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/	Lokale Kopie	papers/KUZ-010_Kuzbass_environment_report_2025.pdf
Status	Verbindliche regionale Basislinie		

FLOW-001 · **Kuzbass newspaper (21 May 2024), environmental-forum report citing the regional minister of agriculture**

Typ	Regionalzeitung / Nebenbericht einer amtlichen Stellungnahme	Gegenstand / Geographie	Region Kemerowo – Kusbass
Was es unterstützt	Berichtet eine Größenordnung: mindestens 1,7 Mio. t Mist und Geflügelmist pro Jahr von mehr als 130 Betrieben; 52 % Rinder, 35 % Schweine, 12 % Geflügel; 580.000 t im Bezirk Nowokusnezsk	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Keine primäre statistische Tabelle; Nass-/Trockenbasis, aktuelle Nutzung, verfügbarer Überschuss, Qualität und Entfernungen zu Bergehalden sind unbekannt; die Zahl kann nicht als verfügbare Masse behandelt werden
URL/DOI	https://kuzbass85.ru/wp-content/uploads/2024/05/kuzbass-21-maya-2024.pdf	Lokale Kopie	—
Status	Kontext; erfordert eine primäre Überprüfung der Massenbilanz		

EXP-001 · **Gann et al. (2019), *International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration*, 2nd ed.**

Typ	internationaler Praxisstandard	Gegenstand / Geographie	global
Was es unterstützt	Definiert ein Referenzökosystem, messbare Erholungsmerkmale, Überwachung und die Unterscheidung zwischen Wiederherstellung und einfacher Sanierung/Begrünung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Bestimmt keine sichere Dosis des Bodenverbesserungsmaterials oder legt keine Anwendbarkeit auf eine bestimmte Bergehalde fest
URL/DOI	https://www.ser.org/page/SERStandards	Lokale Kopie	papers/EXP-001_SER_2019_International_Restoration_Standards.pdf
Status	Als Ergebnisrahmen akzeptiert		

EXP-002 · **Laushman et al. (2021), *Protocol for Installing and Monitoring a RestoreNet Restoration Field Trial Network Site***

Typ	offizielles reproduzierbares Feldprotokoll	Gegenstand / Geographie	trockenes degradiertes Land, USA
Was es unterstützt	Bietet eine blockierte/randomisierte Feldversuchsarchitektur, standardisierte Parzellenmessungen, Basislinien- und Wiederholungsüberwachung	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Nicht bergwerksspezifisch und testet keine organischen Ergänzungen; Parzellengrößen/Replikation können nicht ohne Leistungsanalyse und Standortbeschränkungen kopiert werden
URL/DOI	https://doi.org/10.3133/tm2A18	Lokale Kopie	papers/EXP-002_USGS_RestoreNet_Protocol.pdf
Status	Als Designreferenz akzeptiert		

REG-002 · **Russian Government Resolution No. 800 of 10 July 2018, former Rules for Land Reclamation and Conservation**

Typ	aufgehobene Verordnung	Gegenstand / Geographie	Russische Föderation
Was es unterstützt	Historischer Rahmen für Projekte, die vor dem 1. September 2025 genehmigt wurden und für die die Übergangsbestimmung von Nr. 781 gilt	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Aufgehoben ab 1. September 2025; nicht die aktuelle Basis für ein neues Projekt
URL/DOI	https://government.ru/docs/all/117418/	Lokale Kopie	—
Status	Nur historischer/Übergangskontext		

REG-003 · **Russian Government Resolution No. 781 of 29 May 2025, Rules for Land Reclamation and Conservation**

Typ	aktuelle Regelung	Gegenstand / Geographie	Russische Föderation
Was es unterstützt	Gültig vom 1. September 2025 bis 1. September 2031; erfordert ein Projekt, eine angestrebte Bodenqualität und technische/biologische Maßnahmen; Absatz 9 regelt die Verwendung bestimmter Abfallklassen gesondert und schafft keine generelle Erlaubnis für Kompost/Biofeststoffe	Was es nicht unterstützt/Einschränkung	Ein bestimmtes Bio-Produkt wird nicht automatisch als zulässig eingestuft; Abfall-/Produktstatus, Hygieneanforderungen, Umweltprüfung und standortspezifische Genehmigung erfordern eine separate Analyse
URL/DOI	https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202505290054	Lokale Kopie	—
Status	Aktuelle Rechtsgrundlage; Vollständiger rechtlicher Weg bleibt ungeklärt		

MIC-001 · **Dadzie et al. (2024), *Inoculating native microorganisms improved soil function and altered the microbial composition of a degraded soil***

Typ	Von Experten begutachtetes primäres Feldexperiment	Gegenstand / Geographie	stark degradierter Bergbaufolgeboden, Pilbara, Australien
Was es unterstützt	1 g nativer natürlicher Boden → 25 ml -Brühe für sieben Tage → serieller Transfer für sieben Tage → Kultur in extrudiertem Granulat; Bakterien erhöhten den Gesamt-N-Gehalt um 75 % und den SIR-Wert um 147 %, während Bakterien plus Cyanobakterien die gemessenen Bodeneigenschaften nicht verbesserten	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Kultivierbarer Teil, nicht das gesamte Mikrobiom; 28 Wochen; kein ausgereifter Kompostträger oder langfristige Persistenz; Behandlungswiederholungen wurden in Blöcken zusammengefasst
URL/DOI	https://doi.org/10.1111/rec.14025	Lokale Kopie	—; vollständiges Autorenmanuskript geprüft
Status	Wichtiges direktes Analogon: kleiner Spender → kultiviertes Inokulum → Träger → Bergbaufolgeboden		

MIC-002 · **Wawrik et al. (2005), *Effect of Different Carbon Sources on Community Composition of Bacterial Enrichments from Soil***

Typ	Peer-Review-Experiment zur primären Anreicherung	Gegenstand / Geographie	vier Böden, Labor
Was es unterstützt	Die Standardkultur erfasst einen kleinen Teil der Bodenvielfalt; Die Kohlenstoffquelle bestimmte die Zusammensetzung der angereicherten Gemeinschaften stärker als die Unterschiede zwischen den Quellböden	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Nur Bakterien, Labor und eine ältere molekulare Methode; zeigt Auswahlverzerrung, nicht Wiederherstellungsergebnis
URL/DOI	https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.6776-6783.2005	Lokale Kopie	—; PubMed/PMC geprüft
Status	Akzeptiert für den Kultivierungsbias-Mechanismus		

MIC-003 · **Kaminsky et al. (2023), *Leveraging microbiome rediversification for the ecological rescue of soil function***

Typ	Peer-Review-kontrolliertes Mikrokosmos-Experiment	Gegenstand / Geographie	Agrar- und Waldböden, USA
Was es unterstützt	Durch die Ergänzung der gesamten Gemeinschaft mit hoher Diversität wurden die Nitrifikation und die damit verbundenen Taxa/Gene wiederhergestellt. Inokulum mit geringer Diversität schlug fehl; Verdünnung und Umwelthanpassung waren wichtig	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Sterilisierte/rekolonisierte Mikrokosmen, keine Böden oder Felder nach dem Bergbau; eine Zielfunktion
URL/DOI	https://doi.org/10.1186/s40793-023-00462-4	Lokale Kopie	—; vollständig PMC geprüft
Status	Wichtiger Beleg dafür, dass durch Vereinfachung die Funktionsfähigkeit verloren gehen kann		

MIC-004 · **Douds, Nagahashi & Hepperly (2010), *On-farm production of inoculum of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and assessment of diluents of compost for inoculum production***

Typ	Peer-reviewtes primäres Vermehrungsexperiment	Gegenstand / Geographie	AMF-Produktion auf einem landwirtschaftlichen Betrieb, USA
Was es unterstützt	Standortheimisches AMF-Inokulum kann mit Wirtspflanzen in verdünnten Medien auf Kompostbasis vermehrt werden; dadurch lässt sich die umfangreiche Entnahme von Spenderboden verringern	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Landwirtschaftliches System; der Ertrag hängt von Wirt, Ausgangspropagulen und Substrat ab; kein direkter Versuch zur Wiederherstellung von Bergbaufolgeland
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.071	Lokale Kopie	—; PubMed geprüft
Status	Als skalierbare Methode für standortheimische AMF akzeptiert		

MIC-005 · ***Inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi in iron ore tailings areas under rehabilitation (2026)***

Typ	Peer-Review-Experiment zur primären Feldprobenahme und Fallenkultur	Gegenstand / Geographie	Fundão-Eisenrückstandsaniegerung, Mariana, Brasilien
Was es unterstützt	50 g -Feldmaterial in einem 1,000 ml -Gefäß mit autoklaviertem Sand und drei Wirtspflanzen für vier Monate zeigte eine wirtsgestützte AMF-Vermehrung und ermöglichte die Bewertung der Gewinnung von Vermehrungspflanzen	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Ein Vermehrungsversuch, kein Hektarprodukt oder eine Feldanwendung; Die AMF-Erholung blieb unter dem Referenzwert und hing vom Alter der Wiederbegrünung ab
URL/DOI	https://doi.org/10.1590/1413-7054202650014625	Lokale Kopie	—; vollständiges SciELO-HTML überprüft
Status	Wichtiges Scale-up-Analogon im Bergbaukontext		

MIC-006 · ***Soil biological recovery and plant growth under arbuscular mycorrhizal fungi inoculation in iron mining tailings and soil mixtures (2026)***

Typ	Peer-Review-Gewächshausexperiment	Gegenstand / Geographie	Eisenrückstände/natürliche Bodenmischungen, Brasilien
Was es unterstützt	Die Inokulation mit AMF-Sporen erhöhte die Wurzelbesiedlung, verbesserte jedoch weder die Enzymaktivität noch Glomalin; aufeinanderfolgende Pflanzenzyklen und labiler organischer Eintrag unterstützten die Mikrobiota	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Zwei 45-tägige Maiszyklen; 1:1 -Mischung aus natürlichem Boden und Abraum; kein reifer Kompost und kein Feldversuch
URL/DOI	https://doi.org/10.1590/1413-7054202650016325	Lokale Kopie	—; vollständiges SciELO-HTML geprüft
Status	Als negatives/kontextabhängiges AMF-Ergebnis akzeptiert		

MIC-007 · Mallon et al. (2024), <i>Niche availability and competitive loss by facilitation control proliferation of bacterial strains intended for soil microbiome interventions</i>			
Typ	Von Experten begutachtetes primärmechanistisches Experiment	Gegenstand / Geographie	bakterielle Bodenimpfung
Was es unterstützt	Eingeführte Stämme können nicht nur aufgrund der direkten Konkurrenz scheitern, sondern auch dadurch, dass sie das Wachstum einheimischer Konkurrenten fördern. Die Lebensfähigkeit einer Kultur garantiert nicht die Etablierung	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Mechanistisches Laborsystem, kein Wiederherstellungsfeldversuch
URL/DOI	https://doi.org/10.1038/s41467-024-46933-1	Lokale Kopie	—; vollständig PMC geprüft
Status	Akzeptiert für Nicht-Einrichtungs-Risikomechanismus		
MIC-008 · Crawford, Dice & Clark (2026), <i>Why, when, and how microbes can benefit ecological restorations</i>			
Typ	Peer-Review-Übersichtsarbeit	Gegenstand / Geographie	terrestrische Wiederherstellung, global
Was es unterstützt	Vergleicht kommerzielle Taxa, Konsortien und Mikrobiome des gesamten Bodens; betont Schäden an der Entnahmestelle, Kompatibilität, Handhabung und die Notwendigkeit einer Feldvalidierung	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Eine Übersichtsarbeit, kein Primärversuch; wird verwendet, um Technologien abzubilden und Primärstudien zu lokalisieren
URL/DOI	https://doi.org/10.1111/nph.70995	Lokale Kopie	—; Vollständiger HTML-Code des Herausgebers überprüft
Status	Zur Synthese und Navigation akzeptiert		
MIC-009 · <i>Does soil inoculation truly steer the composition of native soil communities?</i> (2026)			
Typ	peer-reviewte primäre Feldstudie	Gegenstand / Geographie	Grünland in Wiederherstellung
Was es unterstützt	Die Verlagerung hin zur Spendergemeinschaft erfolgte hauptsächlich in der geimpften Schicht; tiefere einheimische Bakterien/Nematoden konvergierten nicht gleichmäßig und die Pilzreaktion hing von der Herkunft des Spenders ab	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Grünland, kein Bergbaubsubstrat; kultiviertes Inokulum wurde nicht getestet
URL/DOI	https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2026.110105	Lokale Kopie	—; Zusammenfassung des Herausgebers/Methodenzusammenfassung überprüft
Status	Akzeptiert wegen Einschränkung der räumlichen Persistenz		

AUTH-001 · **Natalia Zubkova, author record of her visit to the Maiminskaya solar power plant in winter 2019 and proposal to use sheep for vegetation control**

Typ	Zeugenaussage des Teilnehmers / vom Autor bereitgestellte Aufzeichnung	Gegenstand / Geographie	Maiminskaya SPP, Republik Altai
Was es unterstützt	Zeichnet Natalias Erinnerung an den Besuch und den Antrag auf; Denis Shakin wird als potenzieller Zeuge genannt	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Keine unabhängige Aufzeichnung des Gesprächs; Die Aussage von Denis Shakin ist nicht im Korpus; stellt keinen Kausalzusammenhang mit späteren Hevel-Aktionen her
URL/DOI	—	Lokale Kopie	—
Status	Wird nur als Autorenaussage mit einer expliziten Grenze akzeptiert		

AUTH-002 · **Video of Natalia Zubkova visiting the Maiminskaya SPP, winter 2019**

Typ	von der Autorin beschriebene visuelle Aufzeichnung	Gegenstand / Geographie	Solkraftwerk Maiminskaya, Republik Altai
Was es unterstützt	Bestätigt Natalias Anwesenheit am Standort	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Der Vorschlag, Schafe einzusetzen, ist nicht aufgezeichnet; das Video ist nicht im aktuellen wissenschaftlichen Archiv enthalten und wurde für dieses Paket nicht erneut geprüft
URL/DOI	—	Lokale Kopie	nicht in research/soil-restoration enthalten
Status	Nur als von der Autorin beschriebener Beleg ihres Besuchs akzeptiert		

AUTH-003 · **Kommersant Krasnoyarsk (29 June 2020), “Sheep to graze at a solar power plant in the Altai Republic”**

Typ	identifizierbare Veröffentlichung, die direkt den Pressedienst von Hevel zitiert; Originalseite der Hevel-Pressemitteilung nicht gefunden	Gegenstand / Geographie	Ust-Kanskaya SPP; mögliche Ausweitung auf die SPPs Ust-Koksinskaya, Maiminskaya und Ongudayskaya
Was es unterstützt	Meldet eine Herde von 50 Schafen für die Sommersaison und übermittelt die Aussage des Unternehmens, dass die Praxis möglicherweise auch in anderen Werken, einschließlich Maiminskaya, angewendet werden könnte; ein separater Artikel von <i>MK Barnaul</i> vom selben Tag wiederholt unabhängig die Nummer 50 und die Zuschreibung an Hevels Pressedienst	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Nicht die erhaltene primäre Hevel-Pressemitteilung; stellt weder den Ursprung der Idee noch einen kausalen Zusammenhang mit Natalias Vorschlag her
URL/DOI	https://www.kommersant.ru/doc/4397338	Lokale Kopie	—
Status	Wird als identifizierbare, nahezu primäre Herkunft mit expliziter Abgrenzung akzeptiert		

Regeln für die Bezeichner

- SUB- – Substrat- und Störungstypen;
- CHEM- – Chemie und Biogeochemie;
- BIO- – Bodenbiologie;
- ORG- – Bioströme und Kompostierung;
- SAN- – Sanitärströme und Schadstoffe;
- PAP- – Papier und Zellstoff;
- CASE- – Feldfall;
- FAIL- – Fehlschlag oder erhebliche nachteilige Wirkung;
- KUZ- – Kusbass;
- ECO- – Wirtschaft und Logistik;
- EXP- – Experimentdesign;
- HYP- – spezialisierte Quellen für vorgeimpftes lebendes Substrat;
- MIC- – kultivierte und ganze native Mikrobiome, Träger und Inokulum-Scale-up;
- AUTH- – Autorenaussagen und Materialien zum Ursprung der Idee, die eine unabhängige wissenschaftliche Quelle nicht ersetzen;
- REG- – Regulierungsdokument.

Ergänzung zu V1.0: Abraumfaktor

ECO-005 · Kuzbass Fuel Company, publication of consolidated IFRS financial statements for 2010

Typ	primäre Unternehmensberichterstattung	Gegenstand / Geographie	Tagebauproduktion der KTK Group, Kusbass; Q4 und Gesamtjahr 2010
Was es unterstützt	In der Produktionstabelle sind die Entschichtungsverhältnisse von $6.1 \text{ m}^3/\text{t}$ für das vierte Quartal 2010, $7.3 \text{ m}^3/\text{t}$ für 2010 und $7.1 \text{ m}^3/\text{t}$ für 2009 aufgeführt. definiert als Abraumvolumen pro Tonne Kohle	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Unternehmensperiodenaggregat, kein Verhältnis für eine bestimmte Bergehalde, kein universeller Kusbass-Wert oder ein Apanas-Merkmal
URL/DOI	https://ktk.company/press-release/publikatsiya-konsolidirovannoy-finansovoy-otchetnosti-po-standartam-ifrs-za-god-okonchivshiysya-31-dekabrya-2010-goda	Lokale Kopie	—
Status	Wird als primäre Unterstützung für die Untergrenze des Szenariobereichs akzeptiert		

ECO-006 · D. S. Kostyuchenko (2017), dissertation abstract, “Justification of parameters for a combined-system technology for mining a suite of gently dipping coal seams”, KuzSTU

Typ	Primäres akademisches Berechnungsdokument / Zusammenfassung der Dissertation	Gegenstand / Geographie	Tagebauentwicklung sanft abfallender Flöze, zentraler Kusbass
Was es unterstützt	Meldet einen beobachteten aktuellen Abraumfaktorbereich von $9.3\text{--}12.3 \text{ m}^3/\text{t}$, eine Designpraxis von $10\text{--}12 \text{ m}^3/\text{t}$ und einen in Berechnungen verwendeten Wert von $11.5 \text{ m}^3/\text{t}$	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	$11.5 \text{ m}^3/\text{t}$ ist ein Grenzberechnungsparameter für eine bestimmte Entwicklungsklasse, kein universeller Durchschnitt oder eine Apanas-Messung
URL/DOI	https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2017/zlo/aut.pdf	Lokale Kopie	—
Status	Wird als Unterstützung für die Obergrenze mit expliziter Einschränkung akzeptiert		

ECO-007 · A. V. Selyukov (2016), “Assessment of the land intensity of opencast coal mines by modifying the surface-mining system”, *News of the Ural State Mining University*, 3(43), 82–86

Typ	Von Experten begutachteter technischer Artikel	Gegenstand / Geographie	Überseebergwerke und Kohlebergwerke in der Region Kemerowo
Was es unterstützt	Bietet Variabilitätskontext: Kemmerer 4.6 m ³ /t , Quintette 3.5–6.4 m ³ /t , Cerrejón 5–6 m ³ /t ; weist gesondert darauf hin, dass unterschiedliche geologische und technische Bedingungen zusätzliche Berechnungen erfordern	Was es nicht unterstützt / Einschränkung	Demonstriert nicht unabhängig die 6.1–11.5 -Grenzen und beschreibt Apanas
URL/DOI	https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-3-82-86	Lokale Kopie	—
Status	Als Übertragbarkeits- und Variabilitätskontext akzeptiert; Fehlerhafter lokaler Kopierlink zu einer anderen Studie wurde während der V1.0-Qualitätssicherung entfernt		

ElepiCup

Die Methode „Elefant in der Tasse“

Die große Quelle ist der **Elefant**. Der einer KI zur Verfügung stehende Kontext ist der **Becher**.

Die Methode soll nicht nur ein Fragment an eine KI weitergeben, sondern auch die Fähigkeit bewahren, Folgendes zu bestimmen:

- woher es kam;
- sein Belegstatus;
- die Bedingungen des Ergebnisses;
- seine Beschränkungen und Grenzen der Anwendbarkeit;
- die Unsicherheit;
- was bleibt unbekannt.

Das wichtigste Prinzip:

Ein Teil des Elefanten sollte nicht so tun, als wäre er der ganze Elefant.

ElepiCup – die Methode „Elefant in der Tasse“ – ist eine experimentelle Methode des *Experiment*-Projekts. Die Wirksamkeit ist noch nicht nachgewiesen und wird getestet. Es wird kein Anspruch auf absolute Neuheit, Priorität oder den Status einer etablierten Disziplin erhoben.

Autorin der Methode: Natalia Zubkova.

Dieses PDF ist die erste Implementierung des **Vollmodus** der Methode: ein streng strukturiertes evidenzbasiertes Dokument für den `Dokument → KI → Mensch`-Pfad.