

# Produktion, Test und Einsatz von künstlichem Oberbodensubstrat für die Abdeckung von Halden des Uranerzbergbaus

Dipl.-Berging. Reinhold Marski, Wismut GmbH, Chemnitz

## Zusammenfassung

In Vorbereitung der geplanten Haldenabdeckungen am Sanierungsstandort Schlema-Alberoda der WISMUT GmbH wurde von 1992 bis 1996 in Eigenproduktion ein kompostähnliches Rottesubstrat für die Etablierung einer spezifischen Oberbodenschicht hergestellt. Dafür wurden diverse organische und mineralische Abfallstoffe von Wirtschaft und Kommune vorrangig aus dem umliegenden Territorium angenommen und verarbeitet.

Die insgesamt erzeugte Substratmenge von etwa 250.000 m<sup>3</sup> ist auf den Plateauflächen der Halden 371/I und 371/II sukzessive in Rottemieten aufgebaut worden. Der mehrjährige Rotteprozeß ist durch externe Untersuchungen zum Schadstoffinhalt bzw. zur Schadstoffentwicklung begleitet worden.

Vor dem großflächigen Einsatz zur in situ-Oberbodenherstellung während der Abdeckung der profilierten Halden ist die Umweltverträglichkeit des Rottesubstrates durch Einbau in eine spezielle Hang-Lysimeteranlage auf wissenschaftlicher Grundlage ebenfalls über mehrere Jahre beobachtet und letztlich behördlicherseits bestätigt worden.

Die Technologie zur gezielten Einbringung des Rottesubstrates in den Aufbau der Zweischicht-Haldenabdeckung am Standort Schlema-Alberoda wurde in mehrmonatigen Feldversuchen getestet und dokumentiert.

Die Qualität des hergestellten Oberbodens entspricht in jeglicher Hinsicht den vielfältigen Anforderungen und Erwartungen auf WISMUT- wie auch auf Behördenseite (z. B. Erosionswiderstand, Wasserspeicherung, Vegetationsgrundlage) und trägt wesentlich zur Erfüllung der Sanierungszielstellungen sowie zur Langzeitstabilität des realisierten, standortspezifischen Abdecksystems bei.

## 1 Einleitung und Überblick

### 1.1 Charakterisierung von Haldenaufschüttungen

Der mehr als 40 Jahre anhaltende intensive Uranerzbergbau der SDAG Wismut hat in Thüringen und Sachsen zu einer großen Anzahl von Haldenaufschüttungen geführt (Tabelle 1). Ausgehend von dem radioaktiven und auch konventionellen Schadstoffinventar der Bergematerialien bestehen aufgrund der von den Haldenkörpern ausgehenden Emissionen - insbesondere über den Luft- und Wasserpfad – Schädigungen und Gefährdungen des natürlichen Umfeldes bzw. Risiken für die menschliche Gesundheit. Infolge ihrer oft beträchtlichen Dimensionen nehmen die Halden große Flächen in Anspruch und beeinträchtigen damit Infrastrukturen und Landschaftsbild. Hieraus sowie aus der berggesetzlichen Verpflichtung zur Wieder-nutzbarmachung der vom Bergbau in Anspruch genommenen Areale leitet sich für die meisten Halden ein Sanierungsbedarf ab [1].

**Tab. 1** Halden der Wismut GmbH (Stand 01.02.1996)

<b>Standort</b>	<b>Anzahl Stück</b>	<b>Volumen 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></b>	<b>Aufstands- fläche ha</b>
Bergbaurevier Aue / Westerzgebirge (Schlema/Alberoda und Pöhla)	42	47	345
Bergbaurevier Königstein / Westsachsen (incl. Gittersee)	3	5	38
Bergbaurevier Ronneburg / Ostthüringen (außerhalb des Tagebaus)	14	125	460
Aufbereitungsstandort Seelingsstädt / Ostthüringen (incl. Crossen)	5	51	237
Gesamt	64	228	1080

Die unterschiedliche geologische Natur der Lagerstätten, unterschiedliche Gewinnungsmethoden sowie diverse Förder- und Schüttprozesse sind die Ursache für das vielfältige Bild der Haldenkörper (Spitzkegelhalden, Tafelhalden, Hanganschüttungen) an den Standorten der ehemaligen Bergbaubetriebe (Abbildungen 1 und 2). Die lateralen und vertikalen Ausdehnungen, die zugehörigen Aufstands- und Mantelflächen sowie die Volumina der primär geschütteten Halden differieren sehr stark und unterlagen bereits während der aktiven Bergbauphase des öfteren mehr oder minder großen Veränderungen, z. B. durch Massenentnahmen für eine nachträgliche Aufbereitung des Haldenmaterials oder für eine Verwendung als Straßenbaumaterial.

Die Aufstandsflächen der einzelnen Halden betragen zwischen weniger als 1 ha und maximal 225 ha, die Schüttvolumina analog zwischen weniger als 0,1 Mio. m<sup>3</sup> und max. 66 Mio. m<sup>3</sup>. Die angeführten Maximalangaben beziehen sich auf die sogenannte „Absetzerhalde“, eine markante Tafelhalde im Lagerstättengebiet Ronneburg / Ostthüringen. Vor allem am Bergbaustandort Schlema-Alberoda im Westerzgebirge gehen die Hanganschüttungen der Einzelhalden in zusammenhängende Haldenzüge über und bilden somit Schüttkörper von mehreren hundert Metern Breite und bis über 2 km Länge.

Die Haldenmächtigkeiten weisen Werte zwischen wenigen Metern und maximal 50 m im Revier Schlema-Alberoda und bis um 100 m (Spitzkegelhalden) im Revier Ronneburg auf. Die Neigungen der Haldenflanken zeigen im wesentlichen die aus den Schüttvorgängen resultierenden natürlichen Böschungswinkel von Lockergesteinen zwischen etwa 34° bis 39° (Neigungsverhältnisse entsprechend 1 : 1,5 bis 1 : 1,2). Lokal existieren auch extrem steile Böschungsabschnitte mit Neigungsverhältnissen von 1 : 1,2 bis 1 : 1,0 (39° ... 45°).

Die Standorte der Einzelhalden und Haldenzüge wurden ausschließlich nach bergbautechnischen Gesichtspunkten festgelegt und befinden sich größtenteils direkt über den ausgedehnten Grubenfeldern. Daher sind sie auch häufig in unmittelbarer Nähe zur Wohnbebauung an der Peripherie und z.T. sogar innerhalb von Ortschaften gelegen. Im Raum Schlema-Alberoda/Westerzgebirge ist mehrfach eine Entfernung von nur wenigen Metern zwischen Haldenfuß und Wohnbebauung zu registrieren.



**Abb. 1** Spitzkegelhalden Reust (6,3 Mio. m<sup>3</sup>; 20,5 ha) am Sanierungsstandort Ronneburg auf Schichten des Oberen Ordoviziums bis Devon mit tafelförmiger Anschüttung (vorn), Betriebsgelände (rechts) und Reuster Wald (hinten); L 323/55, © WISMUT GmbH 1994



**Abb. 2** Tafelhalde Schüsselgrund (3,7 Mio. m<sup>3</sup>; 24,2 ha) am Sanierungsstandort Königstein als Talaufschüttung im Landschaftsschutzgebiet „Sächsische Schweiz“ auf Kreidesandsteinschichten mit begrünem Böschungsbereich (links vorn), Trockenbeeten für Schlämme der Wasserbehandlung (Mitte) und der Ortschaft Leupoldishain (hinten); L 273/50, © WISMUT GmbH 1993

## 1.2 Umweltbeeinflussungen durch Halden

Die von den Halden ausgehenden Umweltbeeinflussungen resultieren hauptsächlich aus dem radiologischen, geochemischen und anthropogen eingebrachten Schadstoffpotential, dessen Mobilisierung infolge der atmosphärischen und hydrosphärischen Einwirkungen durch die poröse Haldenstruktur begünstigt wird. Von wesentlicher Bedeutung für die dadurch verursachten Auswirkungen auf die Umwelt sind die teils intensive Nutzung des Haldenumfeldes als Siedlungs- und Wirtschaftsraum sowie die Nähe von Vorflut und Grundwasser. Damit unterliegt das gesamte, gesetzlich definierte Schutzgutspektrum (Mensch, Wasser, Boden, Luft, Natur- und Kulturräum) mehr oder weniger großen Beeinflussungen.

Ein Spezifikum der Halden des Uranerzbergbaues stellt die Emission von Radionukliden der natürlichen Uran-Zerfallsreihen dar [1]. Dieses spiegelt sich in erhöhten Werten der Gamma-Strahlung sowie in verstärkten Exhalationen und Konzentrationen von Radon und Radon-Folgeprodukten (RFP) in der halden- und bodennahen Atmosphäre infolge des Austrages über den Luftpfad wider. Aber auch über den Bodenpfad (Erosion / Verwehung von Haldenpartikeln) bzw. über den Wasserpfad (Lösung bzw. Aufnahme von Radionukliden durch Niederschlags-/Sickerwässer) wirken radioaktive Haldenbestandteile auf die Umwelt ein. Die Halden des Uranerzbergbaues sind damit unter den bergbaulich vorgegebenen Ablagerungsbedingungen Ursache für eine erhöhte Strahlenbelastung der Bevölkerung, welche durch die Möglichkeiten der direkten Strahlungseinwirkung (erhöhte Ortsdosisleistung), der Inhalation (körperliche Aufnahme von Radionukliden über den Atmungsvorgang) und der Ingestion (körperliche Aufnahme von radioaktivem Haldenmaterial, Sickerwasser oder radioaktiv kontaminierten Nahrungsmitteln) gekennzeichnet ist.

Ein weiterer wichtiger Komplex von haldenbedingten Umweltbelastungen besteht im Austrag von Metallen/Halbmعادallen (Schwermetalle wie Blei, Nickel, Cadmium, Kupfer; Arsen) wie auch von Mineralsalzen (Sulfate, Hydrogenkarbonate) aus den Halden in das nähere und weitere Umland.

Die Intensität der festgestellten Umweltbeeinflussungen durch die einzelnen Halden und der reale Gefährungsgrad der Schutzgüter korrelieren dabei mit folgenden Einflußgrößen:

- räumliche Dimensionen der Haldenkörper
- Schadstoffinventar (Art, Menge)
- Lagebeziehung zu Siedlungs-/Wirtschaftsgebieten
- Ausbreitungsbedingungen für emittierte Schadstoffe.

Neben diesen stofflichen Umweltbelastungen sind weitere Beeinträchtigungen durch die aufgeschütteten Haldenkörper zu verzeichnen. Diese betreffen vor allem die Störungen oder Schädigungen des Landschaftshaushaltes (Wasser- und Luftströmungen) und des Landschaftsbildes sowie der Infrastrukturen infolge der Flächen- und Raumdevastierungen, was im Extremfall im Verein mit anderen Bergbaueinwirkungen (z. B. Tagebaugewinnung, Ausbildung von Bruchfeldern) zur Beseitigung ganzer Orte führte. Sehr häufig sind Überschüttungen von Wegen, Straßen, Ver- und Entsorgungsleitungen sowie kleineren Vorflutern erfolgt.

Des weiteren erweisen sich die mit natürlichem Schüttwinkel abgelagerten Haldenmassen aufgrund der meist beachtlichen geometrischen Haldendimensionen und der Untergrundgegebenheiten (Neigungsverhältnisse, bodenphysikalische Eigenschaften der oberflächennahen Bodenschichten) als in vielen Fällen nur bedingt standsicher und zeigen in der Regel keine Langzeit-Standfestigkeit im Sinne der DIN 4084 auf.

### 1.3 Sanierungsziele und –optionen für Haldenverwahrungen

Die **Sanierungsziele** für die langfristig wirksame Haldenverwahrung basieren auf dem Grundsatz, die nachteiligen Umweltbeeinflussungen mit Hilfe von wirtschaftlich vertretbaren Aufwendungen auf ein ökologisch wie gesellschaftlich akzeptables Maß zu begrenzen [1]. Maßstab für die Sanierungsbestrebungen bilden dabei die natürlichen Hintergrundbelastungen.

Im Hinblick auf den Strahlenschutz werden sogenannte Interventionsmaßnahmen hinsichtlich bestehender Verhältnisse („gegebene Situation“/“pre-existing situation“) infolge zurückliegender Handlungen praktiziert. Unter Bezug auf das radiologische Inventar und die gegebenen Expositionsverhältnisse leiten sich die folgenden grundsätzlichen Zielstellungen ab:

- Reduzierung der äußeren Strahlenexposition auf ein dem Umfeld entsprechendes Niveau (Hintergrundbelastung)
- Verringerung der Exhalation von Radon/RFP und damit Reduzierung der Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre in Haldenbereich und Umfeld
- Reduzierung des Austrages von radionuklidbelasteten Sickerwässern
- Unterbindung des direkten Kontaktes mit oder der direkten Aufnahme von radioaktivem Haldenmaterial z. B. durch spielende Kinder
- Verhinderung der Erosion von Haldenbestandteilen sowie der Verwehung von radionuklidbelasteten Stäuben.

Die nichtradioaktiv bedingten stofflichen Gefährdungen wie auch die sonstigen genannten Umweltbeeinflussungen erfordern die Beachtung der nachstehenden ergänzenden Sanierungsziele:

- Herstellung von standsicheren und landschaftsangepaßten Schüttkörper- oder Geländekonturen (in Abhängigkeit von gewählter Verwahrungsoption, siehe unten)
- Reduzierung der Infiltrationsrate von Niederschlags- und Oberflächenwässern zur Verringerung der Bildung von belasteten Sickerwässern
- Verhinderung des erosiven Materialaustrages sowie von Staubverwehungen
- Schaffung von infrastrukturellen Ersatzmaßnahmen
- Durchführung von Maßnahmen zur Gewährleistung der Wiedernutzbarmachung des Haldengeländes entsprechend den abgestimmten Nachnutzungskonzepten.

Ausgehend von Sanierungsbedarf und Sanierungszielen wird eine dauerhafte Haldenverwahrung durch die folgenden zwei **Sanierungsoptionen** gewährleistet:

- \* In-situ-Verwahrung der Halden mittels Profilierung, Abdeckung/Erstbegrünung und Wiedernutzbarmachung der neukonturierten Haldenoberflächen
- \* Vollständiger Abtrag und Umlagerung der Haldenmassen mit Wiedernutzbarmachung der freigelegten Aufstandsflächen.



Die danach vorgenommenen Einzelbewertungen der Halden unter Berücksichtigung von Kosten, Risiken und standort- wie auch objektspezifischen Zusatzkriterien weist in der Mehrzahl der Fälle die In-situ-Verwahrung in der Verbindung von Profilierung des Haldenkörpers inclusive der Um- und Anlagerung der Abtragsmassen und abschließender Abdeckung des neukonturierten Haldenkörpers als optimale Lösungsvariante aus.

Eine markante Ausnahme bildet dahingehend der Standort Ronneburg im Bergbaurevier Ostthüringen mit dem hier vorhandenen Restloch des bis 1977 betriebenen Uranerz-Tagebaues Lichtenberg. Im Rahmen der Tagebausanierung, die eine vollständige Verfüllung des Tagebauhohlraumes (ca. 160 Mio. m<sup>3</sup>) und die Wiederherstellung der früheren Gelände- bzw. Vorflutverhältnisse vorsieht, wird der überwiegende Teil der bestehenden Haldenaufschüttungen im Rahmen einer objektübergreifenden Gesamtlösung abgetragen und geochemisch kontrolliert in das Tagebaurestloch eingebaut.

## **2 Haldenabdeckungen für das Bergbaurevier Aue/Westerzgebirge**

Das Bergbaurevier Aue beinhaltet die Standorte Schlema-Alberoda und Pöhla. Die erforderlichen Haldensanierungsarbeiten konzentrieren sich dabei auf die zahlreichen Aufschüttungen von Bergematerial im Raum Schlema-Alberoda.

In Bezug auf die haldenverursachten Umweltbeeinflussungen dominieren an diesem Standort klar die radiologischen Belastungen des Luftpfades. Dies ist ursächlich in der geochemischen Zusammensetzung der Ausgangsgesteine bzw. des Haldenmaterialies begründet und verbindet sich mit der besonderen Morphologie der Mittelgebirgslandschaft in diesem Raum. Die markanten Taleinschnitte der Hauptvorfluter Zwickauer Mulde und Schlemabach fungieren in jahreszeitlich unterschiedlichem Maße als Sammelgebiete für Luftmassen mit höheren Radonkonzentrationen.

Die nur lokal zu verzeichnenden, radioaktiv und/oder mit anderen Schadstoffen kontaminierten Haldensickerwässer sind im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung. Die Haldenmaterialien zeichnen sich zudem durch einen Überschuß an Karbonaten gegenüber säuregenerierenden Gesteinsanteilen aus, so daß die resultierenden Haldensickerwässer einen überwiegend neutralen Charakter besitzen.

Von den beschriebenen allgemeinen Sanierungszielen und den besonderen Standortbedingungen ausgehend lassen sich die mit der Haldenverwahrung am Standort Schlema-Alberoda verbundenen spezifischen Sanierungsanforderungen wie folgt umreißen:

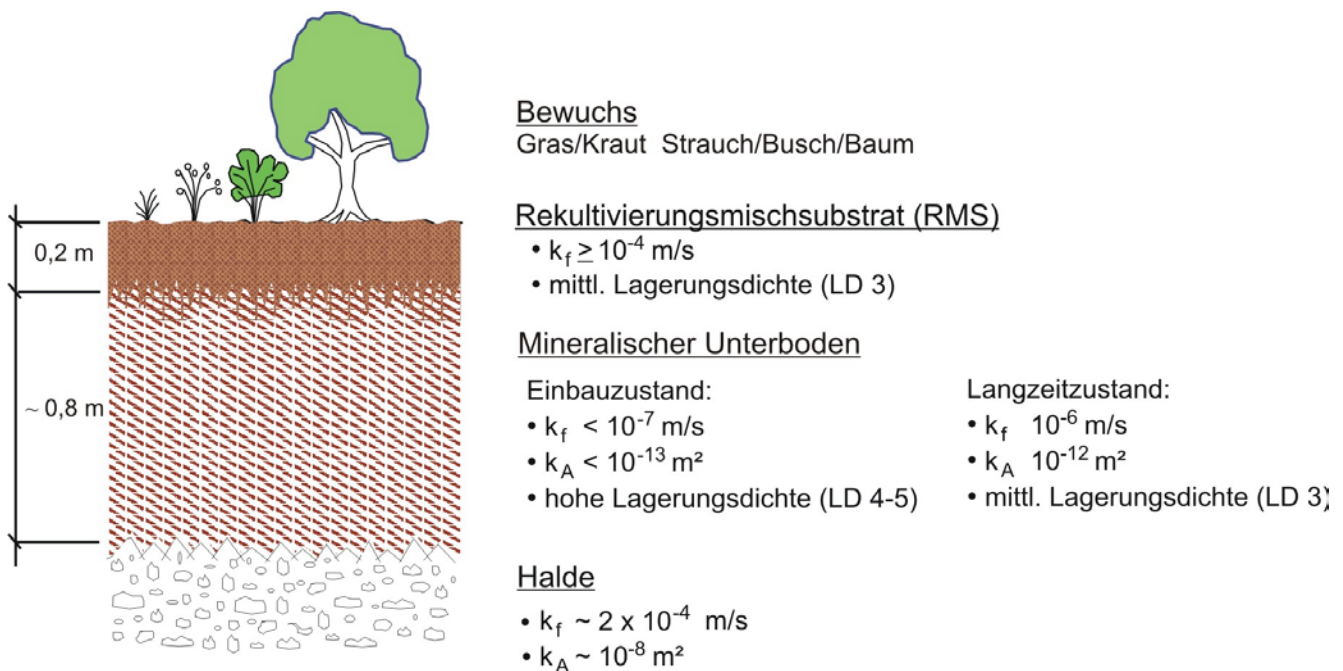
- Herstellung standsicherer und tragfähiger Haldenkonturen
- Unterbindung von direkter Ingestion sowie Verwehung und Erosion von Haldenmaterialien
- Reduktion der äußeren Strahlungsexposition auf natürliches Niveau
- Reduktion der Radon-Exhalation auf ca. 20 % - 30 % des Ausgangszustandes
- Reduktion der Niederschlagsinfiltration in den Haldenkörper auf ca. 50 % des unbedeckten Haldenzustandes.

Die radiologischen Zielstellungen basieren dabei auf dem von der Strahlenschutzkommission der BRD vorgegebenen Richtwert einer effektiven Dosis von 1 mS/a für die

Freigabe von durch den Uranerzbergbau kontaminierten Objekten für verschiedene Nachnutzungen. Durch die Abteilung Strahlenschutz der WISMUT GmbH sind daraus entsprechende primäre Bemessungs- und Parametervorgaben für das Design der Haldenabdeckung abgeleitet worden [2]:

- mittlere Gesamtmächtigkeit von ca. 1 m
- Nutzung eines mineralisch-bindigen Bodens (Schluff, Lehm) als Dämmschicht mit einer langfristig und flächenhaft wirkenden effektiven Wasserdurchlässigkeit  $k_f$  von etwa  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  m/s und einer Mindestschichtmächtigkeit von etwa 0,5 m
- Ergänzung der Dämmschicht mit einer aufliegenden, mineralisch-humosen Erdschicht als vegetationsförderndes Element mit einem höheren pflanzenverfügbaren Wasserspeichervermögen.

Zur Umsetzung dieser Zielstellungen ist durch WISMUT über mehrere Zwischenschritte ein Zweischicht- Abdecksystem entwickelt und optimiert worden [3], welches sich in seiner grundsätzlichen Konfiguration an die Bodenstruktur des Naturraumes Westerzgebirge anlehnt und in Abbildung 3 dargestellt ist.



**Abb. 3** Zweischicht-Abdecksystem für die Halden am Standort Schlema-Alberoda/Westerzgebirge der WISMUT GmbH mit den funktionsbestimmenden Kennwerten für den Einbau- und Langzeitzustand

Voraussetzung für die Aufbringung dieses Abdecksystems auf die Haldenkörper ist eine generelle Profilierung der Halden mit Abflachung der vorhandenen steilen Böschungen auf Neigungen um 1 : 2,5 (ca. 22°). Mit diesen dauerhaften Böschungsneigungen ist die geforderte geotechnische Langzeit-Standsicherheit für unterschiedliche Lastfälle nachgewiesen und gleichzeitig dem Minimierungsgebot der unumgänglichen Massenbewegungen von Haldenmaterial im Rahmen der Sanierungsarbeiten aus Strahlenschutzsicht [3] entsprochen worden.

Das Zweischicht-Abdecksystem wird durch den Aufbau von etwa 0,8 m mineralischem Unterboden als kombinierte Dämm-/Speicherschicht mit einer aufliegenden bzw. damit

verzahnten, ca. 0,2 m mächtigen humosen Oberbodenschicht charakterisiert. Die Standortverhältnisse erlauben den Verzicht auf eine hohe Dichtwirkung bezüglich Niederschlagsinfiltration und Radon-Exhalation, was sich in den Langzeit-Prognosewerten für die hydraulische Durchlässigkeit  $k_f$  in den Größenordnungen von etwa  $10^{-6}$  ...  $10^{-7}$  m/s für den mineralischen Unterboden und von ca.  $10^{-4}$  m/s für den humosen Oberboden widerspiegelt. Adäquat verhalten sich die Werte für die Gasdurchlässigkeit  $k_A$  (Abb. 3).

Mit dieser Schichtenabfolge und den dafür angesetzten bodenphysikalischen Kennwerten konnte konzeptionell die Erfüllung der mit der Haldenabdeckung verbundenen relevanten Sanierungsziele modelliert und eine gute Annäherung an die natürlichen Bodenprofile im Haldenumfeld erreicht werden. Diese Naturnähe ist ebenso eine Voraussetzung für die geforderte Langzeitstabilität der Haldenabdeckung über einen Zeitraum von  $\geq 200$  Jahren. Gleichzeitig fördert sie die Entwicklung einer stabilitäts- und verdunstungserhöhenden Begrünung (Aufforstung) bei Tolerierung der Durchwurzelung der Dämm-/Speicherschicht bis in das unterlagernde Haldenmaterial.

Die erforderlichen Materialqualitäten zur Erfüllung der notwendigen dämmenden Funktionen des Abdecksystems werden durch den Einsatz von lokal und regional verfügbaren Schluffen und Lehmen (Bodengruppen SU\*, UL, TL nach DIN 18 196) für den Aufbau des mineralischen Unterbodens vollkommen abgedeckt. Für die zu sanierende Haldenlandschaft am Standort Schlema-Alberoda werden in Summe etwa 3,0 Mio. m<sup>3</sup> mineralischer Unterboden natürlicher Herkunft benötigt.

In Ergänzung dazu soll der humose Oberboden vorrangig wasserleitende und –speichernde Funktionen übernehmen und damit maßgeblich zur Regulierung der Abflüsse der Niederschlagswässer und zur Steuerung der Bodenfeuchte im Abdecksystem beitragen. Weitere, sehr wichtige Funktionen des Oberbodens sind die Sicherung der Erosionsstabilität der Abdeckung sowie ihrer (Erst-)Begrünung. Die für die Abdeckzwecke geeigneten, fein- bis gemischtkörnigen Unterbodenmaterialien sind mittel bis hoch erosionsanfällig und müssen daher sofort nach ihrem Einbau auf der Halde dementsprechend geschützt werden. Dieses soll in erster Linie durch den aufgetragenen Oberboden in Verbindung mit einer rasch aufwachsenden Erstbegrünung erreicht werden.

Frühzeitig wurde in WISMUT das damit verbundene Problem der Beschaffung ausreichender Mengen von Abdeckmaterial allgemein und qualitativ hochwertigem Oberboden bzw. Kulturboden im speziellen erkannt. Ausgehend von zunächst 0,4 m, später etwa 0,2 m konzipierter Oberbodenmächtigkeit und einer insgesamt am Standort abzudeckenden Haldenmantelfläche von rund 385 ha bedeutet dies ein Volumen von ca. 1,54 bzw. 0,77 Mio. m<sup>3</sup>. Derartige Mengen an Kultur- bzw. Oberboden können nicht in dem Sinne wirtschaftlich und bedarfsgerecht über das natürlich Bodenangebot zur Verfügung gestellt werden. Daher wurde vom damaligen Sanierungsbetrieb Aue der WISMUT GmbH als Alternativlösung die Herstellung eines künstlichen Oberbodensubstrates/Kulturbodens ins Auge gefaßt. Das als Endprodukt beabsichtigte kompostähnliche Rekultivierungssubstrat sollte auf der Verwendung von im Territorium verfügbaren organischen und anorganischen Reststoffen basieren. Diese Variante bot gleichzeitig die Möglichkeit, dem Anliegen der umliegenden Landkreise nach einer wirtschaftlichen und sinnvollen Abfallentsorgung bzw. -verwertung entgegenzukommen.



### **3 Herstellung von künstlichem Oberbodensubstrat**

#### **3.1 Genehmigungsgrundlagen und Produktionszeitraum**

Zwischen 1991 und 1994 produzierte der Sanierungsbetrieb Aue auf der Grundlage von entsprechenden Genehmigungen des Landkreises Aue sowie der zuständigen Bergbehörde Chemnitz im Rahmen von mehreren klein- und großtechnischen Versuchen.

Ab 1995 erfolgte die Herstellung des Rekultivierungssubstrates auf der Basis einer bergrechtlichen Genehmigung zum „zeitlich befristeten Betrieb von Anlagen im Entsorgungs- und Recyclingzentrum zur Herstellung von Abdeckmaterial im Sinne § 2 (1) Ziffer 2 BbergG“ (Genehmigung vom 29. Dezember 1994). Zum 31. August 1996 wurde die Produktion eingestellt. Die Gründe dafür lagen zum einen in der Größenordnung der bereits produzierten Substratmenge unter Bezug auf eine sich anbahnende Veränderung der Grundkonzeption zum Haldenabdecksystem. Zum anderen fehlte es nach überwiegender Auffassung der beteiligten Aufsichts- und Genehmigungsbehörden an der Rechtfertigung der Weiterführung der Produktion auf WISMUT-Liegenschaften über das primäre Anliegen der WISMUT GmbH hinaus. Eine Weiterführung hätte vorrangig den Interesse Dritter gedient, im speziellen Fall den Interessen der umliegenden, entsorgungspflichtigen Landkreise.

Die notwendige Zwischenlagerung der produzierten Kulturbodenmaterialien auf den Plateauflächen der Halden 371/I und 371/II am Standort Schlema-Alberoda sowie auf der Luchsbachhalde am Standort Pöhla wurde zunächst durch die Strahlenschutzgenehmigung Nr. W/2033/96 des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung (SMU) vom 8. November 1996 geregelt mit Wirkungsdauer bis zum 31. Dezember 1999.

Die bis zum heutigen Tage andauernde Zwischenlagerung der verbliebenen Restmengen des Kulturboden- bzw. Rekultivierungssubstrates bezieht sich auf die danach beantragte Anschlussgenehmigung mit einer für den gesamten Haldensanierungsprozeß befristeten Gültigkeitsdauer.

#### **3.2 Produktionsprozeß**

Die Produktion und Zwischenlagerung des kompostähnlichen Kulturbodens ging unter Nutzung der Plateaus der Halden 371/I und 371/II am Standort Schlema-Alberoda vonstatten. Die verschiedenen technischen Anlagen waren wie folgt plaziert:

Halde 371/I - Holzaufbereitung mit Zwischenlager  
- Rotteflächen  
- Lagerfläche

Halde 371/II - Kompostplatz  
- Kulturboden-Produktionsanlage  
- Mischkomplex.

Insgesamt standen für die Lagerung aller Eingangsstoffe und Fertigprodukte sowie für die Anlagen der einzelnen Prozessstufen etwa 50.000 m<sup>2</sup> Fläche zur Verfügung. Davon entfielen ca. 1.000 m<sup>2</sup> auf den Kompostplatz und reichlich 13.000 m<sup>2</sup> auf die

Kulturboden-Produktionsanlage. Die letztgenannten Bereiche sowie die zugehörigen Verkehrswege wurden mit einer ca. 0,35 m starken Asphaltsschicht als Aufstandsfläche versehen.

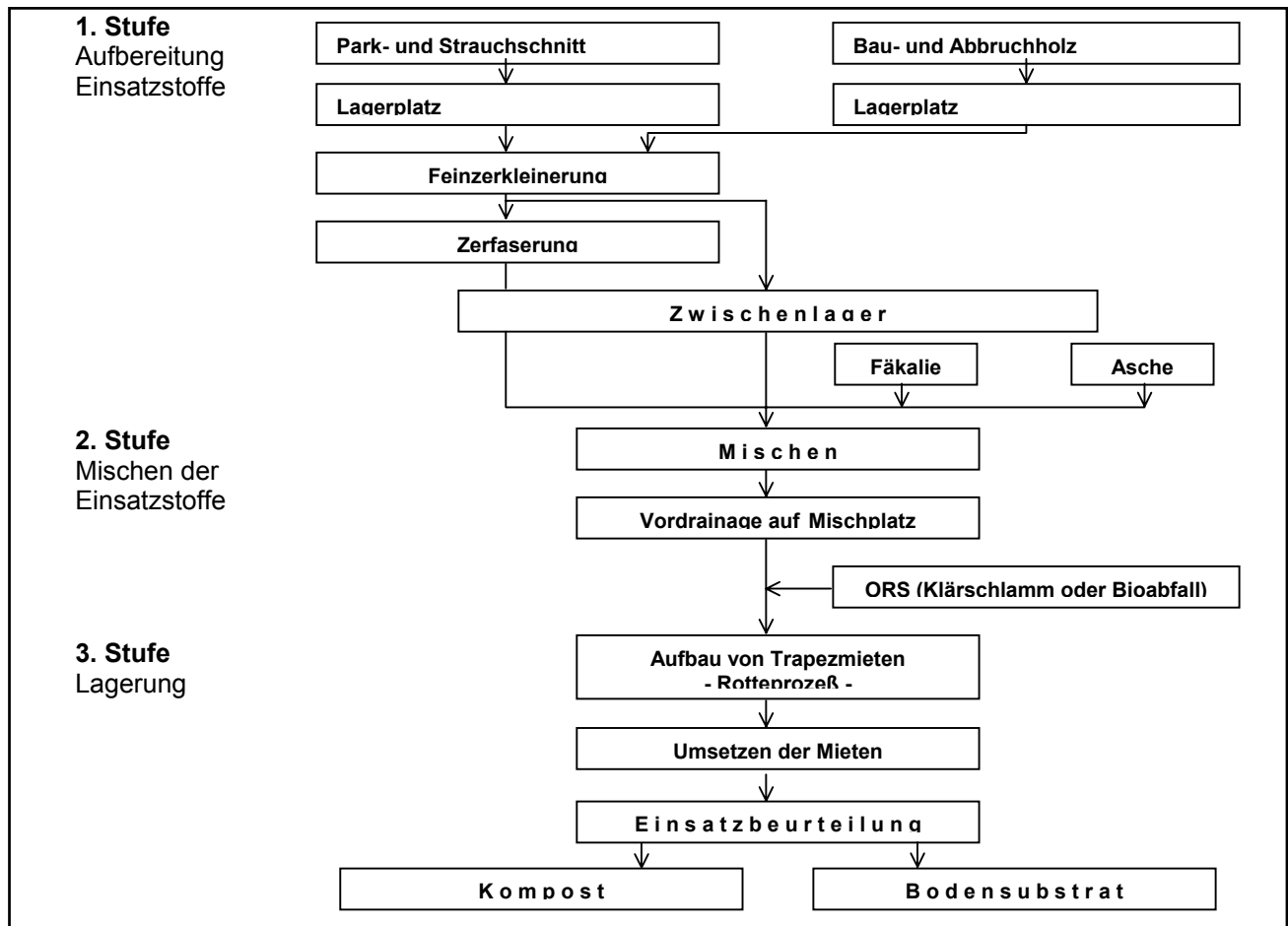
Die Zwischenlagerflächen bauten überwiegend auf vorhandenem Haldenmaterial auf. Dieses wurde mit einer etwa 0,2 m mächtigen, verdichteten Unterlage aus inertem Mineralboden und einer zusätzlichen, ca. 0,15 m dicken Schicht aus Bauschutt-Recyclingmaterial überzogen, welche der Ableitung entstehender Sickerwässer und als Fahrbahn dient.

Die Herstellung des Rekultivierungssubstrates basierte auf der Verwendung der folgenden, über den Betriebszeitraum in wechselnden Anteilen/Rezepturen und mit veränderten Technologien eingesetzten Rest- und Abfallstoffe:

- Fäkalien
- Klärschlämme und Klärschlammkomposte
- Aschen aus Industriebrand
- Altholz
- Garten- und Parkabfälle sowie Grasschnitt
- Bioabfall
- bindige Zuschlagstoffe wie Bodenaushub (Mineralboden).

Das Produktionsprinzip beruhte auf der adsorptiven Einbindung von Fäkalieninhaltsstoffen einschließlich deren flüssiger Phase in das alkalische Additiv Asche. Durch die Zugabe von geschredderten und gefaserten Holzabfällen wird das Adsorptionsverhalten günstig beeinflusst und außerdem eine Strukturverbesserung des Endproduktes erreicht. Da die verwendeten Additive mehrheitlich im pH-Bereich  $>10$  liegen, wird gleichzeitig eine Hygienisierung des Fäkalanteiles und die Desodorierung erreicht [4].

Der zum Ende des mehrjährigen Versuchs- und Produktionsprozesses angewandte Verfahrensablauf zur Herstellung des Kulturbodens/Rekultivierungssubstrates kann dem Schema in Abb. 4 entnommen werden.



**Abb. 4** Verfahrensprinzip zur Herstellung von Rekultivierungssubstrat

Danach wurden folgende wesentliche Verfahrensschritte unterschieden:

In der 1. Verarbeitungsstufe erfolgt die Annahme und Vorratshaltung der geprüften Einsatzstoffe sowie deren spezifische Aufarbeitung (Schreddern, Zerkleinern). Dann wurden die Einsatzstoffe zu einem rottefähigen Ansatz unter Einhaltung definierter Volumenverhältnisse konditioniert (2. Verarbeitungsstufe). Für einen optimalen Ansatz des sogenannten Grundgemisches sind die einzelnen Einsatzstoffe mit etwa folgenden Volumenanteilen zusammengeführt worden:

Fäkalie	ca. 28 Vol.-%
Asche	ca. 10 Vol.-%
Holz, geschreddert	ca. 50 Vol.-%
Holz, gefasert	ca. 12 Vol.-%.

Für die Mischung standen diskontinuierlich arbeitende Trommelmischfahrzeuge zur Verfügung. Die Grundmischung bzw. der Rotteansatz wurde anschließend zur Vordrainage von Sickerwasser für etwa 2 Tage auf dem Mischplatz aufgesetzt.

Zum Abschluß der 2. bzw. zum Beginn der 3. Verarbeitungsstufe ist diesem Rotteansatz ein vorgefertigtes organisches Rottesubstrat mit einem Volumenanteil von etwa 20 % (bezogen auf den entstehenden Gesamtansatz) zugesetzt worden. Dieser Verfahrensschritt war notwendig für die Initiierung des nachfolgenden Rotteprozesses

innerhalb der auf den Rotteflächen aufgesetzten Trapezmieten. Damit konnte ein ordnungsgemäßer Verlauf der in der 3. Verarbeitungsstufe erforderlichen Heißrottephase mit Temperaturen zwischen 55°C und 70°C über einen Zeitraum von mindestens 4 Wochen gewährleistet werden. In dieser Zeit war zwecks Homogenisierung des Rottevorganges ein mindestens einmaliges Umsetzen der Trapezmieten mittels Mietenumsetzer unumgänglich.

Der beschriebene Herstellungsprozeß des Kulturbodensubstrates wurde begleitet von dem parallel verlaufenden Verfahrensschritt der Bio- bzw. Klärschlammkompostierung. Der erzeugte Kompost diente als Rotteinitial bzw. -verbesserer und wurde – wie dargestellt – dem Mischsubstrat vor Beginn der 3. Verarbeitungsstufe zugegeben.

Alle Eingangsstoffe für die Kulturbodenerzeugung, der Verarbeitungsprozeß selbst wie auch der fertige Kulturboden unterlagen seitens der WISMUT GmbH bzw. über beauftragte Dritte einem Qualitätssicherungssystem, das stoff- und prozessorientierte Qualitätsanforderungen beinhaltete. Letztere basierten auf spezifischen Emissions- und Immissionsszenarien.

Ebenso fanden prozessbedingt Fragen der Arbeitssicherheit und Arbeitshygiene die entsprechende Beachtung.

### 3.3 Endprodukt

Insgesamt wurden im beschriebenen Produktionszeitraum etwa 250.000 m<sup>3</sup> kompostähnliches Kulturbodensubstrat hergestellt und zwischenabgelagert. Der durch Rotte und Nachrotte infolge der mehrjährigen Zwischenlagerung zu verzeichnende Substanzverlust führte nach marktscheiderischen Aufmaß von März 1997 letztlich zu einem verwendungsfähigen Volumen von etwa 225.000 m<sup>3</sup>.

Das erzeugte Material ist ausgehend von den eingesetzten Abfall- und Reststoffen durch einen großen Anteil an biologisch umgesetzter organischer Feinsubstanz, daneben aber auch durch einen relativ hohen Anteil an unverrotteten groben Holzresten gekennzeichnet [7].

Basierend auf der Korngrößenzusammensetzung lässt sich das Kulturbodensubstrat aus erdbautechnischer Sicht wie folgt charakterisieren [6]:

- sandiger, schwach schluffiger Humus mit Holzresten
- Bodenart nach DIN 4022/4023: H, s, u`
- Bodengruppe nach DIN 18 196: OH
- Bodenklasse nach DIN 18 300: Klasse 1.

Eine bodenkundliche Bewertung [6] ergibt die nachstehende Beschreibung:

- unvollständig kompostierte organische Abfälle mit hohem Holzanteil (ca. 30% org. Substanz)
- mineralische Komponente: schwach steiniger/grusiger/lehmiger Sand
- Bodenart nach BKA [AG Boden 1994]: Si2, Gr2, X2.

Nach Struktur und Textur waren damit gute Voraussetzungen für den Einsatz als Oberboden bzw. Oberbodenkomponente gegeben.

Im Ergebnis der externen Begutachtung [4] der für den Produktionszeitraum vorliegenden Untersuchungsergebnisse zur Qualität der Einsatzstoffe und der erzeugten Substratchargen wurde jedoch summarisch festgestellt, daß dem großflächigen Einsatz dieses Kulturbodensubstrates zu Haldenabdeckzwecken aus Gründen der überhöhten Nährstoff- und Schwermetallgehalte (Tabelle 2) und unter Bezug auf die damals gültige Abdeckkonzeption (0,6 m mineralischer Unterboden, 0,4 m ! Kulturboden) nicht zugestimmt werden kann.

Neben befürchteten unzulässigen Schadstoffanreicherungen in den Oberflächen- und hypodermisch abfließenden Wässern direkt von bzw. aus der Haldenabdeckung wurden auch negative Wechselwirkungen der perkolierenden Sickerwässer mit dem Haldengestein bzw. mit dem sonstigen Haldeninventar angenommen.

**Tab. 2** Vergleich von Analysenwerten und Grenzwerten der Nähr- und Schadstoffgehalte im Kulturbodensubstrat nach [4]

Parameter	Einheit	Untersuchungsergebnisse				Vergleichswerte
		Wismut-1 <sup>1)</sup>	BiLaCon <sup>2)</sup>	Universität Leipzig		LABO-4 <sup>3)</sup>
				KB frisch	KB gelagert	
Stickstoff	kg/ha	1,309				
Phosphat	kg/ha	4,408				
Kaliumoxid	kg/ha	8,942				
Cadmium	mg/kg	5,4	5,4	8	2	0,9
Chrom	mg/kg	45,4	45,4	53	35	30,0
Kupfer	mg/kg	93,6	93,6	98	62	34,0
Nickel	mg/kg	26,2	26,2	65	40	19,0
Blei	mg/kg	310,0	310,0	768	531	184,0
Zink	mg/kg	1266,0	1270,0	1920	1560	169,0
Quecksilber	mg/kg	1,5	1,6	n. b.	n. b.	0,26

1) Ergänzungsunterlagen der WISMUT GmbH zur Nutzung des Haldenkomplexes 371 des Sanierungsbetriebes Aue zum Betrieb von Anlagen zur Herstellung von Abdeckmaterial 19.07.1995

2) Institut für Biotechnologie, Laboranalytik und Consulting GmbH. Bewertung der Ergebnisse zur Untersuchung von Kulturböden des Sanierungsbetriebes Aue als abdeckmaterial für Halden unter Einbeziehung von Referenzböden und natürlichen Böden. 20.07.1995

3) Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO). Heft 4: Hintergrund- und Referenzwerte für Böden. 1995. Hintergrundwerte für Böden in Sachsen.

Empfohlen wurde die Durchführung von Feldversuchen (Mindestdauer 1 Jahr) an zwischengelagerten Kulturbodenmieten mit dem Ziel, Lagerungszeiten für das Substrat zu ermitteln, nach deren Ablauf die Nährstoffgehalte und gegebenenfalls auch die Schwermetallgehalte auf ein tolerierbares Maß reduziert werden können. Gleichzeitig wurde auf die Notwendigkeit der Optimierung des für den Standort Schlema-Alberoda bis dato konzipierten Abdecksystems hingewiesen.

Von Seiten WISMUT wurde diesen Empfehlungen und Hinweisen grundsätzlich gefolgt. Sie sind jedoch in Anbetracht der internen Zeitplanung für das Gesamt-Sanierungsgeschehen bezüglich der Haldenaufschüttungen in modifizierter Form in den folgenden Monaten und Jahren umgesetzt worden.



Zunächst wurden von November 1996 bis April 1997 umfangreiche Beprobungen an den nun z.T. schon mehrjährig zwischengelagerten Kulturbodenmieten durchgeführt und breit angelegte Feststoff- und Eluatuntersuchungen für eine aktuelle Istzustandsanalyse des Rottesubstrates durch das maßgeblich in den Bearbeitungsprozeß einbezogene Institut für Biotechnologie, Laboranalytik und Consulting Stollberg realisiert [5].

Auf diesen Ergebnissen aufbauend konnte durch das von WISMUT zwischenzeitlich beauftragte Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde ein für die angehäuften Substratchargen repräsentatives und somit für die Durchführung der beabsichtigten Feldversuche geeignetes Prüfsubstrat ausgewählt werden. Durch Medianbildung zu den Daten aus den vorliegenden Mischproben zu den Einzelmieten (Mietenvolumen jeweils >5.000 m<sup>3</sup>) wurden charakteristische Nähr- und Schadstoffprofile ermittelt. Unter Bezug auf die damit repräsentierten Mengenanteile wurde letztendlich das in der Miete „Waldstraße III“ Meßpunkt (MP) 15 abgelagerte Rekultivierungssubstrat (Tabelle 3) vorgeschlagen und bestätigt.

Etwa zeitgleich wurde eine Expertise in Form einer Studie zur grundsätzlichen Darstellung und Prognostizierung der zeitlichen Veränderlichkeit der relevanten bodenphysikalisch/-mechanischen Bodenkennwerte zur diesbezüglichen Charakterisierung von Einbau-, Interims- und Langzeitzustand der Abdeckung [5] in Auftrag gegeben. Wesentlicher Inhalt war die umfassende bodenphysikalische Kennzeichnung und Untersuchung der vorgesehenen Abdeckmaterialien zum Aufbau von Unter- und Oberboden in purer wie auch gemischter Form unter betont zeitlichen Aspekten. Hieraus resultierten u.a. die notwendigen Erkenntnisse zu einem aus boden- wie auch hydrophysikalischer Sicht stabilen und im Sinne der Sanierungszielstellungen wirksamen Oberboden durch die Mischung von Kulturboden/Rekultivierungssubstrat und mineralischem Unterbodenmaterial etwa im Volumenverhältnis 1 : 1 mit dem Ergebnis eines Rekultivierungsmischsubstrates (RMS). Gleichzeitig bildeten die erhaltenen, laborativ ermittelten wie auch aus Expertensicht prognostizierten Bodenkennwerte die Grundlage für die Optimierungsbetrachtungen zum Haldenabdecksystem in [3].

**Tab. 3** Auswahl eines für das Gesamt-Mietenvolumen repräsentativen Rekultivierungssubstrates für die geplanten Feldversuche auf der Halde 371/II

		<b>17 größte Mieten</b> Indizes 3, 4, 5, 6, 10-12, 18, 21, 26-28, 47-51 Volumen ca. 172.130 m <sup>3</sup>			<b>Mieten</b> Indizes 3, 5, 6, 12 Vol. ca. 58.110 m <sup>3</sup>	<b>Miete Waldstraße III</b> Index 5 Vol. ca. 8700 m <sup>3</sup>	
		<b>Max</b>	<b>Median</b>	<b>Min</b>	<b>Median</b>	<b>Median</b>	<b>MP 15</b>
Ph-Wert	(CaCl <sub>2</sub> )	8,0	<b>7,5</b>	7,4	7,5	7,5	<b>7,4</b>
TM	Masse-%	62	<b>52</b>	46	50	55	<b>57</b>
EOX	mg/kg	5	<b>3</b>	2	2	2	<b>2</b>
MKW	mg/kg	630	<b>433</b>	217	410	360	<b>340</b>
BTEX	mg/kg	1,6	<b>0,2</b>	0,1	0,17	<0,1	<b>&lt;0,1</b>
LHKW	mg/kg	0,0	<b>&lt;0,1</b>	0,0	<0,1	<0,1	<b>&lt;0,1</b>
PAK	mg/kg	25	<b>15</b>	5	14	19	<b>28</b>
PCB	mg/kg	4,4	<b>0,1</b>	0,0	0,09	0,04	<b>0,05</b>
PCP	mg/kg	1,7	<b>&lt;0,05</b>	1,7	<0,05	<0,05	<b>&lt;0,05</b>
Arsen	KW, mg/kg	117	<b>34</b>	18	27	27	<b>25</b>
Blei	KW, mg/kg	640	<b>290</b>	147	265	350	<b>350</b>
Cadmium	KW, mg/kg	7,2	<b>3,4</b>	0,8	3,8	5	<b>5</b>
Chrom	KW, mg/kg	93	<b>74</b>	51	71	87	<b>99</b>
Kupfer	KW, mg/kg	1277	<b>167</b>	55	150	160	<b>190</b>
Nickel	KW, mg/kg	1142	<b>51</b>	31	51	61	<b>64</b>

Quecksilber	KW,mg/kg	1,2	<b>0,5</b>	0,3	0,5	0,4	<b>0,4</b>
Thallium	KW,mg/kg	2,4	<b>&lt;1</b>	2,4	<1	<1	<b>&lt;1</b>
Zink	KW,mg/kg	2167	<b>1127</b>	470	1100	1100	<b>1100</b>
Cyanik	mg/kg	2,3	<b>1,8</b>	0,5	1,6	1,4	<b>1</b>
pH-Wert	Eluat**	7,7	<b>7,5</b>	7,2	7,5	7,5	<b>7,7</b>
EC	µS/cm	2117	<b>1553</b>	2	1720	1820	<b>1640</b>
Chlorid	mg/l Eluat	100	<b>52</b>	18	48	77	<b>50</b>
Sulfat	mg/l Eluat	1076	<b>527</b>	238	470	714	<b>633</b>
Cyanid	mg/l Eluat	13	<b>&lt;10</b>	12	<10	10	<b>&lt;10</b>
Phenolindex	mg/l Eluat	23	<b>14</b>	12	10	<10	<b>&lt;10</b>
Arsen	mg/l Eluat	65	<b>8</b>	4	12	6	<b>6</b>
Blei	mg/l Eluat	86	<b>13</b>	5	11	7	<b>7</b>
Cadmium	mg/l Eluat	1,9	<b>0,5</b>	0,3	0,3	0,3	<b>0,34</b>
Chrom	mg/l Eluat	62	<b>26</b>	16	24	19	<b>22</b>
Kupfer	mg/l Eluat	159	<b>31</b>	14	27	36	<b>36</b>
Nickel	mg/l Eluat	112	<b>55</b>	26	37	36	<b>40</b>
Quecksilber	mg/l Eluat	0,0	<b>&lt;0,5</b>	0,0	<0,5	<0,5	<b>&lt;0,5</b>
Thallium	mg/l Eluat	0,0	<b>&lt;2</b>	0,0	<2	<2	<b>&lt;2</b>
Zink	mg/l Eluat	302	<b>91</b>	46	98	60	<b>60</b>
N <sub>t</sub>	g/kg	8,0	<b>2,5</b>	0,5	2,3	1,9	<b>1,5</b>
K <sub>2</sub> O	KW,g/kg	23,9	<b>4,1</b>	2,7	4,4	3,7	<b>3,5</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	g/kg	6,7	<b>4,3</b>	2,5	4,1	3,3	<b>3,3</b>
CaO	KW,g/kg	184	<b>65</b>	38	67	77	<b>80</b>
bwSt	%	8,8	<b>7,8</b>	3,1	7,4	8,3	<b>8,5</b>
MgO	KW,g/kg	36	<b>15</b>	7	14	16	<b>18</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	57	<b>18</b>	0,5	31	16	<b>11</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	5,4	<b>1,7</b>	0,5	0,7	0,9	<b>&lt;0,5</b>
Rottegrad		5	<b>5</b>	5	5	5	<b>5</b>
Rohdichte	g/l	1120	<b>890</b>	723	915	890	<b>940</b>
Pflanzenv 50	%v.Kontr.	142	<b>100</b>	79	100	100	<b>109</b>
Pflanzenv 100	%v.Kontr.	97	<b>78</b>	58	77	91	<b>93</b>
Glühverlust	Masse-%	47	<b>36</b>	28	37	32	<b>28</b>
TOC	Eluat, mg/l	129	<b>35</b>	16	59	42	<b>11</b>
Salzgehalt	gKCl/IFS	5,9	<b>3,5</b>	2,5	3,5	4,2	<b>4,3</b>
Keimtest 100	%v.Kontr.	137	<b>116</b>	83	117	135	<b>135</b>
Keimtest 50	%v.Kontr.	140	<b>117</b>	114	118	141	<b>138</b>
Leucht bacterien	%Hemmung	39	<b>18</b>	7	18	13	<b>13</b>
Koloniezahl	30°C,KZ/gFS	3,9E+08	<b>5,5E+07</b>	4,8E+06	4,1E+07	4,8E+06	<b>4,9E+06</b>

\* Königswasseraufschluß (DIN 38 414 - S7)

\*\* Eluat (DIN 38 414 - S4)

## 4 Feldversuche mit dem Rekultivierungssubstrat

### 4.1 Stoffliche und wasserhaushaltliche Felduntersuchungen

Mit der Strahlenschutzgenehmigung Nr. W/2028/96 des SMU vom 17. Juni 1996 wurde WISMUT die Genehmigung erteilt, das hergestellte Rekultivierungssubstrat in einer Mächtigkeit von 0,1 m zu Freilandversuchen auf der Halde 371/II einzusetzen.

Die daraufhin noch in 1996 in Eigenregie WISMUT eingerichteten Feldversuchsflächen auf den Böschungen unterhalb der Berme 19 erfuhren in Übereinkunft mit dem SMU eine deutliche Erweiterung durch Einrichtung einer Reihe zusätzlicher Lysimeter auf der

Böschung unterhalb der Berme 23 im gleichen Standortbereich. Die neuen Lysimeter wurden dabei konsequent auf das neue Abdeckkonzept (0,8 m Unterboden, 0,2 m Oberboden) mit dem oben angeführten Rekultivierungsmischsubstrat als Oberbodenschicht ausgerichtet.

Entsprechend Forderung des SMU erfolgte die Vorbereitung der Feldversucherweiterung, die Durchführung und die wissenschaftliche Begleitung durch einen externen Sachverständigen. Bezug nehmend auf die bisherige Zusammenarbeit und die spezifischen, sachbezogenen Erfahrungen zur Thematik Lysimeterbetrieb wurde dafür das bereits erwähnte Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde ausgewählt und vertraglich gebunden.

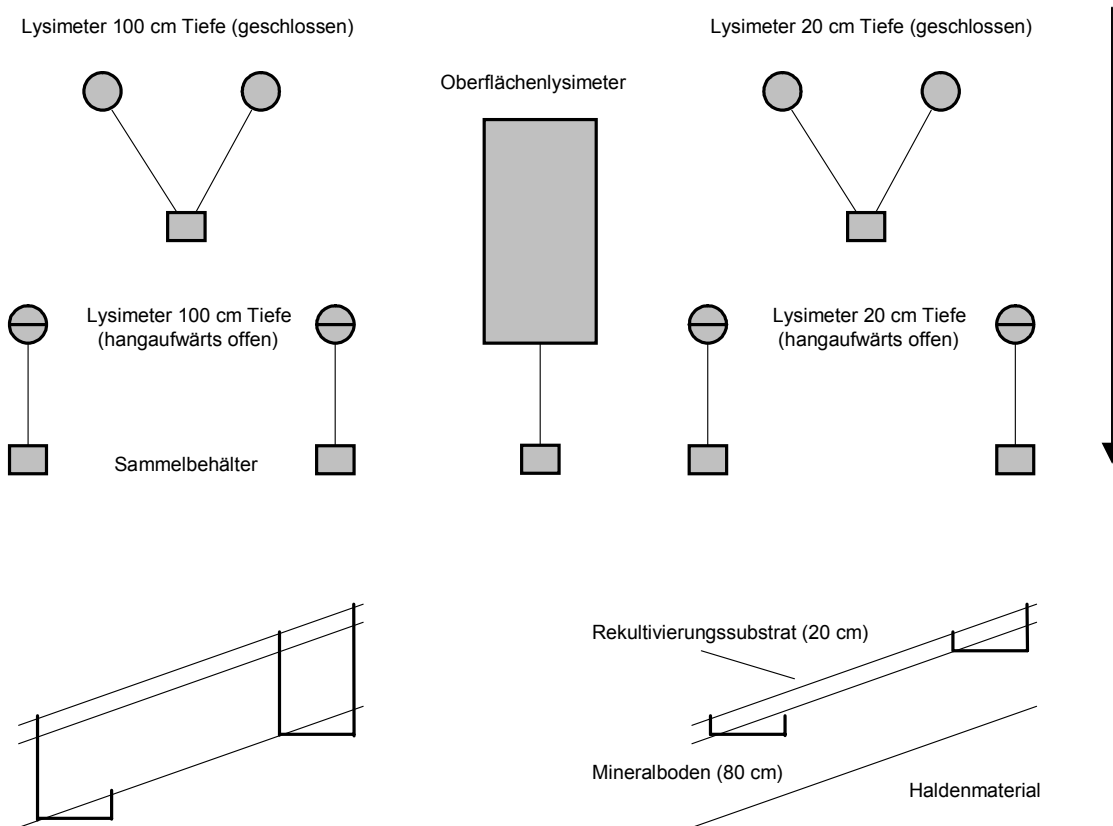
Das generelle Ziel der Lysimeter-Feldversuche bestand im exemplarischen Nachweis der Umweltverträglichkeit des Rekultivierungssubstrates als Teilkomponente des herzustellenden Oberbodens der geplanten Zweischicht-Abdeckung. Darüber hinaus sollten – soweit als möglich – realisierbare und genehmigungsfähige Einbau- und Qualitätssicherungskriterien erarbeitet werden.

Die relevanten Teilaufgabenstellungen für den zunächst auf ein Jahr begrenzten Lysimeterbetrieb lassen sich wie folgt umreißen:

- Klärung des Wasserhaushalts des Abdecksystems, auch unter geomechanischem Aspekt (Auftreten von stabilitätsgefährdenden Oberflächen- und Lateralabflüssen)
- Untersuchungen zu den hydrochemischen Eigenschaften der Einzelschichten und des Abdecksystems sowie zu möglichen Wechselwirkungen mit Haldengestein/-untergrund inklusive der Stofffrachten
- Kennzeichnung der bodenphysikalisch/-mechanischen Eigenschaften der Einzelschichten und des Abdecksystems
- Untersuchungen zum Pflanzenwachstum inklusive der Durchwurzelung.

In Vorbereitung des Lysimetereinbaues wurden im Sommer 1997 auf der Halde 371/II zwei in Summe ca. 0,2 ha große Haldenböschungflächen unterhalb der Berme 23 mit NE- (ca. 60 m Breite und 25 m Länge) und SE-Exposition (ca. 20 m Breite und 18 m Länge) im Neigungsverhältnis 1:2,5 profiliert und anschließend mit ca. 0,80 m lehmigem Mineralboden überzogen (zweilagiger Einbau mittels Planierdrape). Hieran schloß sich der Einbau der unterschiedlichen Lysimeter an, der mit dem Aufbringen des vorgefertigten Rekultivierungsmischsubstrates in einer Mächtigkeit von ca. 0,20 m beendet wurde. Auf der NE-exponierten Versuchsfläche blieb jedoch ein Teilbereich ohne Rekultivierungsmischsubstrat-Auftrag im Sinne einer Einschicht-Mineralbodenabdeckung, die vorrangig zu Vergleichszwecken für die wasserhaushaltlichen, hydrochemischen und pflanzenphysiologischen Untersuchungen benötigt wurde.

Die gewählte Lysimeteranordnung sollte eine schichtbezogene Wasserhaushaltsbilanzierung ermöglichen. Hierzu wurden unter dem Rekultivierungsmischsubstrat bzw. unter dem Mineralboden jeweils 2 kreisförmige, geschlossene bzw. hangaufwärts offene, nicht wägbare HDPE-Lysimeter (1 m Innendurchmesser) installiert [8]. Hinzu kamen für die NE-exponierten Einschicht- und Zweischicht-Abdeckvarianten je ein rechteckiges Oberflächenlysimeter (Abb. 5).



**Abb. 5** Lysimeteranordnung am Beispiel der NE-exponierten 2-Schicht-Abdeckung (schematisch nach [8])

Bereits nach einem Jahr Lysimeterbetrieb konnte im Rahmen des geforderten umfassenden Abschlußberichtes [9] gezeigt werden, daß neben den positiven Effekten des Rekultivierungsmischsubstrates als Oberboden für den Wasserhaushalt des Abdecksystems auch ein umweltverträglicher Einsatz des erzeugten Rekultivierungssubstrates als Oberbodenkomponente nachzuweisen war.

Neben der bodenphysikalisch-/mechanischen Charakterisierung der Abdeckschichten erfolgte dazu sowohl zu Versuchsbeginn (September 1997) als auch zum definierten Versuchsende (August 1998) auf allen Versuchsfeldern eine umfassende Beprobung und bodenchemische Analyse der eingesetzten Substrate. Dies diente außer der Gewinnung von Datenmaterial zur Nährstoffversorgung der Pflanzen sowie zur Berechnung des Schadstofftransfers Boden-Pflanze vor allem auch der Kennzeichnung der Mobilisierungs- und Auswaschungsprozesse im organogenen Oberboden einerseits wie auch des Immobilisierungspotentials (Filter-, Puffer-, Adsorptionsvermögen) des mineralischen Unterbodens andererseits. Es wurden somit die zeitlichen Verläufe ausgehend von den Nähr- und Schadstoffgehalten der Substrate zu Versuchsbeginn erfaßt.

Zur Beurteilung der Auswirkungen des Rekultivierungsmischsubstrates auf die Güteentwicklung von Oberflächenwasser, Interflow und Sickerwasser wurden aus allen installierten Lysimetern sickerwassermengenproportionale Monats-Mischproben gewonnen. Parallel zu den monatlichen Niederschlagsproben sind diese auf ihre Gehalte an Makronährstoffen sowie an relevanten anorganischen und organischen Schadstoffen analysiert worden.

Zusammenfassend konnten daher vom Auftragnehmer nach vorläufigem Versuchsabschluß Ende August 1998 die nachstehenden Erkenntnisse und Schlußfolgerungen in Bezug auf die Untersuchungsziele formuliert werden:

#### Ergebnisse der bodenphysikalisch/-mechanischen Untersuchungen

Die Herstellung eines standsicheren Zweischicht-Abdecksystems auf den 1:2,5 geneigten Haldenböschungen ist möglich. Die mineralischen Unterbodenmaterialien der Dämmschicht weisen eine relativ geringe nutzbare Feldkapazität - was in Verbindung mit der sehr langsamen Wasserversickerung in Trockenperioden zu einer Limitierung der pflanzenverfügbaren Wasserbestände führt - sowie eine ausgeprägte Erosionsanfälligkeit auf. Daher ist für eine erfolgreiche Erstbegrünung und eine dauerhaft erosions sichere Böschungsgestaltung der oberflächige Auftrag einer nicht zu geringmächtigen, bewuchsfördernden Deckschicht (humoser Oberboden) erforderlich.

Das ziemlich locker eingebaute Rekultivierungsmischsubstrat ( $D_{Pr}$  67 %...78 %) ist als geomechanisch standsicher zu charakterisieren. Die bereits in der ersten Vegetationsperiode festgestellte, intensive Durchwurzelung des Rekultivierungsmischsubstrates aufgrund der lockeren Lagerung und das Eindringen der Wurzeln in die Dämmschicht, teilweise bis in das Haldenmaterial, lassen eine weitere Erhöhung der Standsicherheit erwarten.

Niederschlagswasser wird auch bei Starkniederschlägen vom Oberboden sehr schnell aufgenommen und es kommt auch aufgrund der hydraulischen Durchlässigkeit in der Größenordnung von  $k_f \geq 10^{-4}$  m/s zu einer raschen Auffüllung der Feldkapazität.

#### Ergebnisse der Wasserhaushaltsuntersuchungen

Die mit dem Rekultivierungsmischsubstrat abgedeckte Versuchsvariante zeigt einen Oberflächenwasserabfluß von ca. 2,1 % des Jahresniederschlages P im Vergleich zu etwa 15,6 % bei der rein mineralischen Einschicht-Abdeckung.

Der laterale Abfluß im humosen Oberboden liegt bei weniger als 4 % von P. Die erwünschte Niederschlagsinfiltration in die mineralische Dämmschicht ist mit ca. 27 % von allen Versuchsvarianten die höchste, hingegen die Summe aus Oberflächenwasserabfluß, lateralem Abfluß und Sickerwasseranteil bei vergleichbarer Böschungsexposition jedoch mit rund 29 % von P am geringsten.

Die Versickerung in den Haldenkörper beträgt im Mittel des Versuchsjahres rund 23 % von P für das NE-exponierte und nur etwa 13 % von P für das SE-exponierte Versuchsfeld.

Damit stellen sich die Auswirkungen des Auftrages des Rekultivierungsmischsubstrates auf den Wasserhaushalt von Abdecksystem und Halde als eindeutig positiv heraus.

#### Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen

Die mineralische Komponente des Abdecksystems ist als kontaminationsfrei und mit Ausnahme von Magnesium wenig nährstoffreich mit auffällig geringen pflanzenverfügbaren Stickstoff- und Phosphorgehalten zu charakterisieren. Die ermittelte



Kationenaustauschkapazität sowie die Boden-pH-Werte von 7,2 bis 7,4 weisen auf ein erhöhtes Sorptionsvermögen der Dämmschicht hin.

Für das aufgetragene Rekultivierungsmischsubstrat kann bezüglich der Nährstoffgehalte im Ausgangszustand eingeschätzt werden, daß dieses mit Ausnahme von Stickstoff nährstoffreich ist ( $P_{CAL}$ ,  $K_{CAL}$ ,  $Mg_{CAL}$ ), die Nährstoffe aber deutlich unter den Orientierungswerten für substratfähige Komposte nach LAGA-Merkblatt M10 liegen.

Hinsichtlich der Schadstoffgehalte wird deutlich, daß die Schwermetall-, Arsen-, Radium-, AOX-, PAK- und PCB-Gehalte generell die Grenzwerte der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 15.04.1992) sowie die Interventionswerte (I-Werte) der Niederländischen Liste unterschreiten und ausnahmslos in der unteren Hälfte des des nutzungsbezogenen Toleranzwert-Bereiches der EIKMANN-KLOKE-Liste Deutschland (1993) liegen.

Ausgehend von den Nähr- und Schadstoffgehalten des Rekultivierungsmischsubstrates sowie unter Berücksichtigung des Immobilisationspotentials der mineralischen Dämmschicht und der niedrigen Versickerungsraten wird eingeschätzt, daß das Mischsubstrat zur Haldenabdeckung bei einer Schichtmächtigkeit von etwa 0,20 m geeignet ist.

#### Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen

Die mengenmäßig unbedeutenden Oberflächenwässer weisen bis auf geringe Ausnahmen für den überwiegenden Teil der untersuchten Spezies ( $NO_3^-$ , Ca, Mg, Cl-,  $SO_4^{2-}$ , U, R, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, Cd, Hg, und AOX) unbedenkliche Werte im Trinkwasserqualitätsbereich auf.

Entsprechend der fortschreitenden Auswaschung leicht löslicher Salze nehmen die anfänglich hohen Salzkonzentrationen der Sickerwässer aus dem Rekultivierungsmischsubstrat mit dominierenden Ca-, Mg- und Sulfatanteilen bereits in den ersten Monaten deutlich ab.

Bezüglich der Nährstoffgehalte N, P und K im Sickerwasser wird festgestellt, daß mit Ausnahme von Kalium die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung bzw. die zulässigen Höchstkonzentrationen (ZHK) der EG-Wasserqualitätsnorm 80/778/EWG im Mittel (Median) des Versuchszeitraumes nicht überschritten werden.

Hinsichtlich der untersuchten anorganischen Schadstoffe Pb, Zn, Cr, Cd, Ni, Cu, Hg und As können keine Kontaminationen der Sickerwässer durch das organogene Substrat nachgewiesen werden. Die Depositionseinträge sind z.T. höher als die aus der Mischsubstratschicht ausgewaschenen Schadstoffmengen (z.B. Zn). Auch für den Summenparameter AOX werden nur in Einzelfällen geringfügig über dem DVGW-Richtwert liegende Gehalte gemessen.

Die aus radiochemischen Aspekten interessierenden U- und  $^{226}Ra$ -Konzentrationen sind ebenfalls sehr niedrig und liegen über den gesamten Versuchszeitraum deutlich unter den Grenzwerten der Verordnung über Atomsicherheit und Strahlenschutz (VOAS, 1984) bzw. den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (1991).

Unter Bezug auf die in Abb. 6 aufgeführten Verordnungen und Richtlinien mit entsprechenden Grenzwertfestlegungen kann zusammenfassend festgestellt werden, daß die Überdeckung der mineralischen Dämmschicht mit dem Rekultivierungsmischsubstrat intermediär zu erhöhten K-, Ca-, Mg-, DOC- und Sulfat-Konzentrationen in den Perkolaten des Abdecksystems geführt hat. Bedingt durch das hohe Adsorptionsvermögen der mineralischen Dämmschicht zeigt jedoch das direkt in den Haldenkörper perkolierende Sickerwasser nur noch geringfügig erhöhte Ca-, COC- und AOX-Werte sowie deutlich erhöhte Sulfat-Konzentrationen. Da die Sickerwässer aus der Vergleichsvariante Einschicht-Mineralabdeckung aber auch verhältnismäßig hohe Konzentrationen bei den genannten Spezies aufweisen, kann auf der Grundlage der verfügbaren Ergebnisse kein spezifischer negativer Einfluß des aufgebrachten Rekultivierungsmischsubstrates auf die Sickerwasserqualität des Abdecksystems abgeleitet werden.

- a) Grenzwert nach Trinkwasserverordnung (TrinkV, 5.12.1990)
- b) Zulässige Höchstkonzentrationen nach EG-Wasserqualitätsnorm 80/778/EWG (15.7.1980)
- c) Guideline for drinking water quality; World Health Organization (WHO); Genf 1984
- d) Richtwert nach DVGW-Arbeitsblatt W 251 für Oberflächenwasser zur Trinkwassergewinnung
- e) Verordnung über Atomsicherheit und Strahlenschutz (VoAS) 1984
- f) Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1991
- g) Leitfaden Bodensanierung Niederlande, Grundwasser-Hintergrundwerte für Lehmgebiete
- h) Niederländische Liste 1994, Grundwasser-Interventionswert

**Abb. 6** Relevante Richtlinien und Verordnungen zur Bewertung der für die Oberflächen- und Sickerwässer ermittelten hydrochemischen Parameter in [9]

Im Hinblick auf die aus ökotoxikologischer Sicht bedeutsamen Stoffausträge wird festgestellt, daß entsprechend dem hohen Immobilisierungsgrad des mineralischen Unterbodens ein beträchtlicher Teil der aus dem organogenen Oberboden ausgewaschenen und mit den Sickerwässern infiltrierten Stofffracht bereits in den oberen Schichten der mineralischen Dämmschicht fixiert wird (P, K, Mg). Es gelangt nur ein verhältnismäßig geringer Anteil nach Perkolations durch das Abdecksystem in den Haldenkörper.

#### Ergebnisse zu den Pflanzenuntersuchungen

Das aufgebrachte Rekultivierungsmischsubstrat fördert im Vergleich zur Einschicht-Mineralbodenabdeckung aufgrund der bodenphysikalischen Ausgangsbedingungen sowie in Bezug auf die Nährstoffverhältnisse eindeutig das Pflanzenwachstum, wobei

im Frühjahr auf der SE- und im Sommer auf der NE-exponierten Prüffläche jeweils deutlich höhere Erträge erhalten wurden.

Die Durchwurzelung des Oberbodens kann nach der ersten Vegetationsperiode als sehr gut eingeschätzt werden. Im Gegensatz zur unabgedeckten mineralischen Dämmschicht, in der die maximale Wurzeltiefe ca. 0,40 m beträgt, erreichen auf der NE-exponierten Versuchsfläche einzelne Wurzeln bereits eine Tiefe von 0,7 ... 0,8 m, auf der SE-exponierten Fläche – begünstigt durch die hier allgemein besseren Wuchsbedingungen – vor allem Luzernewurzeln sogar das unterlagernde Haldengestein.

Eine Akkumulation von Schwermetallen (Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb) sowie Arsen im Pflanzenmaterial hat nicht stattgefunden [9].

Inzwischen sind die Ergebnisse des 1. Versuchsjahres und die damit aufgezeigten positiven Tendenzen im Sinne der Verwendungsfähigkeit des organischen Rekultivierungssubstrates als Komponente eines humosen Oberbodens durch eine 6-jährige Versuchsreihe (Januar 1998 - Dezember 2003) noch detaillierter belegt worden.

Aus Gründen des Sanierungsfortschrittes am Standort Schlema-Alberoda musste die Hanglysimeteranlage auf der Halde 371/II wegen anstehender Profilierungsarbeiten zur Schaffung der Endkontur im März 2004 komplett rückgebaut werden. Es ist jedoch im gleichen Jahr gelungen, auf der in ca. 2 km Luftlinie von diesem Standort entfernt gelegenen Halde 366 einen Teil der Anlage im Zuge der Endabdeckung mit dem Zweischicht-Abdecksystem in einer SW-Exposition zu rekonstruieren.

## **4.2 Feldversuche zur Abdecktechnologie**

Aufbauend auf den sich abzeichnenden Erkenntnissen zu den stofflichen Eigenschaften des neukonzipierten Zweischicht-Abdecksystems waren ebenbürtig die Fragen zum großflächigen Einbau der geplanten Haldenabdeckungen zu klären. Diese bezogen sich zum einen auf die Entwicklung einer praktikablen und kostengünstigen Abdecktechnologie unter praxisnahen Bedingungen, d.h. auf den Einsatz von geeigneten Erdbaumaschinen wie auch von Spezialtechnik zum Auftrag der vorausgewählten Abdeckmaterialien und zum qualitätsgerechten Einzelschichteinbau von Unter- und Oberboden. Zum anderen war die Absicherung der für die Erfüllung der unterschiedlichen Sanierungsziele erforderlichen bodenphysikalischen Kennwert-Größenordnungen unter Praxisbedingungen nachzuweisen.

Zu diesem Zweck sollten diverse natürliche Unterbodensubstrate und Technologien zum Einbau der Dämmschicht sowie verschiedene Geräte und Verfahrensweisen zum Auftrags des organischen Rekultivierungssubstrates (ORS) bzw. zur nachfolgenden Einmischung des ORS in die obere Lage der Dämmschicht geprüft werden.

Im II. und III. Quartal des Jahres 1998 wurden von Wismut die Versuchsprogramme für die Durchführung von dementsprechenden Feldversuchen auf der bereits mit Böschungsneigungen 1 : 2,5 komplett profilierten Halde Borbachdamm erarbeitet und mit den zuständigen Genehmigungsbehörden abgestimmt. Das Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde wurde dabei mit der fachgutachterlichen Begleitung aller Prozesse der Oberbodenbearbeitung beauftragt.

Die stofflichen Grundlagen der Feldversuche bildeten 3 mineralische Unterbodenvarianten aus dem Erzgebirgsvorland, die das in [3] diesbezüglich als verwendungsfähig definierte Kornverteilungsspektrum repräsentierten, sowie das vorausgewählte Rekultivierungssubstrat.

Beginnend mit einer Verdichtungskontrolle und partiellen Nachverdichtung des Haldenmantels wurden zwischen dem 11. August und dem 9. November 1998 zwölf separate Versuchsfelder (3 Unterbodenvarianten x 4 Einbautechnologien) zum Auftrag des Unterbodens und zur In-situ-Herstellung des Rekultivierungsmischsubstrates als Oberboden abgearbeitet. Begleitet wurden die technischen Arbeiten von einem sehr umfangreichen Beprobungs- und Analytikprogramm hinsichtlich Eingangskontrolle der Abdeckmaterialien, des vorgabegerechten Einbaues der Einzelschichten sowie zur abschließenden bodenphysikalischen und bodenkundlichen Charakterisierung der erzielten Einbauzustände für Unter- und Oberboden. Weit über 1.000 Einzelproben lieferten die Datengrundlage für den am 18. Dezember 1998 beim Sächsischen Staatsministerium für Umwelt eingereichten Abschlußbericht [10]. In diesem wurden in den separaten Berichtsteilen

- Geotechnischer Ergebnisbericht,
- Gesamtbericht Radiologische Begleitung,
- Gesamtbericht Wasserhaushaltliche Bewertung,
- Gesamtbericht Technisch/technologischer Ablauf und
- Gesamtbericht Oberbodenbearbeitung

auf der Grundlage der gewonnenen Feldkennwerte die technische Machbarkeit des Abdecksystems sowie die Erfüllung der Sanierungsziele exemplarisch nachgewiesen. Im weiteren konnten die vorläufigen Qualitätssicherungsprogramme für den Aufbau des Abdecksystems in verbindlicher Weise präzisiert werden. Die Feldversuche auf der Halde Borbachdamm waren Grundlage und Vorbild für nachfolgende Feldtests zu anderen geplanten Mehrschicht-Abdecksystemen der WISMUT GmbH.

Im Teilbericht Oberbodenbearbeitung [11] wurde der Einsatz eines High-Speed-Raupenschleppers der Firma KÄSSBOHRER (verwendeter Typ: PB 240 D, ca. 5,0 t Dienstgewicht) mit hochbeweglichem Planierschild für die Auflage einer 0,10 m bis 0,15 m mächtigen ORS-Schicht und in Kombination mit einer HOWARD-Bodenfräse auch zum Einarbeiten in die unterlagernde Dämmschicht als am besten geeignet nachgewiesen. Der Raupenschlepper wie auch die Gerätekombination sind selbst bei hohen Wassergehalten des ORS über die Feldkapazität hinaus ohne Einschränkungen für beide Arbeitsgänge anwendbar.

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der im Versuchsverlauf hergestellten Oberbodenschicht waren vorzugsweise hinsichtlich der Erosionsstabilität und der Begrünungsvoraussetzungen zu bewerten.

Insgesamt wurden bei den Testarbeiten durch ORS-Auftrag und In-situ-Herstellung des Rekultivierungsmischsubstrates auf den Böschungen der Halde Borbachdamm trotz witterungsbedingt teilweise sehr ungünstiger Versuchsumstände zielgemäß eine sofortige und hohe Erosionsstabilität sowie gute Anwuchsbedingungen für die Erstbegrünung geschaffen. Gleichzeitig sind die erforderlichen Voraussetzungen für die langfristige Etablierung eines für das Pflanzenwachstum günstigen Bodenluft- und -wasserhaushaltes erzeugt worden [11].

## 5 Praktische Erfahrungen mit dem Abdecksystem

Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Einsatz eines Rekultivierungsmischsubstrates als Oberbodenschicht in einer speziell dafür entwickelten Hang-Lysimeteranlage und den praxisnahen Ergebnissen der umfangreichen Feldversuche zur Abdecktechnologie wurden durch die zuständigen berg- und strahlenschutzrechtlichen Genehmigungsbehörden am 5. und am 6. Oktober 1999 die ersten 2 Genehmigungen zur abschließenden Haldensanierung der Objekte Halde Borbachdamm (ca. 7 ha) und Halde 366 (ca. 40 ha) am Standort Schlema-Alberoda ausgereicht.

Die Genehmigungen basierten neben der Überzeugungskraft der von WISMUT vorgelegten Untersuchungsergebnisse auch auf den intensiven Begutachtungen der Versuchsergebnisse durch die von Behördenseite beauftragten externen Sachverständigen.

Seither sind in diesem Sanierungsraum etwa 110 ha Haldenmantelfläche mit dem kompletten Zweischicht-Abdecksystem überzogen worden. Bei günstigen wettermäßigen Einsatzbedingungen werden etwa 500 m<sup>3</sup> Abdeckmaterial pro Arbeitstag eingebaut. Das mineralische Unterbodenmaterial wird dabei aus einem Umkreis bis max. 50 km für den Soforteinbau antransportiert. Eine diesbezügliche Lagerhaltung findet aus Kostengründen nur in sehr begrenztem Maße zur Überbrückung von Störfällen (Stau/Unfall auf Transporttrasse, ungenügende Materialqualität u.ä.) statt.

Das angewendete Zweischicht-Abdecksystem kann als angemessene Abdecklösung in Bezug auf moderate Sanierungsziele unter Beachtung der bergbaulich gesetzten Randbedingungen und der natürlichen Standortgegebenheiten betrachtet werden. Es ist damit ein Beitrag zur Reproduzierung einer Landschaft, die sich am Umfeld orientiert und das Spektrum der angestrebten Nachnutzungen (forstwirtschaftlicher Gehölzaufwuchs, wohngebietsnahe Freizeit- und Naherholungsbereiche, Golf-Park) fördert.

Im Jahr 2002 wurden durch die bekannten Niederschlags- und Hochwasserereignisse im Freistaat Sachsen die Standsicherheit und Erosionsstabilität der aufgebrachten Haldenabdeckungen auf eine besonders harte Probe gestellt. Diese außergewöhnlichen Beanspruchungen konnten ebenso gemeistert werden wie die mit dem langen und heißen Sommer 2003 verbundenen allgemeinen Wasserdefizite, die im Pflanzenaufwuchs der Abdeckungen keine gravierenden Schäden hinterlassen haben.



## Literatur

- [1] GATZWEILER, R., MARSKI, R., 1996: Haldensanierung – eine interdisziplinäre Herausforderung; In: Geowissenschaften 14, Heft 11, S. 461-466
- [2] WISMUT GmbH, 1996: Grundsätze und Lösungen für die Haldenabdeckungen an den Standorten Schlema-Alberoda/Pöhla zur Reduzierung der Umweltbeeinflussungen Chemnitz, November 1996, unveröff.
- [3] WISMUT GmbH, 1997: Optimierungsbetrachtung zur Abdeckung der Halde 366 im Sanierungsbetrieb Aue (überarbeitete Fassung) Chemnitz, Dezember 1997, unveröff.
- [4] Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften; IGB Ingenieurbüro für Grundbau, Bodenmechanik und Umwelttechnik Hamburg, 1996: Gutachten zum „Strahlenschutzrechtlichen Genehmigungsantrag der WISMUT GmbH zur Nutzung der Halden 371/I und 371/II zum zeitlich begrenzten Betrieb von Anlagen zur Herstellung von Haldenabdeckmaterial in Fortführung eines Großversuches“ Leipzig/Hamburg, Juni 1996
- [5] Prüfzeugnis Nr. 97 01 22 025, 1997: Untersuchungen zur Istzustandsanalyse des im SB Aue produzierten Abdeckmaterials in Anlehnung an die TR LAGA und weiteren ausgewählten Parametern Institut BiLaCon Stollberg, 30. April 1997, unveröff.
- [6] Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V. (FIB), 1997: Grundsätzliche Darstellung und Prognostizierung möglicher zeitlicher Veränderlichkeit relevanter bodenphysikalisch/-mechanischen Kennwerte in Bezug auf das Langzeitverhalten von Abdeckungen auf Halden am Beispiel der Halde 366 am Standort Aue-Alberoda und Einschätzung zum System Boden-Pflanze, unveröff.
- [7] Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V. (FIB), 1998: Begleitung der Feldversuche auf der Halde Borbachdamm am Standort Schlema-Alberoda zur Technologie der Oberbodenherstellung, unveröff.
- [8] KNOCHE, D., SCHRAMM, A., MARSKI, R., 2005: Hanglysimeterstudie zur Wasser- und Stoffdynamik einer 2-Schicht-Bodenabdeckung für Halden des Erzbergbaues; In: Tagungsband zur 11. Gumpensteiner Lysimeter-Tagung, 5./6. April 2005 Raumberg-Gumpenstein/Erdning, unveröff.
- [9] Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V. (FIB), 1999: Abschlußbericht "Felduntersuchungen zum Einsatz eines organischen Rekultivierungssubstrates als oberflächennahe Komponente mineralischer Abdecksysteme für die Halden des Uranbergbaues", unveröff.
- [10] C & E Consulting und Engineering GmbH, 1998: Erstellung einer Eignungsbeurteilung für die 3 vorgesehenen Unterbodenmaterialvarianten sowie Begleitung der Feldversuche zur Technologie der Haldenabdeckung am Standort Schlema-Alberoda über den Testverlauf bis zur Abschlußberichterstellung, unveröff.
- [11] Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e. V. (FIB), 1999: Abschlußbericht „Begleitung der Feldversuche auf der Halde Borbachdamm am Standort Schlema-Alberoda zur Technologie der Oberbodenherstellung“, unveröff.