

Bodenmechanische Beurteilung von mineralischen Ersatzbaustoffen für den Einsatz in Deponieabdichtungssystemen

Karl Josef Witt

1 Einleitung

Mineralische Abfälle mit bodenähnlichen Eigenschaften fallen beim Abbruch und Rückbau von Gebäuden und sonstigen Bauwerken wie auch bei zahlreichen Prozessen der Rohstoff- und Veredelungsindustrie in Form von Recyclingmaterialien, Schlacken, Granulaten, Hütten-sanden, Aschen oder Schlämmen an. Produktspezifisch können sie Schadstoffe enthalten. Zusammen mit Bodenmaterial handelt es sich in Deutschland um den größten umweltrelevanten Stoffstrom [UBA 2008, UBA 2011]. Im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sollten auch diese Abfälle weitestgehend verwertet oder in Produktionsprozesse zurückgeführt werden.

Der rechtliche Rahmen einer Verwertung dieser Abfälle und Materialien in Erdbauwerken wird durch die Vorgaben des Bodenschutzes geregelt. Für Verfüllungen und für den Einsatz in technischen Bauwerken des Verkehrswegebbaus gelten länderspezifisch Verwertungsklassen auf der Grundlage der LAGA MITTEILUNG M20. Im Deponiebau dürfen mineralische Abfälle als Baustoff dann als Trag-, Abdichtungs-, Schutz-, Drän- oder Rekultivierungsschicht eingesetzt werden, wenn die Funktion der Komponente sichergestellt und das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. In der hierfür zugrunde liegenden DEPONIEVERORDNUNG (DEPV) wird der Begriff *Deponieersatzbaustoff* eingeführt, der sowohl mineralische Abfälle in ihrem Ausgangszustand als auch technisch aufbereitete oder zu Baustoffen konditionierte Abfälle einschließt. Teil 3 der DEPV behandelt die Grundsätze der Verwertung und den Einsatz von Deponieersatzbaustoffen. Die detaillierten Anforderungen und Eignungskriterien sind in Anhang 3 der DEPV geregelt.

Für die geologische Barriere, für technische Maßnahmen als Ersatz der geologischen Barriere sowie für Abdichtungssysteme dürfen Materialien, Komponenten oder Systeme nur eingesetzt werden, wenn sie dem Stand der Technik entsprechen und wenn dies der zuständigen Behörde nachgewiesen worden ist. Zum Nachweis sind prüffähige Unterlagen in Form Bundeseinheitlicher Eignungsbeurteilungen der Länder oder Einzelnachweise auf der Basis Bundeseinheitlicher Qualitätsstandards zu erbringen. Da diese Forderung auch für die Ersatzbaustoffe gilt, wurden von der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ bundeseinheitliche Qualitätsstandards für den Einsatz von Deponieersatzbaustoffen als mineralische Oberflächenabdichtungskomponente (BQS 5-3_2010 in Verbindung mit BQS 5-0_2010) und als mineralische Basisabdichtungskomponente (BQS 2-3_2011 in Verbindung mit BQS 2-0_2011) ausgearbeitet und durch die LAGA veröffentlicht. Beide Qualitätsstandards regeln die grundsätzlichen Materialanforderungen sowie die Anforderungen an die Qualitätsmerkmale Abdichtungswirkung, mechanische Widerstandsfähigkeit, Beständigkeit, Herstellbarkeit sowie Art und Umfang von Eignungsnachweisen. Weitere Qualitätsstandards, die voraussichtlich in Kürze veröffentlicht werden, regeln den Einsatz von Deponieersatzstoffen in der geologischen Barriere (BQS 1-0), in Entwässerungsschichten von Basis- und Oberflächen-

abdichtungssystemen (BQS 3-2_2011, BQS 6-2_2011), sowie in Trag- und Ausgleichsschichten (BQS 4-1_2011).

Dieser Beitrag möchte weder Erläuterung noch Kommentar dieser ausführlichen und erschöpfenden Qualitätsstandards sein. Vielmehr sollen hier einige bodenmechanische Aspekte des Einsatzes mineralischer Abfälle in Abdichtungssystemen beleuchtet werden, um den Leser für die Grenzen des Sinnvollen und Machbaren vor dem Hintergrund der Sicherheitsanforderungen und der unvermeidlichen Unschärfe von Prognosen des Materialverhaltens unter Feldbedingungen zu sensibilisieren, ohne dabei den Mut für die Verwertung von Ersatzbaustoffen im Deponiebau zu schwächen.

2 Bodenmechanische Anforderungen

2.1 Übergeordnete Anforderungskriterien

Deponieersatzbaustoffe können unmittelbar aus mineralischen Abfällen hergestellt werden oder aus Gemischen von mineralischen Abfällen und natürlichem Bodenmaterial. Die Herstellung von Ersatzstoffen aus Gemischen von mineralischen Abfällen unterschiedlicher Qualität ist nur genehmigungsfähig, wenn dies zur Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften erforderlich ist, wenn grundsätzlich der Einsatz aller einzelnen Mischungskomponenten zulässig wäre und die für die Mischung definierten Grenzen der stofflichen Belastung von allen Mischungskomponenten unterschritten werden [DEPV]. Mit dieser Forderung wird der Sinn der Verwertung hervorgehoben und der Einsatz von Ersatzbaustoffen von dem reinen Entsorgungsmotiv abgegrenzt. Aus bodenmechanischer Sicht besteht der Gewinn einer Mischung in der Verbesserung der physikalischen Eigenschaften, im Wesentlichen in der Beeinflussung der Tragstruktur, der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter und des hydraulischen Materialverhaltens.

Für mineralische Abfälle, die als Deponieersatzbaustoffe eingesetzt werden, bestehen keine schwächeren Mindestanforderungen als für die im Deponiebau üblichen natürlichen Böden und mineralischen Systemkomponenten. Dies gilt insbesondere für die bodenmechanische Klassifikation. Erhöhte Anforderungen an die Prüfung und Qualitätssicherung ergeben sich aus der geringeren Erfahrung im Materialverhalten von Ersatzbaustoffen, da sich viele dieser Materialien zwar augenscheinlich bodenähnlich verhalten, sich jedoch aufgrund komplexer mechanischer, hydraulischer, thermischer, chemischer oder biologischer Wechselwirkungen mit den empirischen Klassifikationsmethoden für Boden nicht zutreffend oder erschöpfend beschreiben lassen. Dies betrifft insbesondere die Beständigkeit über sehr lange Zeiträume (> 100 Jahre) und die potentielle Schadstoffemission. So ergibt sich als abstrakte Anforderung an Deponieersatzbaustoffe der Ausschluss einer schädigenden Wirkung auf das Bauwerk und die Umwelt sowie die eindeutige Charakterisierbarkeit und Homogenität der eingesetzten Materialien.

Für Deponieersatzbaustoffe, die als Abdichtungskomponente oder für eine Substitution der geologischen Barriere eingesetzt werden, ist der Gehalt an organischen Bestandteilen in der Originalsubstanz gem. DEPV unabhängig von der Deponieklasse und dem Einsatzort auf $\leq 3\%$ (gemessen als Glühverlust) bzw. $\leq 1\%$ (gemessen als TOC) begrenzt. Baggergut mit überwiegend mineralischer Zusammensetzung wie auch natürliche organogene Böden können dagegen bis zu einem Kohlenstoffgehalt bis zu 6 % akzeptiert werden, wenn die übrigen

grundsätzlichen Anforderungen erfüllt sind. Auch wenn bei einer Zerstreung von Bedenken explizit Ausnahmen in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden zulässig sind, dürfte damit der Einsatz auf überwiegend inerte Materialien begrenzt sein, so dass in Hinblick auf den formulierten Grundsatz der Verwertung nur ein sehr geringer Anteil des Stoffstromes auf diese Art verwertet werden kann. In anderen europäischen Ländern und in den USA ist es dagegen üblich, auch Abfälle mit höherem Organikgehalt als Abdichtungsmaterial zu verwerten. Hierzu zählen z. B. Mischungen aus bodenähnlichen und aufbereiteten organischen Abfällen oder konditionierter Papierschlamm als Abdichtungskomponente in Oberflächenabdichtungssystemen.

Ein großer Anteil der Eignungsnachweise von Deponieersatzbaustoffen betrifft die Verdichtbarkeit und Herstellbarkeit. Die Verdichtungseigenschaften und die zur Verdichtung optimale Bodenfeuchte lassen sich im Labor mit den bekannten Methoden ermitteln. Aufgrund von Teilsättigungs- und Wasserbindungseffekten kann es bei feinkörnigen, aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften zusammengesetzten Abdichtungsmaterialien zu Abweichungen von dem für natürlichen Boden bekannten typischen Verlauf der Proctorkurve kommen. Die applizierte Verdichtungsenergie wie auch die Abfolge der Befuchtung/Trocknung beeinflussen dann das Ergebnis. Laboruntersuchungen können so nicht direkt auf die Feldbedingungen übertragen werden. Dem Probefeld und der Optimierung der Verdichtungstechnik, Verdichtungsenergie und Lagenstärke wie auch der Verdichtungsprüfung ist dann besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Witterungsbedingungen können bei Materialien, die aus mehreren Komponenten zusammengesetzt sind, in stärkerem Maße als erwartet den Verdichtungserfolg beeinflussen.

2.2 Deponieersatzbaustoffe als Basisabdichtungskomponente

Die Sicherheitsanforderungen im Bauwesen zielen auf redundante, duktile Systeme und Konstruktionen. Hierzu zählt auch die Forderung nach Kontrollierbarkeit und Reparierbarkeit. Für die Komponenten von Basisabdichtungssystemen ist die Reparierbarkeit im Falle von Funktionsverlusten nur bedingt gegeben. Die Bereitschaft, bei diesem sicherheitsrelevanten Bauteil alternativ zu den durch Erfahrung abgesicherten Lösungen Ersatzbaustoffe bei nur geringem wirtschaftlichen Vorteil einzusetzen, wird als gering eingeschätzt. Mineralische Deponieersatzbaustoffe dürften als Abdichtungskomponente in Basisdichtung eher die Ausnahme und auf produktionsspezifische Anwendungen von Werkdeponien begrenzt sein. Die DEPV, Teil 3, wie auch der BQS 2-3 geben dennoch auch für diesen Einsatz die technischen Randbedingungen und die Anforderungen an das Material, an die erforderlichen Nachweise und an die Qualitätsprüfung detailliert vor.

Die Zuordnungswerte der Stoffbelastung sind getrennt als Feststoff- und Eluatskriterien in Tab. 2 der DEPV zusammengestellt. Die Grenzwerte gelten bei Materialgemischen für alle Einzelkomponenten, nicht für das Mischgut. Die Feststoffkriterien sind auf die Parameter BTEX, PCB, MKW, PAK (EPA) sowie extrahierbare lipophile Stoffe begrenzt. Die Zuordnung erlaubter Ersatzbaustoffe entspricht nach LAGA M20 etwa einem Bodenmaterial mit einer stofflichen Belastung < Z2. Die Eluatskriterien schließen die Schwermetalle und weitere anorganische Stoffe und Verbindungen mit ein. Auch hier entsprechen die Zuordnungskriterien einem Bodenmaterial im Intervall Z1 bis Z2, mit stoffspezifischen Schwankungen die etwa einer Durchschnittsbelastung Z1.2 entsprechen.

Die mechanischen Anforderungen an Deponieersatzbaustoffe für Basisabdichtungskomponenten unterscheiden sich nicht von denen an natürliche Böden, welche für diesen Zweck als Baustoff verwendet werden. Die Nachweise der Eignung, der Standsicherheit, Verformbarkeit und Herstellbarkeit sind nach den Empfehlungen der Gruppe E-2 (Planung und Konstruktion), E-3 (Eignungsnachweise) und E-5 (Qualitätsteuerung) des Arbeitskreises Geotechnik der Deponien und Altlasten (GDA) zu führen.

Da Basisabdichtungen nach der Ablagerung der Abfälle permanent einer hohen Überlagerungsspannung ausgesetzt sind, sind die bodenmechanischen Kenngrößen Steifigkeit, Verformbarkeit und Scherparameter, die unter dem Begriff mechanische Widerstandsfähigkeit subsummiert werden, kein entscheidendes Eignungskriterium. Die Wasserdurchlässigkeit, die Verträglichkeit der relativ hohen Temperaturen und Änderungen des mechanischen Verhaltens infolge chemisch-physikalischer Prozesse bestimmen die Beständigkeit und sind daher in hohem Grade eignungsrelevant.

Die Langzeitbeständigkeit des verdichteten Abdichtungsmaterials ist gegenüber der Einwirkungen aus Deponiesickerwasser, aus Deponiegas, aus Temperatur und der damit verbundenen Wassergehaltsänderungen sowie aus biologischen Einwirkungen experimentell nachzuweisen. Der BQS 2-3 empfiehlt hierzu konkrete Versuchsmethoden, wie sie auch für natürliche Böden in DÜLLMANN & OBERNOSTERER 2010 beschrieben und erläutert sind. Handelt es sich bei dem Deponieersatzbaustoff um ein inertes, rein mineralisches Material, das quasi einem natürlichen Boden gleichkommt, kann ein Großteil der Beständigkeitsnachweise entfallen. Soweit jedoch aufgrund der Materialzusammensetzung mit chemischen oder biologischen Reaktionen in Verbindung mit Deponiesickerwasser oder Deponiegas zu rechnen ist, sind diese aufwändigen Nachweise unverzichtbar. Die Simulation der Langzeitbeständigkeit unter einer Temperatur von 40°C mit einem isothermen Gradienten zum Baugrund hin, ist hierbei der schwierigste Nachweis.

Da mit keiner der zeitraffenden Versuchsmethoden oder Reaktorsimulationen die Wirklichkeit tatsächlich über derart lange Zeiträume abgebildet werden kann, verbleiben immer Unsicherheiten. Hier sind mit dem Eignungsnachweis durch die Experten für Geotechnik, Baustoffkunde und Abfallbiologie Szenarien zu bewerten und angemessene Strategien der Beobachtung zu entwickeln. Bei feinkörnigen Ersatzbaustoffen betrifft dies Effekte aus Schrumpfen, Kationenaustausch und Mineralumbildung, welche die Dichtigkeit und Adsorptionsfähigkeit nachteilig beeinflussen können. Bei hochverdichteten gemischtkörnigen Materialien, kornabgestuften Baustoffen aus Schlacken, Sanden und Stäuben, kommt als schädlicher Langzeiteffekt dagegen eher eine Strukturschwächung infolge einer Reduktion der Kornfestigkeit in Betracht, was ebenfalls eine signifikante Minderung der Dichtigkeit mit sich bringen kann. Chemische Reaktionen, z. B. Alkali-Aggregat-Reaktionen, wie auch vergleichbare sekundäre Mineralbildungen im Porenraum, führen zunächst unter dem vorherrschenden Spannungszustand zu einer Reduktion der Porosität und damit zu einer Verbesserung der Dichtwirkung. Die Prozesse sind jedoch nicht a priori stabil und lassen sich langfristig in ihrer Auswirkung auf die Dichtigkeit schwer beurteilen. Als weitere Qualitätseinschränkung sind die von Schlacken und Aschen bekannten Reaktionen aufzuführen, die langfristig zu einer unerwünschten Verfestigung und Versprödung führen. Auch hier wirkt eine hohe Auflast in Verbindung mit abgeklungenen auflastbedingten Verformungen des Baugrundes günstig und kann mit in die Bewertung von Szenarien zur Langzeitbeständigkeit von Basisabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen aufgenommen werden.

Als rein bodenmechanisches und erdbauliches Problem verbleiben die Herstellbarkeit und der temporäre Schutz der Abdichtungsschicht bis zur Überbauung bzw. Überschüttung. Bei der Vielzahl der denkbaren Materialien mit ihrer spezifischen Widerstandsfähigkeit bleibt es nicht aus, hier objektspezifisch Erfahrung zu sammeln und kritisch zu bewerten. Die Phänomene Handhabbarkeit, Witterungsempfindlichkeit und Erosionsbeständigkeit stehen dabei immer in Zusammenhang mit der Bodenstruktur, der Bodenfeuchte, dem Mineralbestand der Feinteile und mit der Art der applizierten Verdichtungsenergie.

2.3 Deponieersatzbaustoffe als Oberflächenabdichtungskomponente

Bei der Bewertung der Funktionssicherheit eines Oberflächenabdichtungssystems mit Abdichtungskomponenten aus natürlichen Böden oder aus Deponieersatzbaustoffen stehen im Vergleich zu einer Basisabdichtung andersgeartete Beanspruchungen im Vordergrund. Im Gegensatz zur Basisabdichtung bietet die Oberflächenabdichtung langfristig eine Kontrollierbarkeit und Reparierbarkeit. Im Hinblick auf die Langzeitfunktion problematisch sind die geringe Überlagerungsspannung, die klimatischen Einwirkungen durch zyklisch wechselnde Temperatur mit der daraus resultierenden Schwankung der Feuchte sowie die Zwangsverformungen des Abdichtungssystems, die sich aus der Verformung des Deponiekörpers ergeben. Zusätzlich zu den oben aufgeführten allgemeinen Anforderungen an die chemische Beständigkeit und stoffliche Belastung zielen die Eignungsnachweise für Deponieersatzbaustoffe auf diese besonderen mechanischen, hydraulischen und thermischen Beanspruchungen. Da Oberflächenabdichtungssysteme zumindest teilweise auf Böschungen aufliegen, muss dauerhaft die Standsicherheit des Dichtungssystems gewährleistet sein, woraus sich die Mindestanforderungen an die dauerhaft mobilisierbaren Scherparameter Kriechresistenz ableiten.

Die zulässige Schadstoffbelastung der in Deponieersatzbaustoffen enthaltenen mineralischen Abfälle ist in den Tab. 1 und 2 des Anhangs 3 der DEPV geregelt (vgl. oben). Auch hier gelten bei Gemischen die Grenzwerte für alle Komponenten. Bei Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen erlaubt die DEPV zwar eine Überschreitung einzelner Grenzwerte, soweit eine Gefährdung für Boden und Grundwasser ausgeschlossen wird. Als Obergrenze wird jedoch für mineralische Abdichtungskomponenten das Kriterium Z2 der LAGA (Bauwerke mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen) festgelegt. Darüber hinaus muss sichergestellt sein, dass das in der Entwässerungsschicht anfallende Sickerwasser, soweit es mit dem Abdichtungsmaterial in Kontakt kommt, die Einleitvorschriften erfüllt.

Wie für natürliche Böden als Abdichtungskomponente gilt auch für Deponieersatzbaustoffe die Forderung nach einer maximalen Wasserdurchlässigkeit von $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s (DKI, DKII) bzw. $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (DKIII), die bei einem Gradienten $i = 30$ im Laborversuch nachzuweisen ist. Des Weiteren ist die Strukturstabilität nachzuweisen (kein Austrag von Feststoff, Suffosionsstabilität). Bodenähnliche poröse Materialien mit moderatem Organikgehalt und mit eher plattigen oder faserigen Partikeln können in ihrem hydraulischen Verhalten erfahrungsgemäß weit von natürlichen Böden mit ansonsten vergleichbaren Eigenschaften abweichen. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei geringen Gradienten, i. E. bei einer im Vergleich zum standardisierten Durchlässigkeitsversuch geringeren totalen Spannung, eine größere hydraulische Leitfähigkeit vorliegt. Auch hier gilt der Hinweis, dass mit Kontrollfeldern

der Abdichtungserfolg und die Effektivität des Abdichtungssystems verifiziert werden sollten.

Das Quell- und Schrumpfverhalten ist auch beim Einsatz von Deponieersatzbaustoffen bei zyklischen Schwankungen des Wassergehalts und der Temperatur von entscheidender Bedeutung für die Langzeitfunktion. Die Nachweise der Beständigkeit von Komponenten aus Deponieersatzbaustoffen in Oberflächenabdichtungssystemen sind daher für eine Temperaturspanne bis 30° C zu führen. Die experimentellen Nachweise einer Schrumpfrissinitiation sind nicht standardisiert. Der BQS 5-3 fordert zur Beurteilung dieser Problematik einen projektbezogenen Nachweis und eine Bewertung anhand der Wasserspannungscharakteristik. Grundsätzlich gilt für feinkörnige Böden wie auch für bodenähnliche feinkörnige Ersatzstoffe, dass sich bei jeder Entwässerung das Volumen reduziert und somit die Gefahr von Trockenrissen unter der geringen Auflastspannung besteht.

Bei Mischungen aus granularem Stützkorn und porenfüllenden Feinteilen oder Schlämmen finden Wassergehaltsänderungen und Schrumpffphänomene primär in der Feinteilmatrix statt. In diesem Fall führt jede Trocknung zur Vergrößerung der Interaggregatsporen und damit zu einer signifikanten Zunahme der Wasser- und Luftdurchlässigkeit, ohne dass dabei Risse auftreten. Wassersättigung und Durchsickerung können dagegen zu einer Verlagerung von Feinteilen in der tragenden Bodenstruktur führen. Das hydraulische Verhalten solcher Mehrphasenstoffe ist äußerst komplex und lässt sich mit den Standardversuchen zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nicht erschöpfend ermitteln. Spezifisch auf das Material und auf dessen Beanspruchung ausgerichtete zyklische Versuche der Befeuchtung und Entwässerung sind hier angebracht. Die Forderung von experimentellen Nachweisen gilt für ein Temperaturspektrum von 0 bis 30° C.

Eine pragmatische Methode, die für die Dichtigkeit negativen Schrumpfeffekte zu vermeiden, ist ein Schutz der Abdichtungskomponente, der sicherstellt, dass der Einbauwassergehalt im Lebenszyklus nicht dauerhaft unterschritten wird. In der Deponiepraxis wird dies häufig dadurch gelöst, dass die Abdichtungskomponente in deutlich größerer Mächtigkeit ausgeführt wird, als gefordert, um ein Durchtrocknen der Gesamtschicht zu verhindern. Als ebenso wirksame Schutzmaßnahme können empfindliche Abdichtungsschichten mit kapillaren Schutzschichten abgedeckt werden, wie sie in WITT ET AL. 2004 und WITT 2010 vorgeschlagen werden. Neuere Untersuchungen lassen vermuten, dass Schrumpfrisse erst nach Unterschreiten der Wasserspannung des Lufteintrittspunktes auftreten.

Oberflächenabdichtungssysteme unterliegen Zwangsverformungen, denen sie schadfrei folgen müssen. In diesem Zusammenhang ist die Versprödung des Dichtungsmaterials zu betrachten. Viele Schlacken, Aschen und Stäube neigen zu Langzeitreaktionen, der sogenannten sekundären Mineralisation, die einer Verfestigung mit Bindemitteln gleichkommt. Derartige Stoffe verlieren mit der Zeit das plastische Deformationspotential und neigen zu Sprödbrüchen. Der Einsatz von sich verfestigenden Ersatzbaustoffen sollte daher auf Anwendungen begrenzt sein, bei denen die Untergrundverformungen abgeschlossen sind.

Die Scherfestigkeit von Ersatzbaustoffen wie auch die Festigkeitsparameter in Schichtgrenzen zu angrenzenden Materialien werden nach den GDA-Empfehlungen bei einer Auflast bis 60 kN/m² experimentell ermittelt. Bei feinkörnigen Materialien und Schlämmen sollten zusätzlich die Viskosität und das Kriechmaß in Abhängigkeit des Wassergehaltes getestet werden. Zusammen mit der von der Feuchte abhängigen Änderung der Festigkeitseigenschaften ist dieses Phänomen bodenmechanisch am schwierigsten zu bewerten. Standard-

Scherversuche reichen bei kriechempfindlichen Materialien nicht aus. Eine zutreffende Materialbeschreibung erfordert zumindest Triaxialversuch oder Langzeitkriechtest, deren Ergebnisse in Modelle zur Prognose des Scherverhaltens einfließen.

Die Praxis zeigt, dass in Oberflächenabdichtungen Deponieersatzbaustoffe der unterschiedlichsten Art als mineralische Abdichtungskomponente eingesetzt werden. Das Motiv ergibt sich meist aus den lokalen Abfallströmen, einfache Lösungen bieten sich i. A. nicht an. Der Erfolg beruht dagegen auf Ergebnissen umfangreicher und langwieriger Labor und Felduntersuchungen, die im Falle von Schlacken, Aschen und Stäuben insbesondere die Aufbereitung und Mischungsrezeptur, beim Einsatz von Schlämmen meist die wirtschaftliche Optimierung der Entwässerungstechnik beinhalten. Insofern lassen sich wie in DEPV und BQS 5-3 nur physikalische Ziele und Grenzen festlegen. Zur Erreichung dieser Vorgaben sind dann die abfallmechanischen und bodenmechanischen Grundlagen und Erfahrungen zu berücksichtigen, wobei nicht selten Sonderversuche zur Bewertung erforderlich sind. Beispiele für erfolgreiche Anwendungen, die auch die Komplexität widerspiegeln, finden sich in DÜSER 1999, TRESSELT 2000, HGT 2006, LAYMAN-REPORT 2008. Grundlagen zum physikalischen Stoffverhalten und zu angemessenen bodenmechanischen Versuchsmethoden sind in DÜLLMANN & OBERNOSTERER 2010 dargestellt.

2.4 Deponieersatzbaustoffe als Entwässerungsschicht

Für Entwässerungsschichten sind im Wesentlichen die Wasserdurchlässigkeit, die chemische und die mechanische Beständigkeit des Dränagematerials gefordert. Daher sind nur inerte grobkörnige Böden der Körnung 16/32 mm (Regelkörnung Basis) oder etwas kleinere Fraktionen, welche die Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit erfüllen (Option Oberfläche), mit hoher Kornfestigkeit zugelassen. Hier bietet sich an, alternativ zu natürlichen Böden, die in der definierten Körnung regional oft nicht verfügbar sind, als Ersatzbaustoff Schlacken, Granulate, RC-Materialien oder Schotter einzusetzen. Einen Überblick über großtechnisch anfallende Schlacken und deren Schadstoffcharakteristik findet sich in GRATHWOHL 2011.

Auch für Deponieersatzbaustoffe gelten die an natürliche Mineralstoffe gestellten Mindestanforderungen, wie sie in der DEPV und in den GDA Empfehlungen E 2-14 (Basis-Entwässerung) bzw. E 2-20 (Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen) aufgeführt sind. Für die Herstellung gilt E 4-2 (Herstellung von mineralischen Entwässerungs- und Schutzschichten). Die darüber hinausgehenden besonderen Anforderungen an nicht natürliche Baustoffe sind in BQS 3-2 (Basis Entwässerung) und BQS 6-2 (Oberflächenabdichtungssystem) geregelt.

Wie für alle Anwendungen von Deponieersatzbaustoffe regelt Teil 3 der DEPV auch die Verwertung in Entwässerungsschichten. Die Zuordnungskriterien und Zuordnungswerte für Entwässerungsschichten sind in DEPV, Anhang 3, Tab. 1 u. 2 zusammengestellt. Entwässerungsschichten für Basisabdichtungssysteme dürfen danach die der Deponiekategorie zugeordnete stoffliche Belastung der abgelagerten Abfälle haben. Für DK 2 entspricht dies etwa den Zuordnungswerten Z2. In Oberflächenabdichtungssystemen können oberhalb der Abdichtungskomponente nur Baustoffe mit einem derart geringen Emissionspotential eingesetzt werden, dass das in der Entwässerungsschicht gefasste Wasser nach den wasserrechtli-

chen Vorschriften eingeleitet werden kann. Die zulässige stoffliche Belastung für Entwässerungsschichten entspricht für Oberflächenabdichtungssysteme der Einbauklasse 1 nach LAGA M20, Einbau in technische Bauwerken ohne besondere Anforderungen an den Standort und ohne technische Sicherungsmaßnahmen, was je nach hydrogeologischen Verhältnissen die Zuordnungswerte Z1.1 (ungünstig) oder Z1.2 (günstig) erlaubt.

An die Kornfestigkeit von Dränagematerialien für Entwässerungsschichten von Basis- wie auch von Oberflächenabdichtungssystemen werden strenge Anforderungen gestellt. Dies gilt für Ersatzbaustoffe in gleichem Maße. Die Anfälligkeit zu Kornbruch muss in einem speziell hierfür vorgeschlagen Laborversuch zur Ermittlung der Kornfestigkeit unter dynamischen Einwirkungen und der Kornzertrümmerung bei hohen statischen Lasten nach GDA E 3-12 (Eignungsprüfung mineralischer Entwässerungsschichten) nachgewiesen werden. Nach diesem Test scheiden Schlacken mit hoher Abrasivität und scharfen Kanten oft schon aus.

Die Anforderungen an die Scherfestigkeit werden von derartigen Böden und Ersatzstoffen i. A. problemlos erfüllt. Hier wirken sich die Rauigkeit und Kantigkeit der Oberfläche günstig aus. Lediglich in Schichtgrenzen zu bindigen Böden und zu Geokunststoffen kann es in Oberflächenabdichtungssystemen auf Böschungen zu Standsicherheitsdefiziten kommen, die durch zusätzliche stabilisierende Maßnahmen kompensiert werden müssen.

Die Hauptproblematik beim Einsatz von Deponieersatzbaustoffen in Basisentwässerungssystemen ergibt sich durch die Kornbruchgefahr, die chemische Beständigkeit unter Sickerwassereinwirkung und durch die Gefahr einer Leistungsminderung aufgrund biologischer Aktivitäten. Der letzte Punkt lässt sich nur schwer in seinem Verlauf prognostizieren. Die chemische Beständigkeit kann mit Modellsickerwasser in Reaktorversuchen simuliert und nachgewiesen werden.

Beim Einsatz von Deponieersatzbaustoffen in Oberflächenabdichtungssystemen ist das kritische Szenario der Eignung meist die Schadstoffemission oder auch die Verockerungsproblematik. Viele Schlacken und Granulate haben hohe Sulfat- und Chloridgehalte bzw. freien Kalk. Umfangreiche Forschungen zur Verwertung von Ersatzbaustoffen im Straßenbau geben einen Überblick über die möglichen Belastungen, Reaktionsmechanismen und Nachweismethoden des Stofftransportes [UBA 2011, GRATHWOHL 2011].

2.5 Deponieersatzbaustoffe als Trag- und Ausgleichsschicht

Trag- und Ausgleichsschichten dienen als Komponente von Oberflächenabdichtungssystemen dazu, ein Planum und ein stabiles, tragfähiges Auflager zur Herstellung der darüber liegenden Schichten zu garantieren. Häufig werden Trag- und Ausgleichsschichten gleichzeitig als Gasdränschicht genutzt, wobei dann zusätzlich die Anforderung an die Luftdurchlässigkeit $k_A \geq 1 \cdot 10^{-4}$ m/s besteht.

Da mineralische Abdichtungskomponenten i. A. mit schweren, statisch und dynamisch einwirkenden Verdichtungsgeräten hergestellt werden, muss das Auflager möglichst steif und verformungsarm sein, um Walkrisse in der Abdichtungskomponente zu vermeiden. Im weiteren Lebenszyklus ist dagegen eine Schicht mit plastischer Deformierbarkeit gefragt, welche in der Lage ist, ohne Sprödbrüche die Zwangsverformungen aus der Eigensetzung des Abfallkörpers auszugleichen. Die beiden teilweise konkurrierenden Kriterien werden von vielen granularen Materialien erfüllt.

Die technischen und abfallrechtlichen Anforderungen an Trag- und Ausgleichsschichten im Allgemeinen und an die Verwendung von Deponieersatzbaustoffen für diese Komponente im Speziellen sind im bundeseinheitlichen Qualitätsstandard BQS 4-1 detailliert zusammengestellt. Die erforderlichen Nachweise der Kornfestigkeit und der Beständigkeit unter dynamischer Einwirkung sind in GDA 3-12 festgelegt. Die bodenmechanischen Aspekte decken sich sinngemäß mit den oben behandelten Anforderungen an Entwässerungsschichten (vgl. Abschnitt 2.4).

Zur mechanischen Korn- und Scherfestigkeit der Materialien zum Zeitpunkt der Herstellung tritt als Anforderung die Beständigkeit unter der Exposition von Kondensat aus Deponiegas hinzu. Bei der Eignungsbeurteilung von Deponieersatzbaustoffen sind die damit verbundenen chemisch physikalischen Reaktionen zu betrachten, die zu Änderungen der mechanischen Eigenschaften oder auch zur Freisetzung von Schadstoffen führen können. An die stoffliche Belastung werden an Schichten unterhalb einer 2. Abdichtungskomponente auch für Deponieersatzbaustoffe die Grenzwerte für Ablagerungen in der Deponieklasse DK1 gestellt.

Für Trag- und Ausgleichsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen ist erfahrungsgemäß aus Gründen der Tragfähigkeit eine Schichtstärke von 30 bis 50 cm erforderlich, so dass für diese Komponente große Massen erforderlich werden. Bei der Auswahl geeigneter Materialien ist zu beachten, dass die eingesetzten Materialien in ihrer Zusammensetzung wie auch in ihren mechanischen Eigenschaften homogen beschaffen sind. Mischungen aus mehreren Materialien, Ersatzbaustoffe und natürliche Böden sind zulässig, wenn auch die Einzelkomponenten die Anforderungen an die stoffliche Belastung und Beständigkeit erfüllen.

3 Zusammenfassung

Die Notwendigkeit, mineralische Ersatzbaustoffe auch im Deponiebau einzusetzen, ergibt sich aus der Forderung einer nachhaltigen Ressourcenschonung. Die aktuellen Regelwerke DEP, GDA-Empfehlungen und BQS der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ geben klare Vorgaben zu den Möglichkeiten, Bedingungen und Grenzen der Verwertung.

Im Deponiebau dürfen mineralische Ersatzbaustoffe in den technischen Bauwerken Basis- und Oberflächenabdichtungssystem als Abdichtungskomponente, Gasfang-, Trag-, Schutz- und Entwässerungsschicht, wie auch in Kapillarsperren verwendet werden. Die bodenmechanischen und geohydraulischen Anforderungen decken sich mit den Mindestanforderungen, die an natürliche Böden und Mineralstoffe gestellt werden. Zusätzlich zu den bekannten Eignungsnachweisen sind aber die chemische und biologische Verträglichkeit und die Langzeitbeständigkeit unter den zu erwartenden Milieubedingungen nachzuweisen.

Als Trag-, Ausgleichs- und Schutzschicht werden häufig industrielle Nebenprodukte wie Sande und Granulate aus der Metallurgie, als Entwässerungsschicht Schlacken und RC-Materialien mit gutem Erfolg eingesetzt. Als mineralische Abdichtungskomponente kommen gelegentlich speziell aufbereitete Gemische aus Boden, Schlacken, Stäuben oder Schlämmen zum Einsatz. Bei einer Vielzahl von mineralischen Abfällen ist die Begrenzung des Gehaltes an organischen Anteilen das dominierende Ausschlusskriterium.

Das mechanische Verhalten eines mineralischen Monoproduktes ist meist unproblematisch und lässt sich mit den bekannten bodenmechanischen Nachweismethoden hinreichend ge-

nau ermitteln und beschreiben. Überraschungen treten hier eher im chemisch-physikalischen Verhalten auf. Die Untersuchung und die anwendungsreife Entwicklung von Deponieersatzbaustoffen aus Gemischen unterschiedlicher mineralischer Abfälle und Böden stellen dagegen hohe Anforderungen an den Versuchsaufwand und das Verständnis der Wechselwirkungen. Hierbei geht es nicht nur um die Auswahl geeigneter experimenteller Nachweismethoden sondern häufig um die Optimierung einer großtechnischen Aufbereitung, welche die Wirtschaftlichkeit der Verwertungsmaßnahme bestimmt.

In der Prognose des Langzeitverhaltens von mineralischen Ersatzbaustoffen aus Abfallgemischen verbleiben häufig Unsicherheiten. In den Eignungsnachweisen müssen daher Szenarien dargestellt, in angemessenem Umfang wissenschaftlich untersucht und fachkundig, teils interdisziplinär, bewertet werden.

Die Regelwerke geben hierzu Mindeststandards und Rahmenbedingungen vor. Das geotechnische Ingenieurwesen und die Umweltanalytik haben die Erfahrung und die Fachkompetenz, unkonventionelle Lösungen kreativ zu entwickeln und wirtschaftlich zu bewerten. Mit dem notwendigen Mut auf Seiten der Betreiber lassen sich die Ziele der nachhaltigen Abfallwirtschaft auch in diesem Feld erreichen.

Literatur

- DEPONIEVERORDNUNG (DEPV), 2009: Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, 27. April 2009, BGBl I, S. 900 zuletzt geändert am 17.10.2011 durch Erste Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung (BGBl. I Nr. 52 vom 20. Oktober 2011 S. 2065)
- DÜLLMANN, H. & OBERNOSTERER, I., 2010: Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen – LANUV-Fachbericht 25. Hrsg.: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW); <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/...>
- DÜSER, O., 1999: Verwertung von aus Bauschutt aufbereitetem Recyclingmaterial in mineralischen Dichtungssystemen. *Mitteilungen Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) Universität Hannover, Heft 51*
- GDA-EMPFEHLUNGEN, Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage, 1997. Hrsg: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Verlag Ernst & Sohn. Nach 1997 herausgegebene und aktualisierte Empfehlungen sind verfügbar unter: <http://www.gdaonline.de>
- GRATHWOHL, P., 2011: Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe (Kurztitel). Zwischenbericht des BMU-Forschungsvorhabens FKZ: 3707 74 301, Januar 2011; <http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/publikationen/>
- HAFENTECHNISCHE GESELLSCHAFT (HTG) 2006: Fachbericht Fachausschuss Baggergut -Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste. <http://htg-baggergut.de>
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 1-0 Technische Maßnahmen betreffend die geologische Barriere vom 19.12.2011. Veröffentlichung voraussichtlich Frühjahr 2012
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 5-3 Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen vom 07. 12. 2010; <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 2-3 Mineralische Basisabdichtungskomponenten aus Deponieersatzbaustoffen vom 08. 06. 2011; <http://www.laga->

online.de/servlet/is/26509/

- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 3-2 Mineralische Entwässerungsschichten in Basisabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen vom 19.12.2011. Veröffentlichung voraussichtlich Frühjahr 2012
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 4-1 Trag- und Ausgleichsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen vom 13.12.2011. Veröffentlichung voraussichtlich Frühjahr 2012
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard BQS 6-2 Mineralische Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen aus nicht natürlichen Baustoffen vom 19.12.2011. Veröffentlichung voraussichtlich Frühjahr 2012
- LAGA MERKBLATT M20, 2004: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung; 1.2 Bodenmaterial (TR Boden)
- LAYMAN REPORT, 2008: CONWASTE - CONversion of WASTE for use as construction material for environmentally friendly closing of industrial landfills. *<http://www.conwaste.eu>*
- MELCHIOR, S., 2005: Funktionale Anforderungen an den Einsatz von Ersatzbaustoffen bei der Profilierung, Abdichtung und Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften. In: Melchior, S. u. Berger, K. (Hrsg.): *Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 56, Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg, S. 9-18.*
- TRESSELT, K., 2000: Feldversuche zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit Dichtungen aus Hafenschlick. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 46, Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg*
- UBA, 2008: Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle, Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 33 325, Endbericht. *<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3706.pdf>*
- UBA, 2011: Umweltbundesamt HINTERGRUND - Einsatz von Ersatzbaustoffen in Deutschland. Internet-Veröffentlichung 15. 02. 2011. *<http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/publikationen/ersatzstoffe.pdf>*
- WITT, K. J., 2010: Mineral Barriers in Landfill Capping Systems – Conditions of Durability. in Sarsby, R. W. & Meggyes, T. (Hrsg.): *Construction for a Sustainable Environment. CRS Press Taylor u. Francis Group, p. 3-22*
- WITT, K. J., ZEH, R. & FABIAN, F., 2004: Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen. *Müll und Abfall, 11/2004, S. 540-546*

Autor

Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystr. 11c, D-99423 Weimar. E-Mail: kj.witt@uni-weimar.de